
V CAIM 2016
V Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional del FoDAMI
Santiago del Estero - octubre de 2016
Facultad de Ciencias
Exáctas y Tecnologías
UNSE
UNSE
Universidad Nacional
de Santiago del Estero
FoDAMI

MEMORIAS

 ISBN: 978-987-1676-63-7

Presentación

Constituye un verdadero orgullo para toda la comunidad de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, tener la ocasión de ser anfitriona y co-organizadora del V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (V CAIM 2016). Manteniendo el mismo norte, tal como rigen los objetivos dados por el Foro Docente del Área Mecánica de las Ingenierías (FODAMI), se continuarán reuniendo tanto docentes, investigadores y profesionales industriales de diversas Universidades y Centros de Desarrollo de nuestro país y del exterior.

El progreso de un país está vinculado directamente a sus técnicas en las distintas áreas de producción. Esto nos liga estrechamente a la ingeniería, donde la Ingeniería Mecánica es uno de los pilares.

Concretamos este evento con la idea que: *El progreso no consiste en aniquilar hoy lo realizado ayer, sino por el contrario, se debe tratar de conservar aquella esencia del ayer que tuvo la virtud de crear ese hoy mejor.* Parafraseando a Ortega y Gaset, esperamos que basados en lo aprendido y compartiendo nuevos conocimientos, generaremos una mejor sociedad, más integrada, justa y mejor desenvuelta técnicamente.

Estamos esperanzados que aquí en Santiago del Estero, la ciudad más antigua de Argentina, donde se inció la Universidad Argentina, comenzó a desarrollarse la industria nacional y se realizaron las primeras exportaciones al Brasil; podamos compartir y aprender nuevas estrategias, tanto para la educación como para el desarrollo tecnológico, producción, etc.

Esperamos que en este Congreso cada uno de sus participantes pueda compartir sus experiencias y sobre todo llevarse mucho más que el bagaje de conocimientos que trajo, sino el sano hábito de participar de una obra mancomunada que nos mejore como seres humanos. Así mismo, nosotros como anfitriones nos alegraremos si cada uno de los visitantes por su vivencia en Santiago podamos decirle recordando una chacarera: ”*Has de llevar para siempre, prendida como una estrella, el embrujo de esta tierra “*.



Ing. Héctor Paz
Decano

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional de Santiago del Estero

Programa

Miércoles, 5 de octubre de 2016

08:00 Registro de participantes
09:30 Acto Inaugural
10:00 Conferencia Magistral: Modelado Computacional de Válvulas de Motores de Combustión Interna (Dr. Alberto Cardona – CIMEC)
11:00 Café - Posters
11:30 Ponencias
13:30 Lunch de bienvenida
15:00 Ponencias
17:00 Café - Posters
17:30 Ponencias
19:45 Presentación Industria Textil Coteminas Argentina SA
21:00 Cierre de actividades del día

Jueves, 6 de octubre de 2016

09:00 Ponencias
11:00 Café - Posters
11:30 Conferencia: Tecnologías Modernas de Desarrollo y Fabricación de Partes Metálicas por Colado – Aleaciones de Muy Alta Resistencia y Confiabilidad (Dr. Roberto E. Boeri – INTEMA)
13:00 Almuerzo Libre
14:00 ASAMBLEA FoDAMI (Salón Estrella del Norte – FORUM)
16:00 Ponencias
17:30 Café - Posters
18:00 Ponencias
19:15 Cierre de Ponencias
21:00 Traslado a Predio de Consejo Profesional de Ingenieros
21:30 Cena del Congreso

Viernes, 7 de octubre de 2016

09:00 Ponencias
10:00 Mesa panel “Curso de Ingreso en carreras de Ingeniería Mecánica y Electromecánica”
11:00 Café
11:30 Conferencia: Crecimiento y Caracterización de Materiales a Escala Micro y Nanométrica (Prof. John E. Ordoñez – UNICATOLICA)
13:00 Cierre del Congreso

 ISBN: 978-987-1676-63-7

Comité técnico científico

Presidente

- Amé Ricardo — Univ. Nac. de Lomas de Zamora

Secretario

- Hecker Rogelio — Univ. Nac. de La Pampa

Coordinadores Áreas Temáticas

Enseñanza

- Dasso Gabriel María — Univ. de Buenos Aires
- Valor Mariana — Univ. Tec. Nacional

Mecatrónica y Automatización

- Penisi Osvaldo Hugo — Univ. Nac. de San Juan
- Zambrano Daniel — Univ. Nac. de General Sarmiento

Energía y Medio Ambiente

- Barrionuevo Fernando — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Juárez Carlos Ramón — Univ. Nac. de Santiago del Estero

Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas

- Romeo Alberto — Univ. Tec. Nacional
- Lukjaniec Antonio — Univ. de Morón

Fabricación

- Antezana López Javier — Univ. Tec. Nacional
- Hecker Rogelio — Univ. Nac. de La Pampa

Explotación y Mantenimiento de Máquinas

- Keil Germán — Univ. Nac. del Comauhe
- Abet Eduardo — Univ. Tec. Nacional

Sistemas Térmicos e Hidráulicos

- Caldera Martin — Univ. Nac. de Mar del Plata
- Di Paolo Jose — Univ. Nac. de Entre Ríos

Materiales

- Robles Sandra — Univ. Nac. del Sur
- Alessio Daniela — Univ. Nac. del Sur

Simulaciones Numéricas y Mecánica Computacional

- Ferreiro Alejandro Remigio — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Rodolfo Miguel Duelli — Univ. Nac. de Rio Cuarto

Miseláneas

- Amé Ricardo — Univ. Nac. de Lomas de Zamora

Evaluadores

- Abet Jorge — Univ. Tec. Nacional Córdoba
- Aguilar Luis Alberto — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Algieri Carlos — Univ. Tec. Nacional Buenos Aires
- Barlatey María Alejandra — INTI – Entre Ríos
- Borzacconi Vidal Liliana — Univ. de la República, Uruguay
- Busso Arturo — Univ. Nac. del Nordeste
- Cardona Alberto — CIMEC - CONICET / Univ. Nac. del Litoral
- Carrizo Blanca — Univ. Tec. Nacional Córdoba
- Cattaneo Carlos — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Cirera Eduardo — Univ. Nac. del Nordeste
- Cisilino Adrián — Univ. Nac. de Mar del Plata
- Colazo Carlos — Univ. Tec. Nacional Villa María
- Conte Daniel — Univ. Tec. Nacional Córdoba
- Coussirat Miguel — Univ. Tec. Nacional Mendoza
- Cova Walter — Univ. Tec. Nacional La Rioja
- Chicojay Coloma Carlos Aníbal — Univ. de San Carlos, Guatemala
- De Bartoli Mario Eduardo — Univ. Nac. del Nordeste
- Fernández Mario Alberto — Univ. de Talca, Chile
- Flores Gustavo Marcelo — Univ. Nac. de La Pampa

• Franco Judith	Univ. Nac. de Salta
• García Héctor Rubén	Univ. Tec. Nacional Bahía Blanca
• García Morán Sergio	Fundación Prodintec, España
• Gonzalez Luis Ricardo	Univ. Nac. de Santiago del Estero
• González Gustavo	Inst. Univ. Aeronautico / U. Tec. Nacional Córdoba
• Gonzalez Ruben	Univ. Federal Rio Grande do Sul, Brasil
• Guzmán Villaseñor Mario Andrés	Universidad de la Frontera, Chile
• Guidici Alejandro José	Univ. Nac. de Córdoba
• Heidenreich Elvio	Univ. Nac. De Lomas de Zamora
• Hernández Alejandro	Univ. Nac. de Salta
• Labriola Carlos	Univ. Nac. del Comahue
• Lafflitto Cristina	Univ. Nac. de Lomas de Zamora
• Larreteguy Axel	Univ. Argentina de la Empresa
• Lassig Jorge	Univ. Nac. del Comahue
• Llonch Elena	Univ. Nac. de Rosario
• Lopez Ezequiel	Univ. Nac. del Litoral
• Marchese Ricardo	Univ. Nac. de Tucumán
• Martinez Krahmer Daniel	INTI – Univ. Nac. De Lomas de Zamora
• Mazzaferro Cintia	Univ. Federal Rio Grande do Sul, Brasil
• Mechetti Magdalena	Univ. Nac. de Tucumán
• Menghini Matías	Univ. Nac. de La Plata
• Minnaard Claudia	Univ. Nac. De Lomas de Zamora
• Modesti Mario	Univ. Tec. Nacional Córdoba
• Morales Julio Silvio	Consultor Independiente
• Moro Lilian	Univ. Tec. Nacional Bahía Blanca
• Natal Jorge Renato	Univ. de Porto, Portugal
• Nigro Sardella Norberto Marcelo	CIMEC - CONICET / Univ. Nac. del Litoral
• Orellana Adrián Oscar	Univ. Nac. de San Juan
• Palavecino Alejandro	Univ. Nac. del Comahue
• Perondi Eduardo	Univ. Federal Rio Grande do Sul, Brasil

- Posluzny José Antonio — Univ. Nac. de Misiones
- Prieto Germán — Univ. Nac. del Sur
- Pucheta Julián — Univ. Nac. de Córdoba
- Rebollo Daniel de Jesús — Univ. Nac. de San Juan
- Roccia Bruno — Univ. Nac. de Rio Cuarto
- Romeo Alberto — Univ. Tec. Nacional Rosario
- Rosolio Alejandra — Univ. Nac. de Rosario - Univ. Tec. Nacional Rosario
- Sanchez Manuel — Univ. Nac. de San Juan
- Sanchez Patricia — Univ. Nac. de Rosario
- Sartorio Aquino Diogenes — Univ. Nac de Asunción, Paraguay
- Sierra Vargas Fabio Emiro — Univ. Nac. de Colombia, Bogotá, Colombia
- Sosa María Isabel — Univ. Nac. de La Plata
- Tais Carlos — Univ. Tec. Nacional
- Udrizar Lezcano María Sandra — Univ. Nac. del Nordeste
- Urrestarazu Adrián — Univ. Nac. del Sur
- Varela Pablo — Univ. Nac. de Rio Cuarto
- Vera Luis Horacio — Univ. Nac. del Nordeste
- Verstraete Marcos — Univ. Nac. de Rio Cuarto
- Vicente Diego Alberto — Univ. Nac. de La Pampa
- Wittwer Adrián Roberto — Univ. Nac. del Nordeste
- Ziegler Daniel — Univ. Nac. del Sur

Compiladores

- Cattaneo Carlos Alberto — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Maguna Carlos Roberto — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Ferreiro Alejandro Remigio — Univ. Nac. de Santiago del Estero

 ISBN: 978-987-1676-63-7

Comité organizador

Presidente

- Mg. Ing. Alejandro R. Ferreiro — Univ. Nac. de Santiago del Estero

Co-presidente

- Ing. María Teresita Pilán — Univ. Nac. de Santiago del Estero
- Ing. Antonio J. Lukjaniec — FoDAMI

Integrantes

- Ing. Luis Aguilar
- Ing. Fernando Barrionuevo
- Mg. Carlos Cattaneo
- Ing. Edgar O. Palma
- Ing. Anibal O. Gomez Khairallah
- Ing. Luis Gonzalez
- Ing. René A. Rodriguez
- Ing. Carlos Maguna
- Ing. Carlos Gimenez
- Ing. Cristian Quatrini
- Tec. Marcos Coronel

Colaboradores

- Lic. Patricia Ponce
- Dr. Ing. Carlos R. Juarez
- Ing. Silvina L. Rigali
- Ing. Orlando A. Ibarra
- Ing. Gabriel E. Miguel
- Ing. René José Rodriguez
- Ing. Rosa Alicia Kairuz
- Carlos Alberto Caro
- Franco Iñiguez
- Adriana Ruggeri
- Martin Alzugaray
- Nelba Vega
- Carlos Villa
- Comisión de Estudiantes de Ingeniería Electromecánica (UNSE)

 ISBN: 978-987-1676-63-7

Autoridades

FoDAMI

Presidente

- Prof. Ing. Alberto Pablo Romeo

Vicepresidente

- Ing. Antonio Lukjaniec

Secretario

- Mg. Ing. Sandra Isabel Robles

Pro secretario

- Dr. Ing. Ricardo Mario Amé

Tesorero

- Ing. Daniela Alessio

Pro tesorero

- Ing. José Sanchez

Vocal titular 1

- Ing. Rodolfo Duelli

Vocal titular 2

- Ing. Leonardo Plaun

Vocal titular 3

- Dr. Ing. Rogelio Hecker

Vocal suplente 1

- IMg. Ing. Alejandro Ferreiro

Vocal suplente 2

- Ing. Blanca Carrizo

Vocal suplente 3

- Mg. Ing. Carlos Labriola

Órganos de fiscalización

Titular de la Comisión revisora de cuentas

- Ing. Carlos Alejandro Lordi

Suplente de la Comisión revisora de cuentas

- Ing. Javier Antezana López

UNSE

Rectora

- Lic. Natividad Nassif

Vicerrector

- Dr. Publio Araujo

Secretaria General

- Ing. MSc Claudia Degano

Secretario Académica

- Prof. Víctor Hugo Ledesma

Seretaria de Administración

- Lic. María Mercedes Días

Secretaria de Ciencia y Técnica

- Mg. Ing. Marcia Beatriz Rizo Patrón

Secretaria de Extensión Universitaria

- Biol. Nancy Gianuzzo

Secretaria de Bienestar Estudiantil

- Lic. María Luisa Araujo

Secretario de Planeamiento Universitario

- Arq. Luis Righetti

FCEyT-UNSE

Decano

- Ing. Héctor Ruben Paz

Vicedecano

- Ing. Ing. Pedro Juvenal Basualdo

Secretario Académico

- Ing. Ricardo Dermidio Cordero

Secretario de Administración

- Ing. Rosa Alicia del Valle Kairuz

Secretario de Ciencia, Técnica y Posgrado

- Ing. María Teresa Pilán

Secretario de Extensión, Vinculación y Transferencia

- Ing. Francisco Santiago Ruiz

H. Cámara de Diputados de la Nación

Presidencia

2968-D-16
OD 294

LA CÁMARA DE DIPUTADOS DE LA NACIÓN

R E S U E L V E:

Expresar su beneplácito por el V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica –V CAIM 2016–, organizado por el Foro Docente Área Mecánica de las Ingenierías –FODAMI y la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, que se llevará a cabo del 5 al 7 de octubre de 2016, en la ciudad capital de la provincia de Santiago del Estero.

COMUNICADA EN LOS TÉRMINOS DEL ARTÍCULO 114 DEL REGLAMENTO DE LA HONORABLE CÁMARA DE DIPUTADOS DE LA NACIÓN, EN BUENOS AIRES, EL 9 AGO 2016

H. CAMARA DE DIPUTADOS DE LA NACION PRESIDENCIA

FIRMAS CORRESPONDEN A:

EMILIO MONZÓ: PRESIDENTE HONORABLE CAMARA DE DIPUTADOS DE LA NACION

EUGENIO INCHAUSTI: SECRETARIO PARLAMENTARIO H.C.D.N.

"2016 – Año del Bicentenario de la Declaración de la Independencia Nacional"

H. Cámara de Diputados de la Nación

CÁMARA DE DIPUTADOS
DE LA NACIÓN
MESA DE ENTRADAS

24 MAY 2016

SEC: D N° 2968 HORA 16°

Proyecto de Resolución

La Honorable Cámara de Diputados de la Nación

Resuelve:

Declarar de interés de esta Honorable Cámara de Diputados el Quinto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica –V CAIM 2016- a realizarse los días 5 al 7 de octubre del corriente año en la Ciudad de Santiago del Estero, provincia homónima.

MANUEL HUMBERTO JUÁREZ
DIPUTADO DE LA NACIÓN

NORMA ABDALA de MATARAZZO
DIPUTADA DE LA NACIÓN

JOSE ALBERTO HERRERA
DIPUTADO DE LA NACION

M. A. PASTORIZA

Abdala de Matarazo, Norma
Juárez, Humberto Manuel
Herrera, Alberto José
Oliva, Cristian Rodolfo
Pastoriza, Mirta Ameliana

Consejo Federal de Decanos de Ingeniería
República Argentina

Nota 185 /15 - CONFEDI
Buenos Aires, 21 de septiembre de 2015

Mg. Ing. Alejandro R. Ferreiro
Director del Departamento Académico Mecánica
y de la Escuela de Ingeniería Industrial
Facultad de Ciencias Exáctas y Tecnologías
Universidad Nacional de Santiago del Estero

Asunto: Declaración de interés

De nuestra mayor consideración:

El Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) de la República Argentina se creó en marzo de 1988 a partir de la inquietud de un grupo de Decanos de conformar un ámbito en el cual se debatan y propicien, a partir de experiencias propias, soluciones a las problemáticas universitarias planteadas en las Unidades Académicas de Ingeniería. Durante más de veinticinco años nuestra actividad se ha desarrollado con una alta participación de todas las Universidades Públicas y Privadas del país y en un marco de respeto que ha permitido romper barreras de competencia ficticia, posibilitando el logro de los objetivos propuestos.

El CONFEDI participa y promueve espacios de reflexión, propuestas y/o acciones que contribuyan al más amplio intercambio de información en el ámbito de la Ingeniería, siempre bajo el propósito de consolidar vínculos y generar redes.

Por todo lo citado anteriormente, declaramos de interés y otorgamos nuestro aval institucional al **"V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (V CAIM 2016)"**, el cual se llevará a cabo entre los días **5 al 7 de octubre de 2015** en la **Ciudad de Santiago del Estero,** en las instalaciones de la **Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías** de la **Universidad Nacional de Santiago**.

Muy cordialmente,

Ing. Héctor PAZ
Presidente CONFEDI

Poder Legislativo
Santiago del Estero

DECLARACION N° 126

LA CÁMARA DE DIPUTADOS DE LA PROVINCIA

D E C L A R A:

ART. 1°.- De interés provincial, legislativo y técnico el **"V° CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA MECANICA" (V° CAIM 2016)**, que se llevará a cabo los días 05, 06, 07 de Octubre de 2016 en nuestra ciudad, organizado por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.

ART. 2°.- Comunicar y Archivar.

SALA DE SESIONES, Santiago del Estero, 12 de Abril de 2016.

Dr. BERNARDO J. HERRERA
SECRETARIO LEGISLATIVO
H. CAMARA DE DIPUTADOS

Dr. MARCELO A. BARBUR
PRESIDENTE PROVISIONAL
H. CAMARA DE DIPUTADOS

Honorable Concejo Deliberante de Santiago del Estero

"2016 Año del Bicentenario de la Declaración de la Independencia"

Ordenanza N° 5231/16.-

VISTO:

El Expediente N° 254-28-2016, caratulado: "Ordenanza declarando de Interés Municipal y Educativo el V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica 2016"; y

CONSIDERANDO:

Que, tal evento congrega a un importante número de académicos de la Ingeniería Mecánica de nuestro país y también de otras naciones sudamericanas.

Que, se realizará por primera vez en nuestra ciudad y contará con una participación relevante mediante exposición de trabajos, disertaciones y reuniones de trabajo.

Que, la realización de este Congreso en Santiago del Estero, permitirá afianzar los logros alcanzados en ediciones anteriores y fomentar lazos universitarios entre instituciones argentinas y también del extranjero, procurando continuar materializando la expansión de las relevantes acciones emprendidas por el Foro Docente del Área Mecánica de las Ingenierías (FODAMI), en sus catorce años de labor.

Que, la Comisión de Educación, Cultura y Turismo, después de analizar los antecedentes, ha emitido dictamen favorable.

Por ello;

EL H. CONCEJO DELIBERANTE DE SANTIAGO DEL ESTERO, SANCIONA CON FUERZA DE

O R D E N A N Z A:

ART. 1°: Declárase de Interés Municipal y Educativo el ***"V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica V° CAIM 2016"***, que se realizará en esta ciudad desde el 5 al 7 de Octubre del corriente año, en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.-

ART. 2°: Entréguese copia fiel de la presente Ordenanza al Comité Organizador del evento mencionado en el artículo precedente.-

ART. 3°: Comuníquese al Departamento Ejecutivo, dése al Boletín Municipal, regístrese y archívese.-

SALA DE SESIONES, 26 de abril de 2016.-

Dr. SANTIAGO F. DISNEROS
SECRETARIO GENERAL
HONORABLE CONCEJO DELIBERANTE
SANTIAGO DEL ESTERO

C.P.N. JUAN MANUEL PELTRAMO
PRESIDENTE
H. CONCEJO DELIBERANTE
SANTIAGO DEL ESTERO

Avellaneda e Irigoyen – Ciudad de La Banda
Tel. 0385- 4270900 /2725

HONORABLE CONCEJO DELIBERANTE CIUDAD DE LA BANDA SANTIAGO DEL ESTERO

DECLARACION Nº 019/16

VISTO:

La realización del V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (V CAIM) los días 05, 06 y 07 de Octubre del corriente año, organizado por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, y ...

CONSIDERANDO:

Que dada la envergadura del evento se congregaran en nuestra provincia un importante número de académicos de la Ingeniera mecánica de nuestro país y de otras naciones sudamericanas.-

Que su objetivo es generar un espacio de encuentro e intercambio de conocimiento y de experiencia entre pares.-

Que es la primera vez que se realiza en nuestra provincia y contara con una gran cantidad de disertaciones, exposiciones y reuniones de trabajo.-

Que la realización de este Congreso en Santiago del Estero, permitirá afianzar los logros alcanzados en ediciones anteriores y fomentar los lazos universitarios entre instituciones argentinas y también extranjeras, procurando continuar materializando la expansión de las relevantes acciones emprendidas por el Foro Docente del área mecánica de las ingenierías (FODAMI), en sus catorce años de labor.-

EN MERITO A TODO ELLO
EL HONORABLE CONCEJO DELIBERANTE
DE LA CIUDAD DE LA BANDA

D E C L A R A

ARTICULO 1o.- DECLARAR DE INTERES MUNICIPAL Y EDUCATIVO el "V CONGRESO ARGENTINO DE INGIENERIA MECANICA CAIM 2016 " que se realizara en nuestra provincia los días 05, 06 y 07 de Octubre del corriente año, en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.-

ARTICULO 2o.- Se entregara una copia de la presente declaración al Comité Organizador del evento.-

ARTICULO 3o.- Los vistos y considerandos pasan a formar parte del presente Cuerpo Legal.-

ARTICULO 4o.- DESE al DEM y a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológica de la Universidad Nacional de Santiago del Estero a sus efectos, Comuníquese, Cumplido, Archívese. –

DADO EN LA SALA DE SESIONES DEL HONORABLE CONCEJO DELIBERANTE DE LA CIUDAD DE LA BANDA A LOS CATORCE DIAS DEL MES DE JUNIO DEL AÑO DOS MIL DIECISEIS.-

FDO.PRESIDENTE PROVISORIA– DÑA.MARIA ASCENCION ESCAÑUELA

FDO. SECRETARIA GENERAL – DRA.ANA VICTORIA TORRES

HONORABLE CONCEJO DELIBERANTE
CIUDAD DE LA BANDA
SANTIAGO DEL ESTERO

MARIA ASCENCION ESCAÑUELA
PRESIDENTE PROVISORIA
Honorable Concejo Deliberante
LA BANDA

CODINOA
Consejo de Decanos de Ingeniería del NOA

Facultad de Ingeniería – UNJu
Facultad de Ingeniería – UNSa
Facultad de Ciencias Naturales – UNSa
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – UNT

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías – UNSE
Facultad de Agronomía y Agroindustrias – UNSE
Facultad de Ciencias Forestales – UNSE
Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas – UNCa

SAN MIGUEL de TUCUMÁN, 03 de Agosto de 2015.

RESOLUCIÓN Nº 002/15

V I S T O:

La Nota presentada por **Mg. Alejandro r. Ferreiro y el Ing. Héctor Paz**, en representación del comité organizador del **"V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (V CAIM 2016)"**; y

CONSIDERANDO:

Que mediante la misma solicita el Auspicio Institucional para el evento "V CAIM 2016" a realizarse desde el 5 al 7 de octubre de 2016, que cuenta con aval académico de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Que los firmantes expresan que el evento convoca a un importante número de académicos de la Ingeniería Mecánica de nuestro país y de otras naciones sudamericanas.

Que dada la trascendencia del evento científico, la modalidad del mismo y las temáticas a abordar en su desarrollo, se considera pertinente el acompañamiento Institucional del CODINOA.

Que el Consejo de Decanos de Ingeniería del Noroeste Argentino (CODINOA), en la Tercera Reunión Anual, realizada en la Facultad de Ciencias Exacta y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, el día 31 de julio de 2015, ha decidido dar Auspicio Institucional a la realización del "V CAIM 2016".

Por ello:

EL CONSEJO DE DECANOS DE INGENIERÍA DEL NOROESTE ARGENTINO – CODINOA;

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- Dar Auspicio Institucional en el ámbito del CODINOA al " **V CAIM 2016** ", a llevarse a cabo en la ciudad de Santiago del Estero, los días 5, 6 y 7 de Octubre de 2016, en un todo de acuerdo con los considerandos de la presente Resolución, dada la trascendencia del evento científico, la modalidad del mismo y las temáticas a abordar en su desarrollo.

ARTICULO SEGUNDO.- Publíquese, remítase copia en representación del comité organiza, al Mg. Alejandro Ferreiro y al decano de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la UNSE Ing. Héctor Paz y al resto de los Señores Decanos del CODINOA. Cumplido, archívese.-

Hrp.

Ing. Sergio José PAGANI
Coordinador
Consejo de Decanos de Ingeniería del NOA

 ISBN: 978-987-1676-63-7

Auspicios

























































 ISBN: 978-987-1676-63-7



 ISBN: 978-987-1676-63-7

Áreas Temáticas

Enseñanza	Pág. 1 a 241
Mecatrónica y Automatización	Pág. 242 a 405
Energía y Medio Ambiente	Pág. 406 a 708
Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas	Pág. 709 a 921
Fabricación	Pág. 922 a 1025
Explotación y Mantenimiento de Máquinas	Pág. 1026 a 1132
Sistemas Térmicos e Hidráulicos	Pág. 1133 a 1276
Materiales	Pág. 1277 a 1378
Simulaciones Numéricas y Mecánica Computacional	Pág. 1379 a 1638
Misceláneas	Pág. 1639 a 1680

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ELEMENTOS DE MÁQUINAS. CÁLCULOS CON TENSIONES NOMINALES Y LOCALES. INCONSISTENCIAS EN LA ENSEÑANZA

Germán G. Keil [1], **Damián F. Campos** [1] **y Marcelo T. Piovan** [2]

[1]Dpto. Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina
correo-e: german.keil@fain.uncoma.edu.ar
damian.campos@fain.uncoma.edu.ar
[2]Centro de Investigaciones de Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional FRBB y CONICET. 11 de Abril 461, Bahía Blanca. Argentina.
correo-e: mpiovan@frbb.utn.edu.ar

RESUMEN

En el dimensionamiento y verificación de elementos de máquinas, se tienen complejidades asociadas con las cargas, geometría, distribución y combinación de tensiones, y la resistencia del material. Según las características de las piezas y el avance del diseño, se emplean teorías, de resistencia de los materiales y/o de la elasticidad y mecánica del continuo.

Rutinariamente se asume en los cálculos de dimensionamiento, estados uniaxiales y eventualmente bidimensionales de tensiones. Por ejemplo, pueden aparecer tensiones normales por tracción y flexión, que a sus efectos se suman, considerando como límite, la tensión de fluencia por tracción. Para cada tipo, el comportamiento del material es distinto.

Simplificaciones como la expuesta, son conducentes para facilitar a los alumnos el abordaje de problemas. Es común aplicarlas, sin la conveniente explicación de los alcances y límites.

En la enseñanza a nivel superior, aplicando modelos tridimensionales con aplicación de software por elementos finitos, habitualmente para estados estáticos, el coeficiente de seguridad surge de relacionar las tensiones de Von Mises (para materiales dúctiles y homogéneos) con la de fluencia del material. La resistencia del mismo en el punto de interés, dependerá del gradiente de tensiones en el entorno. Con estos procedimientos, se obtienen con buena precisión las tensiones, pero luego se aplica una significativa simplificación, para obtener el denominado coeficiente de seguridad, por asimilación de las tensiones localizadas como nominales.

En este trabajo se presentan detalles de simplificaciones, que si no son correctamente alertadas en el momento adecuado durante el proceso de enseñanza, pueden replicarse en forma impropia en problemas más complejos. Estas simplificaciones entonces dejan de ser funcionales, y donde detrás de una aparente rigurosidad que apunta a criterios de optimización, se revelan debilidades conceptuales.

La propuesta se fundamenta en la normativa FKM (*Forschungskuratorium Maschinenbau* – Frankfurt/Main – Alemania). Sin cuestionar los métodos de cálculo usuales, sugiere plantear a los alumnos de ingeniería del “porqué” de las simplificaciones y sus implicancias.

Palabras Claves: *Elementos, máquinas, tensiones, enseñanza, inconsistencias.*

1. INTRODUCCIÓN

Conforme a los métodos de diseño empleados usualmente en ingeniería, el proceso de diseño y desarrollo de una máquina y de sus componentes a partir de las especificaciones técnicas, responde a una secuencia que incluye una fase inicial conceptual, seguidas por una de conformación básica, y concluyendo con la documentación para la fabricación. En cada una de ellas se emplean herramientas de cálculo con características particulares, aptas para el propósito conforme a la información disponible.

En la etapa inicial de diseño, a partir de la propuesta de la cadena cinemática cuya funcionalidad será coherente con los requerimientos del sistema, con información escasa, se deben corporizar los eslabones, desde el punto de vista de formas y dimensiones básicas. En este contexto, para realizar los cálculos correspondientes, se recurre a las denominadas hipótesis simplificativas. Corresponde señalar, que las mismas son de aplicación frecuente en los proyectos de ingeniería, y como tales son abordados consecuentemente durante el proceso de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes en este campo disciplinar. En correspondencia se emplean factores de seguridad. En el mismo se contemplan todas las incertidumbres asociadas con el comportamiento real del material, las cargas aplicadas y tensiones resultantes, la hipótesis de falla, factores geométricos y la confiabilidad estimada.

Concluida la fase precedente, el diseño va madurando para concluir, considerando eventualmente una etapa de optimización, en la corporización final del elemento, denominada ingeniería de detalle, que incluye entre otros, aspectos geométricos, dimensiones, tolerancias, materiales, tratamientos térmicos, y controles no destructivos. Previo a esta instancia final, con información abundante y con más precisión, se realiza habitualmente un análisis exhaustivo del estado de tensiones y deformaciones, con herramientas analíticas acordes. Este análisis se referencia en la satisfacción de las especificaciones técnicas de origen, y/o eventualmente, de normas de aceptación acordada. Una opción en este sentido, es la guía "*Analytical Strenght Assessment of Components Made of Steel, Cast Iron and Aluminum Materials in Mechanical Engineering"* de FKM (*Forschungskuratorium Maschinenbau* – Frankfurt/Main – Alemania) [1]. Para el presente trabajo, la misma se constituye en uno de los ejes de referencia.

La guía FKM es un algoritmo de cálculo, consistente en una serie de instrucciones, ecuaciones y tablas. Permite realizar la evaluación analítica de resistencia para elementos de barra, cáscara y tipo bloque o "ladrillos", tanto para condiciones estáticas como de comportamiento a la fatiga. Resulta de aplicación para ingeniería mecánica y campos relacionados. Su implementación debe ser acordada entre el Comitente y Contratista. Conforme a la misma, las tensiones pueden ser

ISBN: 978-987-1676-63-7

determinadas analíticamente usando métodos elementales, avanzados de la mecánica teórica, numéricos aplicando elementos finitos, o mediante mediciones experimentales.

Sobre el particular, en cuanto a la determinación de tensiones, en las prácticas habituales de ingeniería desde la fase inicial a la final del diseño, los cálculos incluyen según la evolución, las denominadas tensiones nominales y/o locales, que se comparan con valores de resistencia de materiales. En este proceso, se presentan algunas singularidades, y donde se infiere que encuentran su raíz en el proceso de aprendizaje en la escuela de ingeniería, y que a nuestro entender deben ser observadas racionalmente, para no caer en contradicciones y/o inconsistencias. A modo de síntesis se puede manifestar que es habitual, tras procesos de cálculos de verificación, que muestran rigurosidad y extrema precisión, en muchos casos los mismos se desvirtúan porque los resultados son comparados con datos de resistencia que no se corresponden en forma directa con el estado tensional actuante, en el punto de interés y su entorno.

El objeto del presente trabajo es focalizar la atención en los aspectos planteados en el párrafo precedente, esbozando una estrategia de intervención, a los fines de generar un adecuado tratamiento sobre el particular, en el proceso de formación de ingenieros mecánicos.

2. MARCO REFERENCIAL

Se presentan a los fines de una contextualización, dos temáticas a saber: hipótesis simplificativas en los cálculos de ingeniería y tensiones nominales y locales.

2.1. Hipótesis simplificativas

En la ingeniería mecánica para el abordaje del cálculo de elementos de máquinas en su fase inicial (ingenierías conceptual y básica), de una u otra manera, se plantean supuestos e hipótesis simplificativas. También se presentan situaciones donde se necesitan resultados aproximados en forma rápida, por ejemplo “análisis temprano de costos”, que meritan la aplicación de hipótesis de cálculo menos refinadas.

Una hipótesis de proyecto, se constituye en una decisión que el proyectista debe tomar para ajustar, simplificar el problema, de modo que pueda ser analizado por métodos conocidos. Normalmente, tanto en los cursos de Física como de Resistencia de Materiales, se seleccionan problemas que se ajustan a las hipótesis hechas al deducir las ecuaciones básicas, por ejemplo, de resistencia.

En estos cálculos iniciales, se consideran piezas de geometría sencilla, con cargas y vínculos ajustados a ciertas condiciones que pueden calificarse de ideales, para las cuales se dedujeron ecuaciones básicas de equilibrio y resistencia.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El menú de hipótesis simplificativas aplicables, está vinculado a la experiencia, habilidades, sagacidad del diseñador, de los recursos humanos técnicos y económicos disponibles, tiempos. En las tareas de pre-dimensionamiento señaladas, se deben fijar tensiones admisibles. Diversos autores especialistas, proponen criterios de racionalización para la fijación del coeficiente de seguridad, tomando en consideración las incertidumbres asociadas. Dichos criterios tienen en cuenta en su mayoría, el grado de simplificación implicado; a mayor simplicidad corresponde un coeficiente de seguridad más elevado, surgiendo tensiones de proyecto o admisibles relativamente bajas. En los procesos de enseñanza afines en la ingeniería, es habitual que el docente plantee esta situación a los alumnos con total claridad.

Superadas las etapas iniciales en un proyecto, con disponibilidad de la ingeniería de detalle, se realiza la verificación final. En muchos casos se emplean recursos IAO (Ingeniería Asistida por Ordenador). En esta se dejan de lado las simplificaciones, y se aborda el problema con la total complejidad asociada, en cuanto a aspectos geométricos, condiciones de carga (espectros), los procesos tecnológicos, y las influencias correspondientes en el comportamiento del material del componente mecánico. Donde corresponda se emplean normas específicas.

Debe señalarse que no es conducente hablar de ingeniería de alta calidad o de baja según el tipo de hipótesis o herramientas de cálculo que se aplique. Siempre vale la aptitud para el propósito. En determinadas etapas de los procesos de diseño, las simplificaciones son útiles y necesarias.

2.2. Tensiones nominales y locales.

Para el dimensionamiento y/o verificación de elementos de máquinas, se emplean corrientemente distintas teorías, conforme a las características geométricas básicas de los mismos, ya sea uni, bi o tridimensionales. Para el primer caso y algunos del segundo grupo habitualmente se recurre a las teorías de resistencia de los materiales; en forma preponderante para el segundo tipo y en particular para los del tercero, se apela a las teorías de elasticidad y mecánica del continuo, para los cuales en la resolución de las ecuaciones correspondientes se recurre al cálculo numérico.

Para el caso típico de elementos de barra (unidimensionales) y cáscaras (bidimensionales – estado plano de tensiones), para un estado de carga definido, con las ecuaciones elementales de la mecánica técnica, se obtienen las denominadas tensiones nominales. Sus principales características son que están asociadas a una sección definida de la pieza o elemento de máquina, con una distribución lineal sobre la misma. Para un análisis de integridad, dichas tensiones nominales, se cotejan con la resistencia del material constitutivo del elemento, y obtenido de ensayos normalizados conforme al mismo tipo de solicitación.

En los elementos asociados a una geometría bi o tridimensional, en las verificaciones realizadas con la aplicación por ejemplo de programas fundamentados en el método de los elementos finitos,

ISBN: 978-987-1676-63-7

se obtienen las denominadas tensiones locales. Las mismas no se asocian a una determinada sección de la pieza, y no tienen en la mayoría de los casos, por la propia geometría, una distribución lineal. Para la determinación del grado de criticidad del estado de tensión local, con un gradiente en el entorno, la tensión en el punto de interés debe compararse con la resistencia local del material. Esta misma situación puede extrapolarse a una geometría unidimensional, cuando en la superficie se tienen muescas, que generan una distribución particular de las tensiones (no lineal) y que clásicamente se denomina concentración de tensiones. Se está en presencia de las denominadas tensiones locales, que usualmente se obtienen afectando las tensiones nominales por los citados coeficientes de concentración de tensiones.

Según FKM las tensiones locales, comprende los picos resultantes de muescas geométricas. Para el caso de ser posible la definición de una sección de referencia, las mismas pueden ser obtenidas multiplicando la tensión nominal por el coeficiente de concentración de tensiones. Las tensiones locales son calculadas basadas en un modelo lineal elástico del material. Usualmente, las determinaciones son realizadas basadas en el método de elementos finitos, empleando modelos sólidos, en el cual se refleja en la distribución de tensiones, la influencia de la geometría en forma real. Resulta determinante el estado de tensión en el punto de referencia y en su entorno.

Generalmente los puntos críticos están localizados en la superficie. Sin una carga externa en el mismo, el estado de tensión del componente es plano, como puede observarse en la Figura 1.

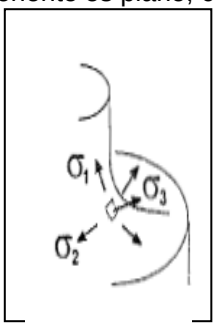


Figura 1: Tensiones Locales.

Para el caso de tensiones locales, con una distribución no homogénea de las tensiones, el desafío es hacer una mejor utilización de la capacidad de carga del material una vez que el límite elástico es superado y hasta el límite de deformación plástica admitido o crítica.

3. DESARROLLO

3.1. Estados simples de tensiones

Un caso típico en el cálculo de elementos de máquinas es el correspondiente a ejes (preponderancia de solicitaciones por flexión). En el pre-dimensionamiento, los mismos se representan por cilindros regulares, con la imposición de determinadas cargas y condiciones de

ISBN: 978-987-1676-63-7

vínculo. Con el objetivo de determinar un diámetro de referencia, se procede a realizar el análisis de cuerpo libre, determinado los diagramas de solicitaciones, y el de tensiones correspondientes. En la Figura 2, puede observarse un elemento sometido a flexión, con la distribución de tensiones normales en una sección típica. Focalizando la atención en la sección crítica, con el momento flector y una tensión admisible o de proyecto [2] se determina el valor del diámetro necesario.

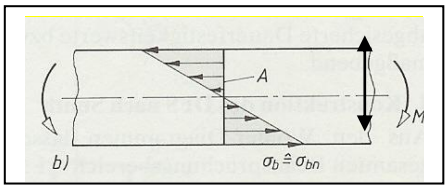


Figura 2: Distribución de tensiones normales por flexión

Un aspecto de interés y relevante en este caso, es la determinación de la tensión admisible. Seleccionado el material, resulta típico el empleo en elementos de máquinas (ejes) de aceros con un comportamiento dúctil, resulta usual tomar como referencia, las resistencias a la rotura y de fluencia, obtenidos conforme a normas en un ensayo de tracción. La tensión admisible o de proyecto se obtiene afectando, dado el caso, la tensión de fluencia o al denominado límite “0.2” por un denominado coeficiente de seguridad, que tienen en cuenta las incertidumbres asociadas con las cargas, las propiedades mecánicas reales del material de la pieza base, condiciones del entorno en el cual se empleará el elemento, criticidad de una eventual falla, el modelo analítico para la determinación de las tensiones, entre otros. Respecto al modelo analítico representativo señalado, solo a título de referencia, si el modelo es muy burdo, el factor de seguridad puede ser superior a tres, como usualmente lo plantean varios autores.

Independientemente de lo señalado, que se presenta como una práctica habitual, se desea alertar sobre dos aspectos entre otros, no contemplados en las condiciones de resistencia, y que son el tamaño de la pieza, y la distribución de tensiones en la sección de referencia.

Un aspecto trascendente en el cálculo de elementos de máquinas con una geometría en particular, es la determinación de la resistencia real del material del elemento en puntos de interés, en correspondencia con un cuadro de solicitaciones dado. Para caracterizar la resistencia a la tracción de un material, por ejemplo, acero, los valores de fluencia y de rotura se obtienen a partir de una probeta redonda pulida, sin muescas, y con un diámetro especificado. También se tienen valores estándar de dicha resistencia para productos semi-terminados. La resistencia efectiva del material en cuestión en un elemento de máquina determinado, estará relacionado con lo que se denomina el diámetro efectivo resultante de la geometría y dimensiones reales de dicho componente, a partir del valor estándar obtenidos de tabla, considerando la misma probabilidad de supervivencia.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como lo plantea FKM, la resistencia real señalada, se obtiene con el empleo de factores denominados de anisotropía y tecnológicos de tamaño. Estos toman en consideración, el decremento de la resistencia del material, usualmente detectado con el aumento de las dimensiones del componente.

A título referencial [1] para un acero 41 Cr4 en concordancia con la norma DIN EN 10083, en condiciones de templado y revenido, sus propiedades son para un diámetro de referencia de 16 mm: Deformación de rotura A= 11%; Resistencia Máxima σ_R= 1000 MPa; Tensión de fluencia σ_{fl}= 800 MPa. Conforme a FKM las resistencias corregidas para un diámetro de referencia del elemento de máquina evaluado de 42 mm son: $\sigma_{R'}$= 895 MPa y $\sigma_{fl'}$= 672 Mpa. Las reducciones de las resistencias son de 10.5 y 16% respectivamente.

El otro aspecto de interés, que también merita la debida atención, y que se plantea en el ejemplo de pre-dimensionamiento de ejes, es que se cotejan tensiones normales por flexión con la resistencia del material representativa está asociada a un comportamiento a la tracción. Según algunos autores, para un mismo acero se presentan casos donde la tensión de fluencia por flexión es de hasta cuarenta por ciento superior a la tensión de tracción para el mismo estado [3]. Debe señalarse que el comportamiento diferencial en cuanto a la resistencia a la fluencia de un material para ambos tipos de solicitaciones en cuestión, está directamente relacionado con el gradiente de tensiones en la zona más crítica.

Si bien no es usual disponer de estos valores específicos de tensión de fluencia por flexión, hay coeficientes como los expuestos, que permiten hacer los ajustes correspondientes. La diferencia es significativa. No es habitual hacer mención a ella, durante la enseñanza en las escuelas de ingeniería. También en numerosa bibliografía de uso corriente no se plantea la situación. La paradoja es que, en sintonía con lo señalado, por las incertidumbres en relación a la información disponible, se emplea un coeficiente de seguridad “generoso”, “conservador”, el cual en los hechos se estaría incrementando en un treinta ciento por condiciones de resistencia.

Lo señalado y contextualizado precedentemente, se presenta generalmente en el “aula de formación de ingenieros” sin una referencia taxativa, como simplificaciones de hecho, cubiertas por el coeficiente de seguridad, y que resulta muy funcionales en etapas tempranas de cálculo, pero que adquieren el status de impropias, si el alumno las proyecta inconscientemente, como ocurre frecuentemente, hacia etapas siguientes de diseño. Resulta conducente en las etapas finales del proceso de diseño, propender a la optimización. La replicación en estas últimas instancias de cálculo-verificación, de lo actuado en materia de resistencia real implica la existencia de coeficientes de seguridad no apropiados. Se entiende que lo expuesto, debe ser convenientemente presentado al alumno, y alertado en tiempo y forma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Lo planteado adquiere un matiz más complejo si aparece la combinación de tensiones normales por tracción y flexión. En este caso vale lo señalado, que en la resistencia resultan importantes tanto el valor máximo como el gradiente de tensiones en el entorno próximo.

3.2. Tensiones en piezas con geometría compleja

Resulta relevante la distribución de tensiones en la zona de interés (máxima tensión). En este sentido piezas con una geometría general recta, con muescas en la superficie, generan una distribución de tensiones no lineal, como se puede apreciar en la Figura 3 [3] conforme a la aplicación de métodos fotoelásticos o numéricos.

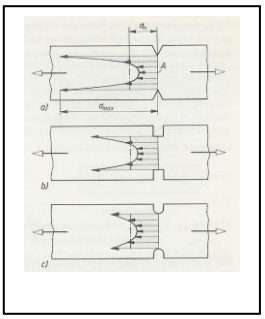


Figura. 3: Concentradores de Tensiones

Para el caso de cargas estáticas las tensiones máximas se determinan usualmente, multiplicando la tensión nominal por tracción, por el denominado coeficiente de concentración de tensiones teórico. Para materiales dúctiles, es usual emplear el denominado coeficiente de concentración de tensiones efectivo. La práctica señalada se fundamenta en que el alto nivel de tensiones teórico, queda limitado por la tensión de fluencia. No obstante, sobre el particular, debe señalarse como se presenta en la Figura 4 para un acero dúctil, que, si bien la sección mínima es la misma, por cuestiones geométricas el comportamiento del material es completamente diferente, muy condicionado por la geometría superficial.

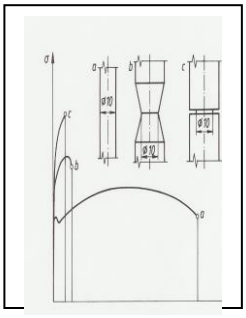


Figura 4: Comportamiento del material en función de la geometría.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Conforme a lo señalado, aparecería como impropio para cargas estáticas, relacionar las tensiones reales en correspondencia con el concentrador de tensiones, con la tensión de fluencia del material. No obstante, debe señalarse que no es usual disponer de las propiedades del material para los casos “b” y “c”. La práctica de comparar con la tensión de fluencia, se constituye en una simplificación, que usualmente se aplica en estos casos, promovida en los procesos de enseñanza, pero entendiendo que rutinariamente no son adecuadamente presentados al alumno.

3.3. Geometrías complejas y estados combinados de tensiones

Es usual aplicar las denominadas hipótesis de rotura o falla elástica. En las mismas a título de ejemplo, para el caso de la hipótesis de Huber, Mises Hencky (trabajo interno específico de distorsión), con tensiones normales generadas para una situación tipo por efectos de tracción y flexión, y tangenciales por corte y torsión, se determina los que se denomina una tensión reducida (equivalente), que se compara usualmente con la tensión de fluencia, obtenida en un ensayo de tracción simple, que se asume como la condición de falla.

Para el caso de geometrías del tipo bi y tridimensionales, para la determinación de los estados tensionales y deformación, es habitual recurrir al método de Elementos Finitos. Con la utilización de software, dada la geometría de la pieza a analizar, se realiza en forma automática la discretización correspondiente, para luego imponer las restricciones o condiciones de vínculo y las correspondientes cargas.

La utilización de herramientas CAD (*Computer Aided Design*) y FEM (*Finite Element Method*) permiten abordar problemas complejos desde el punto de vista geométrico, para obtener con mucha precisión, siendo ese el objetivo central, mapas de tensiones y deformaciones. En este contexto, en el marco de coherencia y equilibrio, el desafío es determinar con la misma precisión las cargas actuantes sobre el sistema, y por el otro las propiedades mecánicas reales del material para el estado tensional obtenido. Cabe puntualizar que, en los casos mas comunes, los mapas de tensiones muestran en general valores bajos de estas, y en forma focalizada, concentrada, tensiones significativamente más altas.

Es corriente el empleo de programas FEM, con comportamiento lineal de los materiales, y donde se relacionan las tensiones reducidas, con la tensión de fluencia del material, obtenida de librerías genéricas, obteniéndose los coeficientes de seguridad. Esta comparación directa se realiza en la mayoría de los casos sin analizar el gradiente de tensiones en el entorno del punto crítico y su influencia en la resistencia del material, como asimismo la dimensión de referencia de la pieza en la zona de interés.

Evaluando lo planteado en el párrafo precedente, surge lo que se puede denominar una inconsistencia manifiesta. Sin considerar la influencia del efecto “tamaño”, se fundamenta lo

ISBN: 978-987-1676-63-7

señalado, en que se está relacionando una tensión de trabajo local, obtenida con herramientas rigurosas, con una tensión límite (falla) no directamente relacionada con las condiciones operativas.

Si bien la práctica usual señalada, se puede considerar como de aplicación sencilla, "práctica", e inclusive enmarcarla en un planteo conservador, dista de tratarse de un procedimiento general ingenieril coherente, conducente, a una optimización del diseño.

Hay componentes de máquinas que deben ser optimizados desde el punto de vista de su masa. En tales casos, el proceso de elaboración de la ingeniería de detalle y las verificaciones estructurales avalatorias, deberían incluir la consideración del comportamiento real del material para los estados de tensiones emergentes.

Sobre el particular, la guía FKM plantea procedimientos prácticos, para permitir hacer uso de la capacidad de carga de reserva del material cuando se superó el límite elástico. El prerrequisito es que en el punto no debe haber una distribución homogénea de tensiones. El límite estará dado por lo que se denomina una deformación plástica crítica local. Para visualizar en forma concreta las diferencias entre el procedimiento habitual y el propuesto por FKM [1], se considera el ejemplo expuesto en la Figura 5.

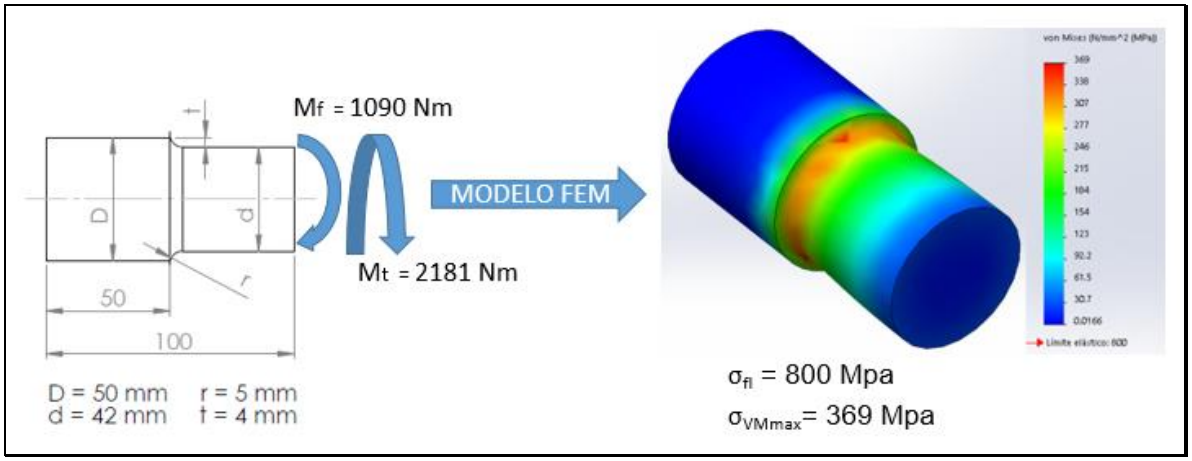


Figura 5: Ejemplo de aplicación referencial

Para un acero 41 Cr4 en concordancia con la norma DIN EN 10083, con una tensión de fluencia σ_{fl}= 800 MPa con la aplicación del método de elementos finitos, se obtiene una tensión reducida máxima de 369 MPa. Con este estado tensional, las condiciones de seguridad serian:

a) **Procedimiento habitual [4]:** Coeficiente de seguridad: 2.17.

b) **Metodología FKM:** La tensión de fluencia del material se corrige por tamaño (d= 42 mm) obteniéndose un valor σ_{fl}'= 672 MPa. De la aplicación de la metodología surge además un

ISBN: 978-987-1676-63-7

factor de sección de resistencia estática Kp=1.95 (admisión de deformaciones plásticas), resultando en una tensión límite crítica local de 1310 MPa. El coeficiente de seguridad emergente es de 3.55.

4. CONCLUSIONES

En el cálculo de elementos de máquinas, es de práctica habitual recurrir a las denominadas hipótesis simplificativas, para ajustar el elemento real a un modelo de cálculo. El tipo y grado de simplificación dependerá de las herramientas de cálculo disponibles, el tiempo, los recursos y las características del problema. No se cuestiona su uso generalizado, incluso por los autores e investigadores más prestigiosos, en las etapas tempranas de cálculo que apuntan a pre-dimensionamientos. Pero si se considera como conducente, la necesidad de alertar al alumno en forma clara sobre estas simplificaciones. De no hacerlo, los mismos por omisión, aplican usualmente la misma estrategia, en las denominadas verificaciones rigurosas, empleando por ejemplo el cálculo por elementos finitos para las determinaciones tensionales.

Para geometrías complejas y estados combinados de tensiones, es usual aplicar hipótesis de falla, donde se compara las tensiones reducidas máximas con la tensión de fluencia. Sin embargo, tal lo considerado por FKM, la presencia de estados tensionales con gradientes significativos influye fuertemente la resistencia del material como se ve en el ejemplo de la Figura 5.

Lo planteado precedentemente se visualiza como un desequilibrio manifiesto; emplear herramientas FEM para determinar la distribución de tensión y luego acudir a simplificaciones significativas en cuanto a la fijación de las resistencias del material para estados tensionales complejos. Estas simplificaciones, consideramos que son producto de inconsistencias u omisiones que tienen su génesis en el proceso de formación de los ingenieros mecánicos.

Con el objetivo de optimizar un diseño para obtener una apropiada y rigurosa relación entre tensiones actuantes y resistencias, se debería optar por la determinación de tensiones de trabajo locales (por ejemplo, aplicación de herramientas FEM) y la correspondiente resistencia local, en función de la geometría, dimensiones y gradiente tensional.

5. REFERENCIAS

[1] FKM Guideline. Analytical Strenght Assessment of Components, 6th Edition, Forschungskuratorium Maschinenbau. 2012

[2] Ullman D., *The Mechanical Design Process,* Fourth Edition, Mc Graw Hill, Estados Unidos, 2010.

[3] Matek W., Muhs D., Jannasch D., Vossiek J. *Roloff/Matek Maschinenelemente*. Vieweg, República Checa, 2007.

[4] Budynas R., Nisbett, K., Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Octava Edición, Mc Graw Hill, 2008.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

AUDITORÍAS INTERNAS: DESDE UN REQUISITO FORMAL HACIA UNA HERRAMIENTA DE FORMACIÓN PARA LA CALIDAD.

Juan B. Monge, Carlos M. Vaca, José L. Pincini
Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto,
Ruta Nac. 36 - Km. 601 - Código Postal X5804BYA - Río Cuarto - Córdoba - Argentina,
jmonge@ing.unrc.edu.ar, cvaca@ing.unrc.edu.ar, jpincini@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo muestra la relación entre la auditoría como un proceso de evaluación y su influencia en el proceso de aprendizaje que sigue un laboratorio universitario en cuanto a su sistema de gestión de la calidad. Se analiza la función pedagógica de la evaluación y su analogía con la auditoría de calidad y el aprendizaje en una organización. A través de una experiencia de auditoría interna diseñada con características particulares se muestran aspectos favorables de este tipo de evaluación. Como metodología se siguen las orientaciones sugeridas desde la investigación educativa para generar un contexto beneficioso para el aprendizaje.

Concluimos que si se presta especial atención a ciertos aspecto en el desarrollo de una auditoría interna, la misma contribuye de manera sustancial al aprendizaje del sistema de gestión de la calidad, con aportes interesantes en relación a la formación y entrenamiento de los integrantes del laboratorio.

Palabras Claves: *Auditoría, calidad, formación, aprendizaje, pedagogía.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de gestión de la calidad basados en normas internacionales -ISO 9001, ISO-IEC 17025, ISO 15189- establecen entre sus requisitos la necesidad específica de formación, capacitación y entrenamiento del personal.

Uno de esos estándares, la norma ISO 17025 [1], establece que las acciones de capacitación deben ser evaluadas en cuanto a su eficacia. Si bien existen algunas experiencias de evaluación de la capacitación utilizando modelos [2], otros autores consideran como un medio de evaluar la eficacia de la capacitación a las auditorías .Las auditorías de calidad constituyen uno de los elementos esenciales del proceso de mejora continua de un sistema de gestión de calidad y buscan comparar la realidad con un modelo de referencia o criterios de auditoría, por ejemplo una norma [3].

Según la normalización internacional, una auditoría es un proceso sistemático, independiente, y documentado para obtener evidencias de la auditoría y evaluarlas de manera objetiva con el fin de determinar el grado en que se cumplen los criterios de auditoría [4].

Las auditorías internas –continúa la norma- denominadas en algunos casos auditorías de primera parte, se realizan por la propia organización, o en su nombre, para la revisión por la dirección de las actividades planificadas y desarrolladas y para otros propósitos internos. Entre estos propósitos podemos citar la adecuación del sistema documental a los requisitos, la comprobación de la implementación del sistema, la verificación de los requisitos reglamentarios y legales, la verificación de que el sistema es conocido y comprendido por los integrantes de la organización o área auditada, entre otros.

Adicionalmente, algunos autores [5] sugieren la utilidad de las auditorías internas como preparación para auditorías externas. Esta preparación, podemos interpretarla como un acercamiento del sistema de gestión de la organización al modelo de referencia. También el entrenamiento del personal auditado respecto del proceso de auditoría y el conocimiento más profundo del sistema de gestión de la organización que aquellos alcanzan puede visualizarse de utilidad.

Si bien de acuerdo con la definición de auditoría, entre sus objetivos no está la faceta de formación, creemos que la actividad desarrollada en la auditoría –una evaluación- puede tener efectos sobre el aprendizaje individual y organizacional de un laboratorio.

La norma de auditorías, establece que los auditores deben ser independientes de la actividad que se audita, es decir que el personal que realiza las auditorías no debería participar en la asesoría para la implantación de un SGC, sin embargo, para organizaciones pequeñas la norma admite la imposibilidad de ser, los auditores, completamente independientes, siempre que se fomente la objetividad.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por tanto, podemos pensar en la auditoría interna como una herramienta valiosa para aquellos asesores o tutores que orientan en la implementación de estos sistemas en un laboratorio universitario.

Pero entonces cabría preguntarnos, en la instancia de una auditoría ¿estamos evaluando o estamos capacitando?

1.1 Función social y función pedagógica de la evaluación

Algunos trabajos de las ciencias de la educación [6], señalan una doble función en la evaluación de los aprendizajes, la función social que es aquella que ejerce control social en el sistema educativo y la función pedagógica la cual refiere a la regulación del proceso de enseñanza y de aprendizaje que posibilita en el marco del desarrollo curricular.

Las visiones más actuales sobre evaluación hablan de la necesidad de diseñar contextos de evaluación capaces de brindar al docente información clara y detallada del proceso de aprendizaje.

La evaluación es considerada así como una herramienta al servicio de los docentes y de los alumnos, revalorizándose su función pedagógica [7].

En relación a las auditorías, es clara la función social de las mismas en tanto mediante una evaluación se buscan evidencias objetivas para poder asegurar el cumplimiento de requisitos establecidos en normas y poder certificar, reconocer o acreditar tal situación según corresponda. Sin embargo la función pedagógica, no está reconocida formalmente ni tampoco se visualiza como elemento de influencia en la capacitación del personal de un laboratorio. La auditoría se presenta habitualmente como un elemento de control [8]. Una auditoría puede ser de certificación, de un sistema de gestión de la calidad según ISO 9001 por ejemplo; de reconocimiento, de un sistema de gestión de acuerdo al Protocolo de Niveles del Sistema UNILAB; o de acreditación, según sea un sistema de gestión y técnico que cumpla con los requisitos de la norma ISO-IEC 17025 y evaluado por el Organismo Argentino de Acreditación.

En el área de investigación educativa [9] proponen potenciar logros en estudiantes universitarios mediante el diseño de contextos de evaluación adecuados.

En este trabajo proponemos estudiar la relación entre el desarrollo de una auditoría interna y el aprendizaje de una organización –laboratorio de ensayo universitario- en el diseño y la implementación de un sistema de gestión de calidad.

2. METODOLOGÍA

En el desarrollo de la presente experiencia se han considerado algunas de las orientaciones sugeridas por [9] para el diseño de un contexto de evaluación beneficioso. Entre ellas podemos

ISBN: 978-987-1676-63-7

mencionar la anticipación de criterios, la actitud del evaluador, la aclaración de aspectos y preguntas, instancias de feedback, entre otros.

Para lograr recopilar las percepciones del personal auditado –Responsable de Calidad y Responsable Técnico- se realizó una entrevista semiestructurada mediante la cual se indaga sobre diferentes aspectos relacionados con el contexto de la evaluación-auditoría. Se elaboraron catorce preguntas clasificadas en cinco categorías, a saber: Nivel de dificultad, valor de utilidad, criterios de evaluación, resultados obtenidos, entorno de evaluación.

En nuestro trabajo la auditoría se concibe en dos partes. Una primera parte llamada de *Lectura* y otra parte de verificación en las instalaciones del laboratorio denominada de *Preguntas.*

La primera parte, consiste en la entrega de un cuestionario –con características de autoevaluación- que recibe el personal auditado, para leer, analizar y discutir en el seno de su laboratorio. La evaluación de las respuestas se planifica para una fecha determinada en la cual, reunidos el grupo auditor y los miembros representantes del laboratorio se tratan las respuestas elaboradas.

La segunda parte, es llevada adelante por el grupo auditor en el laboratorio. Allí se desarrolla un Protocolo de evaluación que consiste en una lista de verificación –check list- que contempla preguntas guía para el auditor. Esta parte de la auditoría podría considerarse equivalente a una auditoría tradicional.

La finalidad, en suma, es posibilitar que los integrantes del laboratorio vinculen el contenido del Manual de la Calidad y los procedimientos documentados con los requisitos de la norma de referencia con el objeto de comprender y relacionar cabalmente los elementos del Sistema de Gestión de la Calidad implementado. Por otro lado, se pretende también fomentar un entrenamiento con vistas a la auditoría formal de evaluación del Sistema UNILAB. Cabe aclarar que UNILAB es un sistema que contempla el Reconocimiento de laboratorios universitarios de acuerdo a un Protocolo de Niveles cuyo marco de referencia es la Norma IRAM 301:2005-ISO/IEC 17025:2005 “Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Calibración y Ensayo”. El reconocimiento de UNILAB no reemplaza la acreditación propiamente dicha del laboratorio ya que dicha función la desempeña el Organismo Argentino de Acreditación (OAA), según lo establece el Sistema Nacional de Normas, Calidad y Certificación, creado por Decreto 1474/94 y sus modificatorias.

Aquí se plantean las primeras impresiones y desafíos y expectativas en cuanto al desarrollo de una auditoría de tercera parte –la realizada por un organismo independiente. Se busca familiarizar al personal del laboratorio con esta valiosa herramienta de la cultura de la calidad, como lo es la auditoría.

2.1 Preparación de la Primera parte

Para elaborar el cuestionario a utilizar en la primera parte –de Lectura-, el equipo auditor tuvo en cuenta aquellos requisitos del Protocolo de Evaluación del Sistema UNILAB que implicaban detalles de la documentación y que por practicidad no se incluirían en el check list de la segunda parte. Se incluyeron 42 preguntas en esta primera instancia.

Algunas de ellas refieren a aspectos específicos del sistema que están presentes en los documentos, por ejemplo, frecuencias de realización de ciertas actividades, funciones y responsabilidades, características de algunos documentos y registros, existencia de procedimientos, entre otras.

2.1.1 Realización de la primera parte

De acuerdo a lo planificado comienza el desarrollo de esta instancia donde el auditor líder explica la modalidad de la auditoría ante los presentes y anima a la realización de la misma en un ambiente de cordialidad y confianza, haciendo énfasis en la búsqueda de la mejora. Otro integrante del equipo auditor explica las diferencias con una *evaluación* –auditoría- del sistema UNILAB. Además se ofrece a los miembros del laboratorio aclarar cualquier duda o inquietud sobre la modalidad a llevar adelante.

Luego de esta presentación se comienza a analizar y debatir sobre las respuestas brindadas al cuestionario de Lectura. En un ambiente relajado, se buscan coincidencias y se discuten diferencias de modo de reforzar conceptos y definir respuestas.

Nuevamente, el auditor anima al grupo respecto del criterio de evaluación. Esta vez lo hace en relación a las características de los evaluadores (pares universitarios) del Sistema UNILAB.

En algunas oportunidades, durante el tratamiento de las respuestas, se recurre a la lectura de un punto de la norma de referencia, en un intento de ejercicio de discusión en relación al texto de la misma.

Finalmente se cierra esta instancia, con una síntesis de lo trabajado y de la modalidad desarrollada.

2.2 Preparación de la Segunda parte

La elaboración de la lista de verificación para esta instancia se hizo considerando 50 preguntas del Protocolo de Evaluación del Sistema UNILAB [10].

En esta parte se persigue a través de la indagación directa, en las instalaciones del laboratorio, encontrar evidencias más amplias de que la documentación –correspondiente al Nivel Inicial- ha sido comprendida e implementada. Por lo tanto las preguntas están orientadas a indagar sobre aspectos claves de los requisitos. Ejemplos de ellas son las que hacen referencia a confidencialidad, aspectos operativos del control de los documentos y de los registros,

subcontratación de ensayos, tratamientos de reclamos de clientes, control de los instrumentos y equipos, tratamiento de los informes de ensayos, entre otras.

2.2.1 Realización de la segunda parte

Para la ejecución de la auditoría en esta segunda parte se sigue lo establecido en el procedimiento de gestión establecido por el laboratorio.

El auditor líder comienza esta parte con una breve presentación de la actividad y los criterios. Como una actividad inicial se solicita una recorrida por las instalaciones del laboratorio.

Luego de la misma comienza la evaluación de los aspectos contemplados en el protocolo.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS

En función de las orientaciones aplicadas para lograr un contexto de evaluación beneficioso, debemos destacar que algunas de ellas forman parte de la diagramación misma de una auditoría por ejemplo la instancia de feedback o realimentación, que se encuentra en la etapa de reunión de cierre y en la entrega del informe de auditoría. Otro aspecto a considerar es aquel que tiene relación con la actitud del evaluador, es requisito del personal que realiza auditorías poseer cualidades humanas de comunicación, amabilidad, escucha etc. por lo cual, desde nuestra visión, el factor humano del evaluador auditor interno es de suma importancia en el análisis del aspecto pedagógico.

Por otro lado y considerando el diseño de la auditoría en dos partes, es interesante destacar la predisposición lograda por los miembros auditados en la primera para enfrentar con más eficacia la segunda.

En relación a las percepciones del personal que participó de la auditoría, se observa que el nivel de dificultad de la auditoría resulta adecuado y con cierta exigencia, estando de acuerdo a las expectativas previas. También se argumenta que la ausencia del cuestionario previo –de lectura- hubiese significado un nivel mayor de dificultad.

Respecto del valor de utilidad de la auditoría los entrevistados manifiestan que aportó confianza en el desarrollo de las distintas actividades. Además, esta evaluación ayudó a reforzar la interpretación de la norma, ampliando la visión que tenían de un sistema de gestión de la calidad. Paralelamente permitió reconocer la importancia que tienen las personas en el desarrollo de estos sistemas. Consideraron a los procedimientos como elementos de mejora ya que permitieron a través de su elaboración, el ordenamiento y organización de las actividades. Creemos que el concepto de mejora reflejado en la respuesta es de alguna manera incipiente, por lo cual consideramos necesario trabajar sobre el concepto y la metodología para alcanzar metas en este sentido.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En lo concerniente a los criterios de corrección o evaluación que se tuvieron en cuenta, las entrevistas revelan que desconocían tales criterios, presuponían un nivel de detalle más general al solicitado.

Las apreciaciones de los entrevistados respecto del resultado obtenido en la auditoría interna muestran satisfacción en cuanto al resultado obtenido. Reconocen la necesidad de una periodicidad en la realización de las evaluaciones, para lograr avances sostenidos en el tiempo. La expresión del resultado de la auditoría en términos de no conformidades, observaciones, aspectos favorables y aspectos para la mejora, resulta preferible a otro tipo de valoración ya que permite identificar de manera fehaciente lo que es necesario corregir. Se percibe como una forma más objetiva de expresar el resultado.

Si consideramos como entorno de evaluación a la anticipación de la fecha de realización de auditoría, los tiempos asignados a cada etapa, las aclaraciones a las preguntas propuestas, el personal evaluado lo reconoce satisfactorio.

Cuando se les consultó sobre cuál fue su percepción respecto del ambiente de la evaluación, coincidieron en que el inicio fue algo tenso, aunque luego más distendido. La pausa establecida contribuyó a un buen desarrollo y mejor ambiente.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a la experiencia realizada creemos que los aspectos que se consideran favorables para el diseño de situaciones de evaluación beneficiosas para los aprendizajes, también lo son para lograr un contexto capaz de promover el aprendizaje de la calidad en una instancia de evaluación mediante una auditoría interna en un laboratorio universitario.

El hecho de percibir como adecuado el nivel de evaluación, la utilidad que perciben de la aplicación del proceso de auditoría, el considerar satisfactorio el resultado obtenido, además de un entorno de evaluación distendido y muy tranquilo creemos contribuye para lograr un aprendizaje.

De acuerdo a la experiencia realizada, es nuestra intención proponer algunas consideraciones acerca de la auditoría en relación a su dimensión pedagógica. En este sentido, pensamos en los aportes que puede hacer una auditoría interna, con respecto a la formación y entrenamiento en calidad de los integrantes de un laboratorio universitario de ensayo. Esto es, en consonancia con (Coll et al., 2007) migrar de una evaluación del aprendizaje hacia una evaluación para el aprendizaje.

Una auditoría interna puede constituirse en un elemento clave para aprendizaje del sistema si se presta especial atención a:

- Las cualidades del equipo auditor
- La diagramación de las actividades en la ejecución de las auditorías

ISBN: 978-987-1676-63-7

- La explicitación de criterios de evaluación
- Una cuidadosa retroalimentación en la reunión de cierre
- La actitud del auditado en relación al provecho potencial que puede brindar una auditoria.
- La utilización de la auditoría interna como herramienta de mejora.

Los laboratorios universitarios que pretenden estar a la altura de los estándares internacionales de calidad, reconocerán en las auditorías internas una herramienta efectiva para esta tarea. Creemos que instrumentarlas adecuadamente puede impulsar el aprendizaje de las organizaciones para su crecimiento en la calidad.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IRAM 301 - ISO/IEC 17025. *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 2005.

[2] Monge, J.; Pincini J.; Vaca, C. *Evaluación del Impacto de la Capacitación en el Proceso de Implementación de un Sistema de Gestión de Calidad en un Laboratorio Universitario.* XXXVIII Jornadas IRAM-Universidades, XXV Foro UNILAB. Universidad Nacional de Santiago del Estero. ISSN 1852-5075. 17 y 18 de Octubre de 2013. Santiago del Estero.

[3] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET-Fundación Madri+d. *Gestión de la Calidad para laboratorios de ensayos.* Juan Pablo Grammatico y Laureano Cuevas Editores. Buenos Aires. 2001.

[4] IRAM-ISO 19011:2012. *Directrices para la auditoría de los sistemas de gestión. Segunda Edición. Buenos Aires.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM; International Organization for Standardization ISO. 2012

[5] Huber, Ludwig. *Conocimiento e implantación de la norma ISO/IEC 17025*. Agilent Technologies. Estados Unidos. 2009.

[6] Coll, C. S.; Barberá, E y Onrubia, J. *La atención a la diversidad en las prácticas de evaluación.* Infancia y Aprendizaje. 90: 111-132. 2000.

[7] Coll, C. S.; Rochera, M. J.; Mayordomo, R. M. y Naranjo, M. *Evaluación continua y ayuda al aprendizaje, análisis de una experiencia de innovación en educación superior con el apoyo de las TIC.* Revista electrónica de investigación psicoeducativa, 13 (5): 783-804. 2007.

[8] D'Ottone Clemenco, Enrique. *Introducción a la Auditoría Interna de los Sistemas de Gestión ISO 9001:2008.* Publicado bajo licencia Creative Commons by-nd. 2009.

Recuperado el 4 de Agosto de 2015, de http://www.gestion-calidad.com/archivos%20web/manual-auditoria-interna.pdf

[9] Vaja, A.; Paoloni, P.; Corteggiano, F.; Gioda, M. *Contexto de evaluación en clases de ingeniería. Aportes para favorecer el desempeño de los estudiantes.* Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería. Año 4. Nº 8. pp. 25-32. 2015

[10] UNILAB. *Protocolo de Niveles. P-B.1/C, P-B.1/B, P-B.1/A. Rev. 8*. Buenos Aires. 2007.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

VERIFICACION PRÁCTICA DEL MOVIMIENTO DE UN BRAZO ROBÓTICO. VINCULACION ENTRE ANALISIS MATEMÁTICO II Y LA MECATRONICA

Riccomi Humberto[1], Sacco Lucia[2], Schivo María Elena[3], Ramb Jeremías[4], Del Pozo Matías[5]

[1-2-3-4-5]Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Nicolás
Colón 332 – (2900) San Nicolás – Pcia. de Buenos Aires.
Info@frsn.utn.edu.ar
[1]hriccomi@peeirr.com.ar , [2]lcsacco@gmail.com, [3]meschivo@arnet.com.ar
[4]jeremias.ramb@outlook.com, [5]matias_delpozo@outlook.com

RESUMEN

La cátedra de Análisis Matemático II de la Facultad Regional San Nicolás, dependiente de la Universidad Tecnológica Nacional, sostiene que los alumnos al ingresar a la Universidad así como en los primeros años de su formación universitaria, presentan serias carencias en sus conocimientos básicos, falta de motivación para el aprendizaje y, en algunas oportunidades un desarrollo deficiente de habilidades de resolución de problemas, razonamiento crítico y reflexión creativa. Este pensamiento nos ha llevado, incansablemente, a intentar entender el porqué de estas características, a fin de favorecer la construcción del conocimiento en los alumnos. A partir de ello, la planificación de la asignatura, para las distintas especialidades, se ha pensado en torno a distintas estrategias didácticas, repensando prácticas docentes y caminos pedagógicos que permitan al futuro egresado formarse en un contexto acorde a su próxima especialización.

En este contexto, en el 2012 se adoptó como estrategia didáctica el Trabajo por Proyectos con un grupo pequeño de estudiantes, en torno a la modelización y el estudio teórico de los movimientos de un brazo robótico de tres grados de libertad, a través de la utilización de las fórmulas de Frenet cuyos resultados fueron presentados en el III CAIM 2012.

Durante el año 2015, a partir de la iniciativa de dos alumnos que cursaban la asignatura, quienes se interesaron en la propuesta antes mencionada, se continuó trabajando en dicho problema.

Este trabajo presenta el desarrollo del brazo robótico descripto en el trabajo de referencia, realizado a partir del uso de 3 servomotores y una plataforma de hardware libre (Arduino) basada en una placa con un microcontrolador. Si bien el resultado obtenido es sólo una verificación práctica del modelo matemático presentado, sirve como un primer paso en la validación de la modelización del movimiento del brazo robótico en estudio.

Palabras Claves: *Motivación. Investigación. Modelización. Verificación. Curvas en el espacio.*

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento y la aplicación de los contenidos de una disciplina para resolver problemas prácticos o desarrollar proyectos, es un aprendizaje necesario para los alumnos de carreras de Ingeniería.

Los docentes de la cátedra de Análisis Matemático II de la Facultad Regional San Nicolás, Universidad Tecnológica Nacional, consideran que una de las formas más completas para promover la capacidad de resolver problemas, en los estudiantes de carreras de ingeniería, es el trabajo por proyectos. Cuando se habla de proyecto se hace referencia a la sistematización de actividades y recursos que deben realizarse a fin de producir ya sea bienes o servicios que son capaces de satisfacer necesidades o bien de resolver problemas [4]. La importancia de esta metodología radica en que el alumno aprende haciendo, involucrándose y comprometiéndose.

Este trabajo presenta los resultados del trabajo de estudiantes y docentes de Análisis Matemático II durante el 2015, interesados en la continuidad del proyecto vinculado al movimiento del brazo de robot modelizado en el año 2012.

1.1. El método de proyectos

El método de proyectos emerge de una visión de la educación en la cual los estudiantes toman la responsabilidad de su propio aprendizaje y en donde aplican, en proyectos reales, las habilidades y conocimientos adquiridos en el salón de clases. Es por ello que esta estrategia didáctica implica una organización de las prácticas docentes que lleven a enfrentar a los estudiantes a experiencias de aprendizaje que los lleve a rescatar, comprender y aplicar aquello que se les ha enseñado como una herramienta para resolver un problema [5].

Un buen proyecto es aquel que permite a los estudiantes estimular habilidades académicas, sociales y de tipo personal, como el manejo de información necesaria para resolver el problema, formular y responder preguntas, aprender a manejar y usar recursos de los que disponen como el tiempo y los materiales, entre otras.

El trabajar con proyectos puede cambiar las relaciones entre los docentes y los estudiantes. Puede también reducir la competencia entre los alumnos y permitir a éstos colaborar entre sí. Además, los proyectos permiten cambiar el enfoque del aprendizaje ya que los puede llevar de la simple memorización de hechos, a la exploración de ideas.

Existen algunas características que facilitan el manejo del método de proyectos [6]:

1. Un planteamiento que se basa en un problema real y que involucra distintas áreas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. Oportunidades para que los estudiantes realicen investigaciones que les permitan aprender nuevos conceptos, aplicar la información y representar su conocimiento de diversas formas.
3. Colaboración entre los estudiantes, docentes y otras personas involucradas con el fin de que el conocimiento sea compartido y distribuido entre los miembros de la "comunidad de aprendizaje".
4. El uso de herramientas cognitivas y ambientes de aprendizaje que motiven al estudiante a representar sus ideas. Estas herramientas pueden ser: laboratorios computacionales, hipermedios, aplicaciones gráficas y telecomunicaciones.

Es importante destacar que los pasos de este método coinciden con las etapas del trabajo profesional del ingeniero: planteo del problema, justificación del proyecto que se llevará a cabo y conceptos esenciales que lo sustentan, formulación de hipótesis de trabajo, experimentación, desarrollo de partes y condiciones para la ejecución.

Conviene tener en cuenta que esta estrategia didáctica presenta dificultades que es necesario tener en cuenta, como son la cantidad de tiempo de instrucción, seguimiento y evaluación.

1.2. La robótica

El inicio de proyectos educativos que incluyen la robótica como recurso de enseñanza y aprendizaje requiere que se planteen en función de las habilidades y desempeños que se pretende que desarrollen los estudiantes. La robótica educativa es propicia para apoyar habilidades productivas, creativas, digitales y comunicativas. La misma involucra a quienes participan en el diseño y construcción de creaciones propias (objetos que poseen cuerpo, control y movimientos), primero mentales y luego físicas, construidas con diferentes materiales y controladas por un computador. "Apropiarse de algo significa hacerlo propio hasta el punto de poder aplicarlo a conveniencia y según los requerimientos y características de situaciones específicas" [7].

Partiendo de esta premisa, una propuesta de trabajo por proyectos que incluya la robótica, implica reconocer cuáles son las habilidades o desempeños que se desean desarrollar, promover o pulir en los estudiantes y a partir de ello, comenzar a trabajar.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. ANTECEDENTES

A continuación se presenta el enunciado del problema incluido en el proyecto del año 2012 y los resultados obtenidos en ese momento, como anticipación de lo realizado durante el año 2015.

2.1. Enunciado del problema

Dado el siguiente brazo robótico (Figura 1), encontrar las ecuaciones que describen el movimiento del punto P con respecto al origen de coordenadas O del sistema básico de referencia (versores i, j y k).

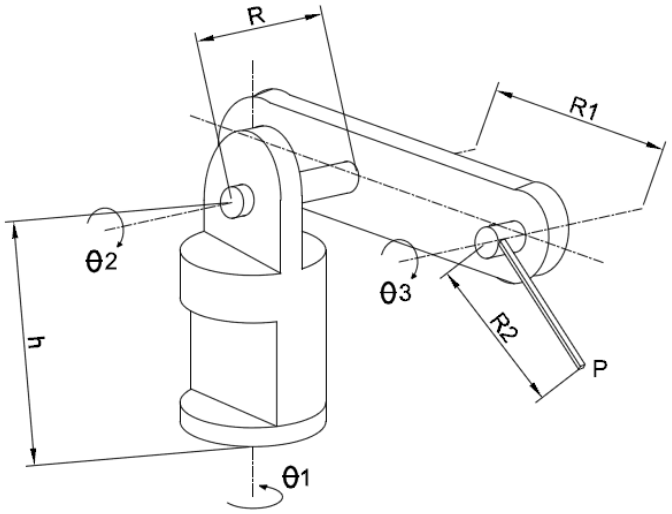


Figura 1: *Brazo robótico de tres grados de libertad*

2.2. Resolución del problema desde Análisis Matemático II

En el trabajo presentado en el CAIM 2012 [1], se encontró la ecuación (1) que describe el movimiento del punto P (efecto final del movimiento del brazo robótico), con respecto al origen de coordenadas O del sistema básico de referencia (versores i, j y k) era:

$$\begin{aligned}\bar{r} = &[R\cdot\cos\theta_1 - R_1\cdot\cos\theta_2 . sen\theta_1 - R_2\cdot sen\theta_1 .\cos(\theta_2+\theta_3)]\,\vec{i} + \\ &[R\cdot sen\theta_1 + R_1\cdot\cos\theta_2 .\cos\theta_1 + R_2\cdot\cos\theta_1 .\cos(\theta_2+\theta_3)]\,\vec{j} + \\ &[h + R_1\cdot sen\theta_2 + R_2\cdot sen(\theta_2+\theta_3)]\,\vec{k}\end{aligned} \quad (1)$$

Dicha modelización se realizó utilizando conceptos desarrollados en Análisis Matemático II como son curvas en el espacio, versores y Triedro de Frenet.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. DESARROLLO

A partir de la presentación de este trabajo en el CAIM 2012 todos los años se muestra el trabajo realizado y se invita a los alumnos a sumarse en la resolución de nuevos desafíos. Uno de ellos, la construcción real del brazo robótico y la programación que permitiera el movimiento del mismo con la introducción del modelo matemático obtenido, empleando herramientas de Análisis Matemático II y su correspondiente verificación. Como segundo desafío, se los invitó a desarrollar el modelo matemático del brazo robótico que cuenta la Facultad Regional San Nicolás, en el grupo GROVA, de 6 grados de libertad.

3.1 Desafío 1

En el año 2015 dos estudiantes regulares que cursaron la asignatura se interesaron por la primera parte de la propuesta y decidieron construir el brazo robótico planteado. Ello implicó la calendarización de algunas actividades y productos esperados en etapas sucesivas, permitiendo a los estudiantes tomar un rol activo al definir el camino y el ritmo que el proyecto pueda tomar.

3.1.1. Primera etapa

La misma se llevó a cabo en los meses de mayo – junio. Los estudiantes expresaron lo que iban a realizar, sus ideas y posibilidades de construcción del brazo robótico. Se les dio libertad para adoptar las dimensiones que más les convinieran dado que el modelo matemático utiliza valores genéricos. Simultáneamente docentes de la cátedra y estudiantes involucrados en el proyecto buscaron el apoyo de los docentes investigadores del grupo GROVA de la Facultad Regional San Nicolás, quienes brindaron los materiales para la construcción del “Jermat” (bautizado así, en honor al nombre de los estudiantes que construyeron el prototipo: Jeremías y Matías).

El mismo se realizó utilizando 3 servomotores RDS3115MG y 1 microcontrolador Arduino UNO para poder controlar los servomotores. El mismo está programado en C++ y se desarrolló un programa que se ejecuta sobre Windows, el cual se comunica con el Arduino a través de una conexión USB. La programación se hizo en lenguaje C# con .NET.

Para la interfaz gráfica se empleó HTML, CSS y JavaScript, lo cual permitió controlar el movimiento del brazo robot desde cualquier dispositivo conectado a la misma red que la PC, con el único requerimiento de contar con un navegador web.

Cabe aclarar que para ejecutar el programa en Windows, es necesario tener instalado las librerías de Microsoft .NET Framework 4.6. El instalador de este programa se encuentra dentro del anexo de software.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La Figura 2 muestra el primer intento, con las siguientes medidas: R = 0mm, h = 100mm, R1 = 112mm y R2 = 86mm.



Figura 2: "*Jermat", primera versión*

3.1.2 Segunda etapa

Durante esta etapa de trabajo, las actividades de los estudiantes consistieron en estudiar y analizar cómo brindar el movimiento respectivo a los servomotores. Ello implicó idas y venidas, aciertos y errores. En un primer momento, al comparar el modelo real con el propuesto se reconoció desde el punto de vista matemático, que al considerar R=0 (simulando el movimiento de articulación de la muñeca) provocaba que para describir ese movimiento se debía recurrir a un campo vectorial (función de 2 variables: ángulos $\theta_1 y \theta_2$) lo que generaba una superficie e invalidaba el modelo, pese a que se verificaba la posición final del extremo del robot (la interpretación matemática de esta situación generó una nueva y futura línea de investigación y desarrollo).

Luego, la programación del movimiento de los servomotores, implicó adoptar un microcontrolador Arduino Uno y la utilización de su librería correspondiente (entorno de desarrollo).

Ello llevó a que la propuesta original sufriera una mutación, rediseñando el brazo robótico considerando un R de 42 mm. Este desarrollo no utilizó el modelo matemático en la programación del movimiento, sino sólo permitió verificar la expresión del modelo matemático obtenido.

La Tabla 1 presenta la posición de los 6 tornillos que se fijaron a la base del dispositivo (mediciones pueden presentar un error de ± 2 mm) y los correspondientes ángulos que verifican:

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1: *Disposición de los tornillos*

	Posición	**Ángulo**
Tornillo 1	$42\vec{i} - 98\vec{j} + 52\vec{k}$	Servo 1: 0°, Servo 2: 160°, Servo 3: 115°
Tornillo 2	$-83\vec{i} + 74\vec{j} + 38\vec{k}$	Servo 1: 206°, Servo 2: 168°,Servo 3: 106°
Tornillo 3	$103\vec{i} + 26\vec{j} + 29\vec{k}$	Servo 1: 81°, Servo 2: 173°,Servo 3: 106°
Tornillo 4	$-6\vec{i} + 66\vec{j} + 12\vec{k}$	Servo 1: 145°, Servo 2: 193°, Servo 3: 120°
Tornillo 5	$-57\vec{i} - 16\vec{j} + 6\vec{k}$	Servo 1: 240°, Servo 2: 200°, Servo 3: 119°
Tornillo 6	$53\vec{i} + 35\vec{j} + 63\vec{k}$ (No verifica por limitaciones físicas de los motores)	Servo 1: 77°, Servo 2: 200°, Servo 3: 119°

La disposición de los tornillos se muestra en la Figura 3.

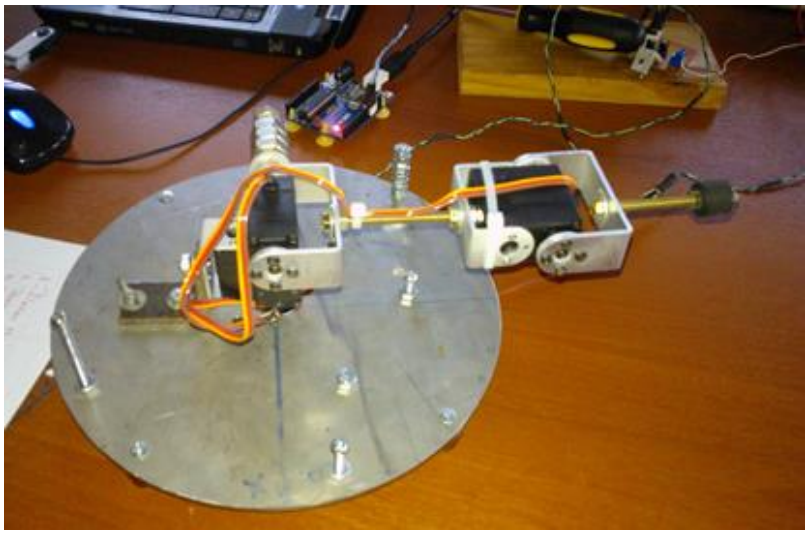


Figura 3: "*Jermat", en su posición inicial*

A modo de ejemplo, se observa el brazo en la posición correspondiente al Tornillo 1 (Figura 4) y la correspondiente captura de pantalla con la expresión matemática que verifica esta posición (Figura 5).

ISBN: 978-987-1676-63-7

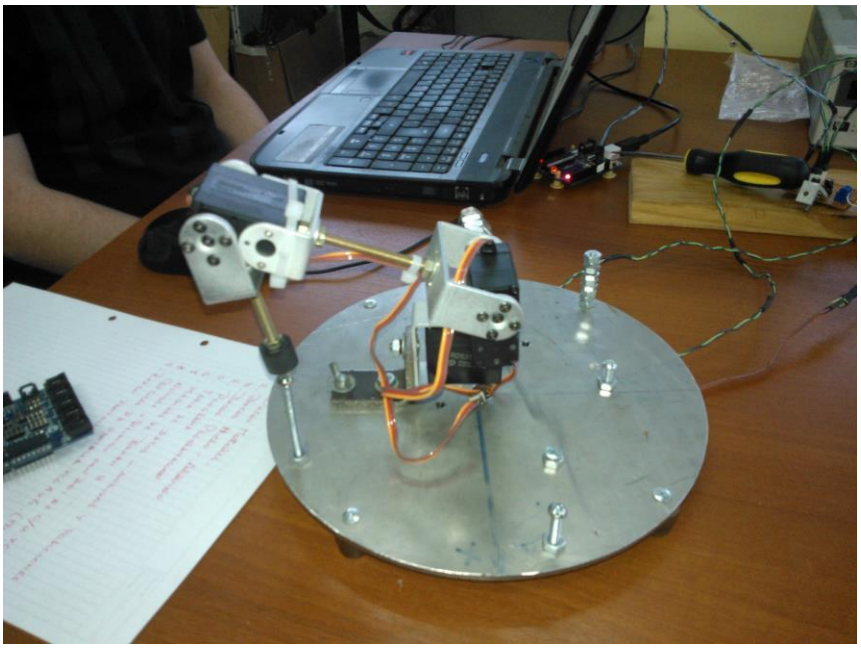


Figura 4: "*Jermat", en posición Tornillo 1*

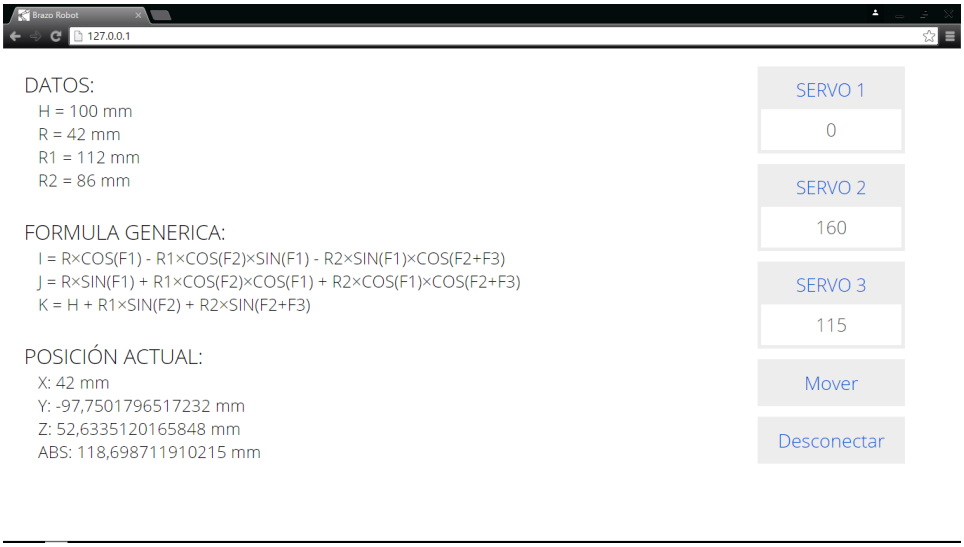


Figura 5: *Captura de pantalla en posición Tornillo 1*

Por último, como cierre de lo realizado durante el año en el proyecto, a pedido del Jefe de Departamento de Electrónica, los estudiantes comunicaron lo realizado en el proyecto a los futuros ingresantes a las carreras de Ingeniería de la Facultad Regional San Nicolás durante el 2016.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.2 Desafío 2

El objetivo de este desafío, llevado a cabo por otro estudiante que cursó Análisis Matemático II durante el 2015, fue encontrar las ecuaciones que describen el movimiento del punto final de un brazo robótico de la compañía ABB, modelo IRR 140, estableciendo los sistemas de referencia en cada articulación del mismo, a través del Triedro de Frenet.

Si bien no se pudo llegar a obtener el resultado final, surgió a medida que se fue desarrollando el problema, consideraciones que permiten seguir trabajando en este desafío. Se observó que la complejidad de las ecuaciones obtenidas, a medida que se iban analizando cada uno de los grados de libertad, justificó la no obtención de la expresión deseada.

4. CONCLUSIONES

El trabajo por proyectos realizado durante el año 2015 permitió a los docentes de la cátedra reflexionar en cuanto a los éxitos y fracasos de su implementación. Se reconoce en futuras aplicaciones de dicha estrategia didáctica, la necesidad de sistematizar el monitoreo de los avances del desafío y delegar responsabilidad a los estudiantes, para detectar problemas, cambiar estrategias y revisar los logros obtenidos.

No cabe duda que esta modalidad de trabajo provocó el acercamiento de los alumnos de los primeros años de la carrera hacia los grupos de investigación que existen en la Facultad Regional San Nicolás lo que se considera muy beneficioso.

Por otra parte, la posibilidad de ejecución física de un modelo teórico planteado en el aula abre una serie de nuevos interrogantes así como nuevos desafíos. Entre ellos, permite analizar desde el punto de vista de esta teoría si las articulaciones presentan una limitación o no al modelo. También sirvió para comprender que lo que se había realizado era una modelización estática del brazo robótico. Se mostró a los alumnos que el hecho de no haber realizado una programación en la que se incluya la expresión algebraica obtenida a partir de la teoría de Frenet no permitió seguir avanzando en el estudio dinámico del movimiento del brazo, como hubiera sido expresar a los ángulos en función del tiempo.

Cómo se puede apreciar, quedan muchos desafíos pendientes que se encararán en una nueva etapa, esperando incorporar a más estudiantes.

5. REFERENCIAS

[1] Riccomi Humberto, Pacini Carina, Sacco Lucía, Desperés Juan Pablo. *"Aportes del Análisis Matemático II a la modelización y estudio del movimiento de brazos robóticos",* Tercer Congreso

Argentino de Ingeniería Mecánica III CAIM 2012. Publicación Trabajo en los Anales III CAIM 2012: ISBN 978-987-1063-94-9.

[2] Stewart, J. (2006). *"Cálculo – Conceptos y contextos".* Tercera edición. Editorial Thomson. Capítulo 10. México.

[3] Muller San Cruz, H. C. (2002). *"Análisis vectorial y Tensorial".* Departamento de Matemáticas, UMSS. Texto guía para las materias de Análisis de Vectorial y Tensorial de la UMSS. Primera edición. Bolivia.

[4] *"El método de proyectos como técnica didáctica".* Las estrategias y técnicas didácticas en el rediseño. Dirección de Investigación y Desarrollo Educativo. Vicerrectoría Académica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Este documento puede ser consultado en http://sitios.itesm.mx/va/dide2/documentos/proyectos.PDF (Consulta Abril 2016).

[5] UTN Rectorado – Secretaría Académica, Mayo 1997. Materias Integradoras. Observaciones y recomendaciones para 1997.

[6] Blumenfeld, P. C., Soloway, E., Marx, R. W., Krajcik, J. S., Guzdial, M., & Palincsar, A. (1991). Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning. Educational Psychologist, 26 (3 & 4).

[7] Perkins, D. (2006). *"Hacia una cultura de pensamiento".* Disponible en http://www.fcpolit.unr.edu.ar/redaccion1/2008/10/14/un-aula-para-pensar/ Buenos Aires. Argentina. (Consulta Abril 2016).

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al ingeniero Martín Fernández, quien está a cargo del grupo GROVA de la Facultad Regional San Nicolás, por prestarnos el equipamiento, las instalaciones y prestarse a las consultas realizadas.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL ÁREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

UTILIZACION DE ESTRATEGIAS DIDACTICAS MEDIADAS POR TECNOLOGÍA EN EL ÁREA DEL CONTROL INDUSTRIAL

Gloria Alzugaray [1], Matías Orué [2], Nicolás Pirog [3] y Rodrigo Agosta [4]

[1,2,3,4] Dpto. de Ing. Mecánica – Fac. Reg. Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional
Lavaisse 610, Santa Fe Ciudad, Argentina
correo-e: galzugar@frsf.utn.edu.ar, morue@frsf.utn.edu.ar, npirog@frsf.utn.edu.ar, rodrigo_agosta@hotmail.com
[2] Dpto. de Ing. Eléctrica – Fac. Reg. Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional
Lavaisse 610, Ciudad de Santa Fe, Argentina
Grupo de Investigación en Enseñanza de la Ingeniería-GIEDI
correo-e: giedi@frsf.utn.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presentan las experiencias realizadas en el aula, al incorporar estrategias didácticas mediadas por tecnologías, dentro de una asignatura relacionada al Control Industrial en carreras de Ingeniería. A través de estas estrategias, esta instancia puede convertirse en una posibilidad de aprendizaje para la integración de contenidos en sistemas mecánicos, electromecánicos, electrónicos e informáticos aplicados a la robótica y a los sistemas de producción integrados. Las temáticas a desarrollar incluyen controladores industriales, robótica aplicada, redes de comunicación, software de supervisión, y desarrollos integradores.

El trabajo está orientado a desarrollar una serie de dispositivos para mejorar la formación en tecnologías aplicadas a la ELECTRÓNICA, ELECTROTECNIA Y CONTROL de alumnos de nivel universitario mediante la práctica de experiencias en contextos tecnológicos actuales. De modo de favorecer la comprensión de conceptos y el desarrollo de competencias para ser aplicados a un entorno industrial de alta performance, dentro de un marco educativo integrado.

La experiencia se ha desarrollado dentro de la asignatura del área de Electrónica y Sistemas de Control de 4to año de carrera de grado de Ingeniería Mecánica FRSF-UTN. En esta experiencia se ha trabajado con los alumnos en forma colaborativa. Se presenta la planificación de actividades realizadas y se analizan los resultados de las experiencias en función del aprendizaje de los contenidos específicos y de las competencias adquiridas por los estudiantes, analizando el impacto de la mediación tecnológica en el aprendizaje de los alumnos.

Palabras Claves: *tecnología, control, ingeniería, didáctica, contexto.*

Área Temática: Enseñanza.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de estrategias didácticas mediada por Tecnología en el área de Electrónica y Control constituye un cuerpo de conocimientos en sí mismo. Tiene como objeto el estudio, análisis y explicación de los procesos Industriales que se dan en el marco institucional académico. Para ello, parte de la investigación de los problemas relacionados con su proceso de enseñanza aprendizaje, fundamentalmente en lo que se refiere a qué, cuándo y cómo enseñar y qué, cómo y cuándo saber si se ha logrado el aprendizaje. De esta forma, algunos de estos problemas tienen que ver con la propia asignatura, otros con los alumnos que deben aprenderla y el profesor que la enseña y, finalmente, otros proceden del medio en el que se desarrolla, el contexto social. Dado que todos estos elementos están relacionados entre sí, las acciones didácticas deben planificarse teniendo en cuenta tanto el proceso como los distintos factores que en el mismo intervienen. Realizar una tarea educativa lo más consciente posible, requiere disponer de instrumentos interpretativos que nos permiten conocer los procesos de enseñanza aprendizaje que llevamos a cabo. Un recurso que nos puede ayudar es el análisis de los distintos contenidos según ciertas características comunes. Existen varias maneras de clasificar los contenidos de aprendizaje.

Actualmente, el repertorio de actividades en las distintas asignaturas de carreras de ingeniería, involucra desde los trabajos prácticos de laboratorio tradicionales con materiales más o menos sofisticados a simulaciones computacionales e investigaciones propiamente dichas.

Las estrategias didácticas mediada por Tecnología en el área de Electrónica y Control han tomado un interés creciente por sus importantes perspectivas en el desarrollo de las capacidades que posibilitan al estudiante construir conocimiento y aplicarlo a situaciones concretas, dotándolo de significado.

Partiendo de situaciones prácticas organizadas desde el Laboratorio de Tecnologías Aplicadas se formularon cuestiones que favorecen una amplia exposición de los conocimientos de los alumnos. Para luego continuar con nuevas situaciones de complejidad creciente, compatible con el nivel de los estudiantes para promover la evolución de los modelos iniciales. Culminando con la elaboración de conclusiones, de estructuración de conocimiento y actividades de aplicación.

La necesidad de innovación en los procesos educativos, motivada por transformaciones mundiales en el ámbito político, económico, científico, social y cultural ha hecho que la comunidad académica, especialmente a nivel de educación superior, asuma una visión estratégica ante el proceso de formación con el objetivo de prever el comportamiento de las variables que influyen de forma decisiva en su dinámica y elaborar un panorama sobre el contexto en el cual se desempeñarán los profesionales en el futuro.

En el área de la ingeniería, estos cuestionamientos se han abordado con ejercicios de prospectiva a través de los cuales se han podido establecer una serie de referentes sobre las tecnologías que

ISBN: 978-987-1676-63-7

marcarán los próximos adelantos científicos y los retos que esto representa para el ejercicio de la profesión. Asociada a estos retos, surge la necesidad de establecer los atributos que deberá desarrollar un ingeniero para afrontar nuevos escenarios caracterizados por la complejidad de los sistemas, la rápida evolución de las comunicaciones, el trabajo en equipos multidisciplinarios e internacionales y el desarrollo sostenible entre otros.

La formación de un ingeniero según el CONFEDI (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina) debe propender a:

- Desarrollar en los estudiantes (futuros Ingenieros) capacidad de manejo de situaciones bajo incertidumbre, consolidando actitudes para la solución de problemas no tradicionales.
- Estimular la creatividad, la iniciativa personal, el trabajo interdisciplinario y la innovación en el área tecnológica.
- Desarrollar la capacidad de abstracción y de reflexión crítica que posibilite la creatividad y la generación de respuestas a problemas nuevos y no triviales. Tener capacidad para adquirir aptitudes que le posibiliten percibir los cambios y, si es posible, anticiparse a los mismos.

Algunas de las competencias requeridas son:

- Conocimientos especializados para realizar labores concretas propias de una profesión o disciplina que se aplican en determinado contexto laboral.
- Capacidad para aplicar sus conocimientos a la resolución de problemas relacionados con situaciones del mundo laboral, destreza para manejar ciertas tecnologías y para trabajar con información, así como relacionarse con otros, y trabajar en equipo.

2. METODOLOGÍA

La mejora de las prácticas docentes depende de la cultura que se genera en las aulas. Por ello, si convertimos cada aula en un ecosistema de reflexión y mejora continua del proceso de enseñanza-aprendizaje, contribuimos a reforzar las bases para innovar en el diseño y desarrollo curricular. La interacción es un proceso que implica a docentes y estudiantes en el desarrollo de las tareas formativas y facilita el logro de la comunicación entre ellos, siendo la base de las actuaciones y de las transformaciones que se llevan a cabo en el aula.

La innovación en el aula (González, 2009) ha sido vivida como una línea enriquecedora y necesaria para estimular las prácticas educativas, entendidas en toda su complejidad. En este trabajo se considera que una de las estrategias didácticas es el trabajo práctico integrador, en el mismo predomina el aprendizaje de dominio metodológico en interrelación indisoluble con el marco tecnológico asociado a la situación planteada. Dentro de este dominio se identifican procesos típicos del obrar de la ciencia y la tecnología, tales como: generar propuestas tecnológicas, formular modificaciones a las otras soluciones encontradas en el mercado, seleccionar métodos, diseñar secuencias experimentales, analizar, interpretar, elaborar síntesis y conclusiones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las estrategias didácticas mediada por Tecnología se basan en tres características propias de las competencias, tales como:

- Articulan conocimiento conceptual, procedimental y actitudinal avanzando hacia la selección del conocimiento pertinente para resolver la situación.
- Toman sentido en la acción al transferir conocimientos a situaciones prácticas y resolverlas eficientemente.
- Se vinculan al desarrollo de las competencias en la acción.

Tomando la anterior identificación se propuso a los alumnos del curso de la asignatura Electrónica y Sistemas de Control, correspondiente al cuarto año de la carrera Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional, la realización de actividades que integrara no sólo los temas tratados en la asignatura, sino que les posibilite desarrollar competencias propias de la formación del ingeniero (CONFEDI, 2010). De este modo, se le acercaron al estudiante procesos que debían resolver con los contenidos y las herramientas desarrolladas durante el cursado; en la cual los contenidos teóricos y experimentales asociados a ella estuvieran vinculados, tal como ocurre en la vida profesional del Ingeniero.

Una vez que los estudiantes realizaron la selección del caso, se les requirió el relevamiento de todos los datos necesarios y su posterior representación en un esquema, en el cual debían determinar y relevar las influencias ambientales, los agentes corrosivos, etc., como también contemplar los costos económicos y los datos técnicos y operativos de los distintos dispositivos y mecanismos a implementar. La Figura 1 grafica la dinámica explicitada.

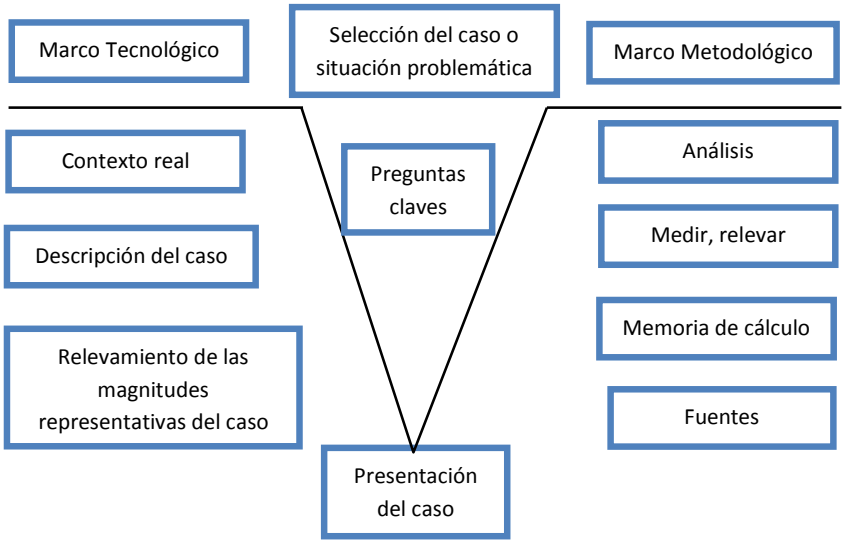


Figura 1: Dinámica del desarrollo de la actividad propuesta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La presentación debía incluir una introducción, la descripción del caso, el esquema del circuito diseñado, la memoria de cálculo y componentes, las conclusiones y las referencias de las fuentes consultadas.

2.1 Ejemplo de una Guía Didáctica.

Caso Nº5: Desarrollo de una Puerta Rápida.

A- Realizar un informe sobre el proceso industrial planteado en esta guía, ampliando con imágenes y tipos de sistemas que participan, incorporando además un diagrama esquemático de todo el conjunto con los sensores y actuadores (entradas digitales/analógicas y salidas digitales) necesarios para llevarlo a cabo. Explicar el funcionamiento y función que cumple cada uno de ellos. Además adjuntar hoja de datos técnica de cada uno de los elementos incorporados al sistema.

Junto con el informe impreso, los alumnos deberán presentar la programación del controlador (ya sea el modelo SR2B121BD o el SR3B261BD) para que al momento de la exposición oral durante la evaluación, puedan cargarlo a los PLCs y simularlos.

B- Definiendo las entradas y salidas de señales adecuadamente (entradas digitales/analógicas y salidas digitales) realice la programación, mediante el lenguaje LADDER o BDF según les sea conveniente, del siguiente mini proceso, indicando los bloques y configuración necesaria para cada caso.

En la figura se observa una puerta de apertura rápida, empleada en frigoríficos para seccionar pasillos, y permitir el traslado con autoelevadores.
El sistema funciona de la siguiente manera:



1- El motor trifásico enrolla la cortina en un tambor, permitiendo el paso.
2- El chofer llega hasta la puerta, y tiene dos opciones para abrirla: utiliza un control remoto, o tira de una piola que acciona un pulsador. Cualquiera sea la señal de arranque, el automatismo acciona el motor trifásico, y la cortina se enrolla.
3- Pasado un intervalo de 30 segundos, el automatismo envía la señal de cierre. El motor invierte su giro, y desenrolla la cortina.
4- La puerta rápida deberá disponer de un sistema de barrera, que detenga el desenrollado de la cortina, en caso de que se interponga un obstáculo en el vano de la puerta. En caso de existir un obstáculo, el desenrollado deberá detenerse, y enviar una señal de alarma.
5- Para rearmar el sistema (anulando la señal de alarma), deberá utilizarse cualquiera de las señales de apertura mencionadas.
6- La puerta rápida debe tener finales de carrera al enrollar y al desenrollar.
7- La puerta rápida debe contar con un pulsador de parada de emergencia.
8- Si durante el enrollado o desenrollado, el motor sigue girado indefinidamente (por motivos no determinados), luego de 15 segundos debe detenerse y emitir una señal de alarma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2 Etapas a desarrollar en cada uno de los trabajos.

Los docentes de la cátedra consideran al trabajo práctico integrador, una estrategia en donde se pueden realizar trabajos que pueden ser considerados como de iniciación en la profesión. Por este motivo se han diseñado Guías didácticas para la resolución de casos de automatización de equipos existentes en la industria, con importante información en internet (catálogos, fabricantes, proveedores, videos, animaciones, planimetrías).

La resolución del caso tiene varias etapas:

Etapa 1: leer los requerimientos mínimos del automatismo requerido (secuencia de trabajo), y proponer la selección de componentes (sensores, elementos de seguridad, dispositivos de control y de comando). Esto incentiva al alumno de mecánica a salir de su área de conocimiento, e investigar directamente en el mercado de proveedores y fabricantes, las opciones más adecuadas para la resolución del problema.

Etapa 2: en el desarrollo de la guía didáctica, se proponen instancias de falla del sistema, y se solicita al alumno que el sistema sea capaz de detectarlas y corregirlas (en caso de ser posible), o establecer un punto de detención "seguro" para evitar daños materiales o personales.

Etapa 3: proponer funciones adicionales que consideren adecuados para el sistema.

3. RESULTADOS

Los alumnos de ingeniería mecánica obtienen un marco de trabajo concreto (condiciones de operación), con un objetivo atractivo (aprobación de la materia), que los incentiva a investigar y consultar en un área de conocimiento del cual solo tienen información teórica, y deben plasmarlo en una Memoria Descriptiva que incluye investigación de proveedores, selección de componentes, conexionado eléctrico, programación de controladores automáticos y exposición de resultados.

El trabajo contacta al alumno con la materialización de los conocimientos teóricos adquiridos, involucrando productos y componentes reales, en un área de continua evolución, permitiéndole en el proceso comprender que los automatismos no están alejados de las áreas de trabajo habituales del Ingeniero Mecánico.

Se han detectado cambios cualitativos en la articulación del informe, entre aspectos teóricos y empíricos, comprensión del comportamiento de los elementos reales del caso. Justificación de las afirmaciones a través de datos precisos, explicitando la elección criteriosa de cada dispositivo utilizado. Presentación adecuada de los resultados y las referencias bibliográficas utilizadas.

Por último, la defensa oral por parte de los alumnos del caso que han desarrollado, implica una mejora sustancial en cuanto a la argumentación y justificación de la solución propuesta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de estos trabajos prácticos integradores mediados por tecnología, y que son utilizados para el proceso de enseñanza-aprendizaje de los alumnos estudiantes de ingeniería, genera una formación integral que los prepara adecuadamente para afrontar las responsabilidades propias del ejercicio de la profesión. Se trata de fomentar distintas actitudes y desarrollar varias aptitudes de las que los futuros ingenieros no pueden estar ajenos: construcción del pensamiento, la motivación, buscar / interpretar información y datos técnicos, generar planillas de cálculo, evaluación de costos y proveedores, capacidad oratoria (tanto para la exposición del trabajo como para la justificación de los elementos/sistemas adoptados) son todas herramientas básicas para el perfil del profesional que la industria necesita.

5. REFERENCIAS

Bain, K. (2006) Lo que hacen los mejores profesores universitarios. Valencia. Publicaciones de la Universidad de Valencia

CONFEDI (2006) Desarrollo de competencias en la enseñanza de la ingeniería argentina. Informe CONFEDI Villa Carlos Paz - Argentina

Dede, C. (comp.) (2000) Aprendiendo con tecnología. Buenos Aires. Paidós

Moreira, M.A. (2010). Unidades de enseñanza potencialmente significativas (UEPS). Porto Alegre: Instituto de Física UFRGS. Disponible en: http://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSesp.pdf (consulta, marzo 2015)

Pirog, N.; Bär, M.;,Faccioli,B.; Omar, L.(2014) Diseño de equipamiento didáctico para Aplicaciones Tecnológicas en el Carreras de Ingeniería Actas JIT 2014, Rosario Santa Fe.

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

VINCULACION COGNITIVA ENTRE EL LABORATORIO DE CAD-CAE-CAM Y EL MEDIO INDUSTRIAL REGIONAL

Ing. AZCONA, Pablo - Ing. FRUCCIO, Walter – Ing. ARAYA, Pablo - Arq. de VEDIA, Carlos – Ing. MUÑOZ, Juan Bautista
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa

Departamento de Tecnologías Básicas y Aplicadas de Electromecánica
Tel: 02302-422780 – Interno: 6504 - e-mail: l3c@ing.unlpam.edu.ar

General Pico - La Pampa - República Argentina

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolla en el Laboratorio de CAD-CAE-CAM (LAB 3C) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam) (resolución C.D. Nº 110/10).

Durante tres años se trabajó en la vinculación de los espacios relacionados con la representación y la comunidad académica de nuestra facultad. En este caso el objetivo del presente trabajo es extender el llamado hacia el medio industrial de la región. Nos hemos propuesto en esta etapa una nueva meta; la de acercar dichos conocimientos a la población regional que así lo requiera.

La inquietud surge, en principio, de los mismos sectores fuera del académico, que buscan dinamizar los procesos de diseño y fabricación así como la administración de la documentación técnica. Los programas de dibujo han posibilitado una mejora en la calidad de la documentación técnica-gráfica; las empresas regionales no son ajenas a estas bondades, es por eso que se está trabajando en la interacción e intercambio de conocimientos con los mismos.

Por otra parte, empresarios e industriales solicitaron explícitamente la realización de capacitaciones en CAD, CAE y CAM, alentados por competidores directos que ya estaban haciendo uso de estas tecnologías.

Las experiencias realizadas son las de brindar cursos a los alumnos universitarios, por lo que al incorporar como sujetos de aprendizaje a otros usuarios, con trayectorias, saberes y disponibilidades diferentes, se necesita replantear la metodología a utilizar para que el aprendizaje sea realmente significativo. Como primera estrategia se ha pensado en realizar las capacitaciones en forma diferenciada, según el nivel de conocimientos previos respecto al objeto de estudio. Otro punto a tener en cuenta es que estos nuevos usuarios necesitan menor contenido teórico conceptual, puesto que la utilización de lo aprendido es para aplicación directa en su desempeño laboral, superando el concepto “del dibujo” por un concepto más integral: diseño, proyecto, prototipo y producto.

Palabras Claves: *Vinculación, Industrial, Capacitaciones, Aprendizaje*

Área Temática: Enseñanza

1. INTRODUCCIÓN

Es una tarea complicada pero necesaria la de alcanzar los conocimientos de las cátedras involucradas en el dibujo, no sólo a los alumnos, sino a las empresas locales que así lo requieran. La representación de piezas, la elaboración de planos, y el uso de herramientas de diseño, son parte de un todo, pero en el camino hay muchas cuestiones a tener en cuenta.

Las empresas instaladas en la ciudad o en la región tienen formas de trabajo particulares, desarrolladas o no, y que surgen de protocolos de trabajo aceptados o aprobados por los que alguna vez fueron los encargados de llevar el manejo general de las mismas. Al menos eso sucede en nuestro sector productivo. Por esto, quienes contaron con personal especializado, como técnicos o ingenieros en sus filas adoptaron una forma de trabajo organizada, donde las cosas se analizan, diseñan y/o proyectan antes de plasmarlas en algo tangible, real y sustentable. Sin embargo, lo que ocurre con mayor frecuencia es lo contrario. A la falta de personal dotado de las características mencionadas en el párrafo anterior se le suma el hecho de que en general la producción es intermitente, con el factor tiempo cumpliendo un rol predominante, y a lo que se le adiciona también la versatilidad de trabajos a realizar, favoreciendo una forma de trabajo desorganizada u organizada en parte. A su vez, la falta de manejo de nuevas herramientas productivas, de administración y de diseño, propende a que se definan los productos de esa producción variable en el mismo momento de la fabricación, imposibilitando en la mayoría de los casos, obtener documentación técnica de lo producido, tanto en etapas intermedias, como en lo definitivo o final, como por ejemplo: piezas, avances de producción, planimetrías, conformes a obra, en caso de empresas constructoras, planos, medidas finales, listados de tareas, diagramas de flujo, etc.

Se busca a través de la capacitación orientar a las empresas en todo el espectro de tareas que engloba la etapa de diseño, y elaboración de documentación, comenzando con la representación, el dibujo y confección de planos normalizados.

Es necesario puntualizar que cuando nos referimos a empresas del medio, hacemos referencia a pequeñas empresas, ya que no existen en las cercanías grandes producciones, y que el desarrollo de productos se realiza con un número acotado de empleados. Pudiendo considerarse más bien como talleres de producción o Pymes, o empresas que se dedican a la producción por proyecto: empresas constructoras, civiles, mecánicas, eléctricas o electromecánicas. Las empresas metalmecánicas se dedican en su gran mayoría a la agroindustria, pero también existen empresas dedicadas a la industria del petróleo. Las empresas eléctricas o electromecánicas se dedican a la proyección y montaje de redes de baja

ISBN: 978-987-1676-63-7

y media tensión y por último las empresas constructoras o civiles que se dedican en su gran mayoría a las obras de gasoductos o conductos pluviales.

El trabajo de exploración de la situación actual se llevó a cabo sobre 19 pymes o microempresas, ubicadas en la ciudad de General Pico (Parque industrial y zonas cercanas) y en localidades vecinas como Intendente Alvear y Realicó, distantes 45 km y 90 km respectivamente de nuestra ciudad. Contando con un promedio de 6 operarios a capacitar en cada una de las antes mencionadas, se trabajará con un total de 106 personas, donde las dos terceras partes no tiene conocimientos previos, y el resto corresponde a los técnicos electromecánicos egresados de la escuela industrial (EPET Nº 2, EPET Nº 9 Y EPET Nº 9) quienes presentan conocimientos sobre el uso de herramientas de diseño asistido por computadora, al menos lo más jóvenes.

Sólo en un pequeño porcentaje de las empresas analizadas existe la estructura de oficina técnica, con personal capacitado para llevar adelante el funcionamiento la misma. Estas personas, 27 en total, serán capacitados con otra propuesta formativa atendiendo a ese nivel de conocimiento previos, como por ejemplo: manejo básico de PC y software de diseño, a lo que se le adiciona el uso de las normas IRAM para dibujo y representación, y algo no menor; todos ellos cuentan con su PC portátil (propia o de la empresa para la que trabajan) para poder realizar las capacitaciones, agilizando la búsqueda del espacio donde llevar adelante las mismas.

2. METODOLOGÍA

Para este nuevo desafío fue necesario analizar las características de los nuevos sujetos de aprendizaje, y ese análisis nos arrojó una gran cantidad de resultados que identificándolos y ordenándolos según su importancia nos permitió proponer los siguientes lineamientos a seguir a la hora de preparar las capacitaciones para que las mismas sean útiles y no solo una excusa para ausentarse temporalmente de los puestos de trabajo.

A continuación se presentan las características más relevantes que se detectaron en las personas que recibirán la propuesta formativa, y que definen en gran medida la propuesta misma y la forma de abordar los temas:

En primer lugar, solo un veinticinco sobre cien tiene conocimientos generales del uso de computadoras personales. La mayoría no las utiliza en absoluto, aunque manifiestan haber agilizado un poco el vínculo con las nuevas tecnologías, desde la incorporación de los teléfonos inteligentes a su vida cotidiana. En segundo lugar, de las personas que no manejan computadoras, sólo un 20 por ciento sabe representar o realizar un croquis realmente entendible para ser interpretado por el personal de la oficina técnica, menos aún utilizando la

ISBN: 978-987-1676-63-7

normativas que existe para esto. En tercer lugar aproximadamente el 25 por ciento de los sujetos no concurrieron a una escuela de orientación técnica y el restante 40 por ciento no completo los estudios de nivel medio. Esto requiere una especial atención, ya que este 40 por ciento, demanda un esfuerzo mayor para llegar a los saberes que desea brindar el curso.

Y por último el 6 por ciento de los operarios poseen muchos años de experiencia en plantas fabriles, por lo cual cuentan con algunos conceptos de representación y lectura de planos. Asimismo el 3 por ciento de los sujetos han realizado cursos de capacitación en diferentes ámbitos, los cuales los coloca en un nivel superior al resto, ya que poseen habilidades en diseño dentro de un entorno gráfico dinámico, que el resto de los sujetos no poseen.

El primer factor a considerar fue la extensión y el alcance de los cursos, definida casi en su totalidad por las necesidades de las empresas y el nivel de conocimientos del que parten. La carga horaria fue elegida, en principio, fuera del horario denominado "comercial" y la preferencia general sobre la extensión puntualiza: pocos encuentros de mayor carga horaria, y gran contenido práctico de herramientas digitales. No será necesario el desarrollo de los contenidos técnicos propios de la producción, fabricación de piezas y mecanismos, ya que son conocimientos adquiridos con anterioridad y utilizados diariamente por las solicitantes.

A la modalidad tradicional de brindar cursos presenciales en el edificio de la Facultad de Ingeniería se le agrega una nueva, sugerida por los nuevos solicitantes, que prevé el desarrollo destinado sólo para personal técnico de la misma dentro de sus instalaciones. Para esto sugieren trabajar durante, por ejemplo, una semana entera, en la temporada de menor demanda productiva, con todo el personal del área de diseño u oficina técnica.

Otra posibilidad de capacitación gestada en conjunto con las empresas es la que propone realizar capacitación al personal técnico que no trabaja en la oficina técnica sino en la parte operativa, sobre lectura e interpretación de planos normalizados.

La oficina técnica se ve forzada muchas veces a realizar diferentes clases de documentación gráfica para concretar la producción: fabricación de piezas, ensamblajes, detalles constructivos de proyectos civiles, eléctricos, etc., debido a que no todo el personal tiene la misma capacidad de interpretación de dicha información, se necesitan al menos tres planos o dibujos diferentes:

- Uno elaborado bajo normas IRAM de Dibujo Tecnológico, con “especificaciones de diseño y manufactura,…” elaborado para “comunicación global y comprensión…”, en particular cuando “…es creciente la tendencia al uso de la subcontratación…”, o tercerización, y finalmente “…para que nada quede implícito o dejado a criterio del personal del taller o área de inspección…”[1]. En general destinado a formar parte de la documentación técnica y para posterior archivo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Otro tipo de plano, con mucho menos detalle, carente de simbología, tablas e información adicional, destinado al uso de los operarios o empleados cuya función es la fabricación o ejecución de determinada tarea, a quienes les resulta difícil la interpretación de lo importante cuando la documentación se sobrecarga de detalles y datos técnicos.
- Por último, un plano, boceto o croquis que será la herramienta de trabajo para operarios de menor jerarquía o con pocos conocimientos técnicos, que también forman parte del circuito productivo pero que no manejan la simbología ni las normas, y a quienes les resulta imposible la lectura de un plano normalizado. Muchas veces la mejor forma de hacer esta bajada de información es mediante el uso del croquizado a "mano alzada" acompañado de una explicación oral de lo esperado o buscado.

Al igual que otras capacitaciones brindadas desde el laboratorio, las mismas deberán estar avaladas por el Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería previo a su ejecución, concretando el vínculo buscado, y pudiendo en consecuencia emitir certificados de asistencia y aprobación, útiles para los usuarios y para los docentes a cargo de la capacitación. Logrando obtener el marco legal necesario, el respaldo de la facultad, y la posibilidad de utilizar las instalaciones y el equipamiento de la misma.

3. DESARROLLO

Se han considerado muchas opciones para llevar adelante el proceso de enseñanza que nos acerque de la mejor manera a un aprendizaje significativo. En ese análisis se debatieron las pautas de capacitación inherentes al proceso mismo de enseñanza de las herramientas de diseño y representación, sobre todo las digitales. Es de particular interés la adecuación de estos contenidos a los nuevos receptores, quienes en su mayoría carecen de conocimientos básicos del uso de la informática, pero muy por el contrario, tienen amplios conocimientos de la información técnica, y la tecnología necesaria para llevar adelante determinada producción.

Luego de considerar los aspectos mencionados antes, las inquietudes de las empresas, las características de los sujetos de aprendizaje, las situaciones particulares y demás cuestiones significativas, pudimos elaborar los pasos de mayor ponderación a considerar para precisar las características de las capacitaciones, los cuales serán, en principio, las siguientes:

- Definir los contenidos de la capacitación, según las necesidades de la empresa. En esta etapa se trabaja en conjunto con los solicitantes. Se busca especificar los saberes a brindar, que pueden ser desde técnicas de representación con uso o no de programas de dibujo, hasta generación y posterior administración de documentación técnica.
- Identificar las singularidades de los sujetos de aprendizaje: conocimientos previos de las herramientas informáticas, de normas de dibujo y representación, vinculación con los

contenidos, grado de utilidad que se le dan a los mismos, alcance, y nivel de detalle esperado. Esta información permite optimizar el uso de los tiempos.

- Con lo anterior se obtiene la carga horaria mínima necesaria, pudiendo optar por realizar cursos con modalidad semi-presencial que posibilita un incremento en el tiempo de trabajo individual fuera del espacio estipulado para el dictado de cursos. Esta última surge de encuestas realizadas a los futuros receptores, quienes prefieren tener menor cantidad de horas de trabajo en el aula, y mayor trabajo en sus casas, para que en definitiva sean ellos los que administren sus tiempos.
- Definir el espacio físico donde se desarrollarán las clases presenciales: dentro del edificio de la Facultad de Ingeniería o directamente en las instalaciones de la empresa, como las mismas lo han sugerido. La idea de llevar cursos a las instalaciones de las empresas, también proviene de las mismas, ya que en el caso de que necesiten acercar conocimientos a un número importante de empleados, se lo hace dentro de su entorno, y aplicado directamente a sus prácticas diarias.
- Una vez concretados los pasos anteriores, se deberá elevar un proyecto de capacitación por parte del *LAB3C* [2] donde se manifiesta explícitamente una planificación a seguir, que contemple las definiciones anteriores.
- El proyecto debe ser evaluado y aprobado por el Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería de La Universidad Nacional de La Pampa para que sea posible llevarlo a la práctica, posibilitando a su vez, la emisión de certificados de *Asistencia y Aprobación* a los destinatarios, y Certificados de Docente Capacitador a los responsables del mismo.
- La evaluación de los cursantes la realizará el LAB3C [2], teniendo en cuenta los aspectos particulares del curso, donde será prioridad el uso de herramientas de diseño, ingeniería y manufactura asistida por computadora, en base a normas IRAM.

En general se busca comenzar con ritmo de trabajo lento, que busca definir los puntos más importantes en lo que respecta a diseño y dibujo, y que se va incrementando tanto en contenidos como en especificaciones y normas a medida que avanza la cursada. Se busca con esto, crear bases de pensamiento sólidas y bien marcadas para que las herramientas cumplan su rol, y que no sean lo fundamental.

El aspecto normativo de la documentación técnica y tecnológica será la base de la construcción de conocimientos, para que la documentación gráfica generada utilizando herramientas de diseño o dibujo digitales sea la manifestación de la búsqueda de la normalización: simplificación, unificación y especificación, para de esta forma, reducir el volumen de información y que la misma sea de fácil interpretación. Esto último parecería ser innecesario para personas formadas en lo técnico, pero el problema de fondo es la separación de lo productivo con lo técnico. Separación que tiene origen en las políticas educativas que a

fines de los años 90 desarmaron la escuela técnica o industrial con la llamada Ley Federal de Educación, y la aparición del nivel Polimodal, con la consiguiente disociación y casi disolución de Técnicos de nivel medio, reemplazados en el sector productivo con "idóneos" en el uso de herramientas, con sobrados conocimientos en el "hacer", pero que en gran medida desconocían la elaboración de documentación técnica, imposibilitando dejar registro de la producción realizada, es su mayoría diversa e intermitente.

4. CONCLUSIONES

Finalizando el presente documento, el trabajo a realizar, de acercar el conocimiento de nuevas herramientas de diseño, sobre todo gráficas, y la optimización en el uso de materiales y tiempos en la empresa aprovechando programas específicos que permitan administrar de mejor manera los recursos de las mismas, es un desafío para los integrantes de este laboratorio.

La búsqueda de la mejor alternativa para lograr que los contenidos sean aprendidos y aprehendidos por las personas provenientes del medio productivo será constante. Tenemos como herramienta de trabajo una planificación contextualizada, que atiende las necesidades de los nuevos alumnos, obtenidas a través de encuestas, consultas informales e inquietudes de los mismos expuestas al mismo momento de solicitar capacitaciones o cursos desde el LAB3C [2], pero como premisa fundamental tenemos la de ser críticos a la hora de evaluar el desarrollo de nuestras prácticas, para de esta forma, mejorar la calidad de la enseñanza, no de contenidos, sino de cómo brindarlos para que el aprendizaje sea realmente significativo, y esos nuevos conocimientos puedan ser aprovechados en el corto plazo por las empresas que favorecen, y por esto solicitan, capacitaciones de este u otro tipo.

El nuevo diseño curricular de la enseñanza técnica en la provincia, dentro del marco de homologación nacional de títulos, propende el acercamiento del conocimiento técnico específico perdido en parte en los años de la anterior Ley Nacional. Si bien el tiempo de trabajo bajo normas no es el mismo que existía en los tiempos de la "vieja escuela industrial", los alumnos de hoy, futuros trabajadores de mañana, tendrán otra visión respecto a la importancia de generar antecedentes de lo producido, así como sobre la elaboración de documentación técnica.

5. REFERENCIA

[1] INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN Manual de Normas IRAM de Dibujo Tecnológico 2011.. Ed. 32 Febrero 2011.

[2] Laboratorio de CAD-CAE-CAM de la Facultad de Ingeniería de la U.N.L.Pam (resolución C.D. Nº 110/10).

Se enumeran a continuación la bibliografía utilizada para definir la planificación, y las herramientas pedagógicas y didácticas que sustentan nuestra práctica docente.

STEPHEN KEMIS; ROBIN MCTAGGART (1988), Como planificar la investigación – acción. Editorial Alertes.

JOSEPH D. NOVAK (1988), Teoría y práctica de la educación. Editorial Alianza.

EDGAR MORIN (1990), Introducción al pensamiento complejo. Gedisa Editorial.

M. ANTONIA CASANOVA (1992), La evaluación, garantía de calidad para el centro educativo. Editorial Edelvives.

DONAL A. SCHÖN (1992), La formación de profesionales reflexivos. Ediciones Piados.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las autoridades de la Facultad de Ingeniería de la U.N.L.Pam, a su cuerpo docente, a los alumnos, y finalmente a las empresas del medio local y regional que trabajaron junto a nosotros para resolver una problemática que los afecta, aportando las ideas, sugerencias e inquietudes que son la génesis del presente trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

PANDEO LOCAL DE COMPONENTES MECÁNICOS DE PAREDES DELGADAS

Guillermo D. Chiappero, Alejandro J. Giudici, Carlos F. Estrada y José E. Stuardi

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba
Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 – Córdoba, Argentina
correo-e: guillermochiappero@hotmail.com

RESUMEN

Se presentan métodos destinados a la enseñanza del fenómeno de falla por pandeo local de componentes mecánicos conteniendo paredes delgadas que soportan cargas de flexo-compresión. Con ese objetivo, se diseñó un problema típico de un perfil de pared delgada, que falla por pandeo local y presenta características adecuadas para: el análisis y comprensión del fenómeno, la comparación de metodologías de cálculo y la discusión de resultados. En este trabajo se estudia el caso de una viga de sección U donde se compara la solución analítica existente en la bibliografía con el resultado obtenido con un modelo numérico de elementos finitos y mediante experimentos en laboratorio con la presencia de los alumnos.

La temática del pandeo de estructuras y las estructuras con recubrimiento resistente cubre una parte importante del programa de la asignatura “Cálculo Estructural II” de las carreras de Ingenierías Aeronáutica, Mecánica y Mecánica Electricista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

La experiencia fruto del presente trabajo, se utiliza como complemento de los conceptos desarrollados en las clases teórico-prácticas referidas al pandeo de estructuras mecánicas. Se observa una importante integración de conocimientos y su aplicación en el trabajo experimental propuesto. Los detalles de su ejecución captan la atención del alumnado, inducen preguntas y requieren especial interpretación. La comparación de los resultados provenientes de los tres métodos citados (analítico, numérico y experimental), fomenta además el interés por la temática del pandeo.

Desde el punto de vista didáctico, la implementación de los procedimientos descriptos ha mostrado un aumento notable en la motivación de los estudiantes y una contribución a la rápida internalización del conocimiento del fenómeno estudiado.

Palabras Claves: *ensayo, pandeo, componentes mecánicos, simulación numérica, soluciones analíticas.*

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se propone una metodología destinada a enseñar el fenómeno de falla por pandeo local de componentes mecánicos de paredes delgadas que soportan cargas de flexo-compresión. Para ello, a modo de ejemplo, se diseñó un problema típico de un perfil de pared delgada, que falla por pandeo local. Se cotejó la solución analítica existente en la bibliografía [3] con el resultado de un modelo numérico de elementos finitos y el ensayo experimental de probetas de tamaño real en laboratorio con la presencia de los alumnos.

Los primeros investigadores en el campo de la estabilidad del equilibrio de componentes estructurales centraron sus esfuerzos en comprender los procesos naturales y desarrollar teorías matemáticas para describir los fenómenos de pandeo de elementos físicos [1, 2].

Cuando la inestabilidad (pandeo) interviene en el diseño de un componente mecánico tipo viga-columna, el parámetro más importante es la esbeltez. En efecto, la carga crítica que un elemento estructural puede resistir resulta inversamente proporcional al cuadrado de la esbeltez y linealmente proporcional al módulo tangente de elasticidad. La disminución de este último parámetro para tensiones próximas a la fluencia origina correcciones de la carga crítica de Euler. En consecuencia se debe elegir una sección que para igual área produzca el mayor valor posible del radio de giro en la dirección de pandeo. Siempre se hace referencia a secciones de pared delgada como una solución eficiente, sin embargo existen limitaciones porque una vez superado cierto valor máximo de la relación entre el ancho y el espesor de una placa comprimida, que es parte de una sección resistente, se produce el fenómeno de pandeo local de ese elemento individual. En esos casos las ecuaciones que gobiernan el pandeo global de la viga-columna no son suficientes para resolver el problema. El valor máximo para la relación ancho/espesor sin fallar por pandeo depende del tipo de carga, del material, de la forma de la sección y del tipo de apoyos.

En el caso de elementos mecánicos, compuestos por placas en flexo-compresión, se considera que las placas que forman la sección están apoyadas unas en otras. Dado que la carga crítica de cada placa depende de las condiciones de apoyo a lo largo la misma y que el largo de las placas que componen el elemento estructural es mucho mayor que el ancho, la carga crítica resulta independiente del largo del elemento mecánico y de las condiciones de apoyo en los extremos cargados. Cuando un elemento estructural está compuesto por varias placas delgadas, las placas menos solicitadas proveen restricción (apoyo) a las placas más comprometidas.

En muchos cursos de ingeniería, los estudiantes tienen dificultad para visualizar los conceptos teóricos impartidos a pesar de los trabajos prácticos donde resuelven problemas y de los problemas presentados en los libros de texto. Los estudiantes generalmente tienen dificultades en internalizar el significado físico de los fenómenos estudiados. Si la unidad académica cuenta con medios para realizar experimentos y aplicar la teoría al mundo real, el estudiante mejora el entendimiento de los conceptos teóricos, y además gana confianza para enfrentar situaciones complejas. El estudiante de ingeniería actual necesita desarrollar habilidades teóricas, experimentales y computacionales. Estas habilidades deben ser cuidadosamente cultivadas en clase a través de una currícula multidisciplinaria, y resolviendo problemas prácticos que los preparen para enfrentar futuros retos en su vida profesional.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La asignatura “Cálculo Estructural II” de las carreras de Ingeniería Aeronáutica, Mecánica y Electromecánica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) [4], introduce al futuro Ingeniero en el estudio de problemas concretos de pandeo de componentes estructurales con base en los conocimientos adquiridos en las asignaturas “Resistencia de Materiales” y “Análisis Estructural”. El dictado de la asignatura Cálculo Estructural II está orientado a desarrollar en los alumnos capacidad para modelar y analizar sistemas mecánicos sometidos a distintos tipos de cargas, proveyendo los conocimientos conceptuales y las herramientas de cálculo necesarias para diseñar y también para realizar modificaciones estructurales, tendientes a solucionar problemas, basándose en datos provenientes de cálculos y mediciones experimentales.

1.1. Contenidos temáticos de la materia Cálculo Estructural II

En la asignatura Cálculo Estructural II se estudian ecuaciones fundamentales que describen al sólido continuo y criterios de falla; problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras mecánicas; métodos numéricos utilizando computadora para resolver problemas concretos; criterios de falla por fractura y fatiga en elementos mecánicos y las características del diseño de estructuras y componentes mecánicos, en particular torres metálicas, cañerías y recipientes de presión.

1.2. Algunos aspectos sobre la metodología de enseñanza

Para mejorar la comprensión de los problemas, el plantel docente pone énfasis en asociar los temas en estudio con ejemplos prácticos, prestando especial atención a la correspondencia entre el modelo de cálculo y el sistema real, para evaluar sus diferencias. El alumno realiza trabajos prácticos y proyectos de diseño, en forma continua durante el desarrollo del curso, referidos a problemas concretos de las ingenierías aeronáutica y mecánica.

Más allá de los conocimientos aportados por la asignatura, se pretende afianzar en el futuro ingeniero una concepción ágil y moderna de la solución de los problemas. Para ello, se deben utilizar herramientas adecuadas a los objetivos fijados, logrando celeridad y exactitud en la propuesta técnica y considerando tanto los métodos aproximados como los más exactos, pero valorando el costo y el tiempo de la solución.

Por todo lo expresado, resulta fundamental que el alumno logre internalizar los conceptos impartidos en la asignatura Cálculo Estructural II para que pueda enfrentar con éxito los desafíos de la práctica profesional. Este trabajo es una herramienta que puede colaborar eficazmente con este propósito.

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Con el objetivo de estudiar métodos destinados a la enseñanza del fenómeno de falla por pandeo local de componentes mecánicos conteniendo paredes delgadas que soportan cargas de flexo-compresión, se diseñaron problemas típicos de perfiles de pared delgada, que fallan por pandeo local y presentan características adecuadas para el análisis y comprensión del fenómeno, la comparación de metodologías de cálculo y la discusión de resultados obtenibles. A modo de ejemplo en este trabajo se estudia el caso de una viga en U susceptible de fallar por

ISBN: 978-987-1676-63-7

pandeo local de sus alas y se compara la solución analítica existente en la bibliografía con el resultado obtenidos con un modelo numérico de elementos finitos. Esos resultados se contrastan con el ensayo experimental de probetas de tamaño real en laboratorio con la presencia de los alumnos.

Los ensayos del tipo descripto en el presente trabajo se van incrementando en el dictado de la materia Cálculo Estructural II y por esa vía experimental se pretende lograr una integración con los conceptos desarrollados en las clases teórico-prácticas.

En lo que respecta a la modelación de los problemas físicos, es habitual que durante el desarrollo de la carrera de grado se requiera que el alumno encuentre la solución de problemas, donde los datos aportados por el docente en el planteo, son parte de un proceso de solución previa. En muy pocas oportunidades los datos son presentados con el estilo propio de la práctica profesional, donde en general el planteo es vago y el proceso de recolección de datos constituye parte del proceso de solución. Esto último, requiere conocimiento y experiencia por parte del profesional. Lo expuesto es especialmente aplicable a los problemas de pandeo de estructuras, donde se debe preconcebir la solución, ello implica que en la mayoría de los casos es necesario tener una idea previa de los resultados a obtener al momento de definir el problema.

Este trabajo puede ser utilizado como introducción a ejercicios del tipo Proyecto de Diseño, que simulan casos prácticos donde el planteo es similar a los casos reales; estimulando la creatividad del alumno y la adopción de criterios en cada una de las etapas del trabajo: desde las hipótesis en la planificación del ensayo hasta la interpretación de los resultados en base a los conceptos teóricos.

3. ENSAYOS MECÁNICOS

Los ensayos mecánicos se realizaron sobre tres vigas de acero de material: IRAM IAS U 500-231 de sección U de 700 *mm* de largo cuyas dimensiones se indican en la Figura 1, donde *b* es la base del perfil (alma), *h* es la altura (ala) y *t* es el espesor uniforme del perfil. Los datos de material son: tensión de fluencia $\sigma_f = 315\ MPa$, módulo elástico *E* = 206000 *MPa* y módulo de Poisson ν = 0,3.

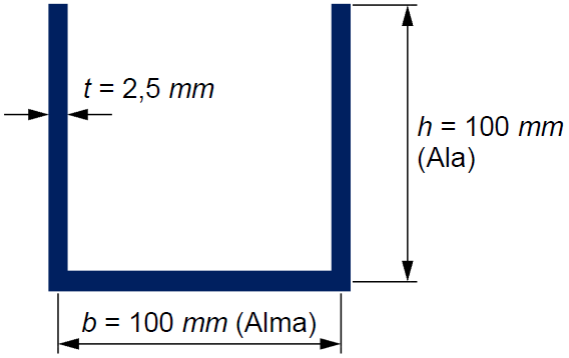


Figura 1: Viga de Sección U

Las vigas se sometieron a un ensayo de flexión según el esquema de la Figura 2, donde P es la carga indirectamente aplicada mediante dos cargas P/2 distanciadas 300 mm. La viga tiene 700 mm de largo pero la distancia entre los apoyos es L = 600 mm.

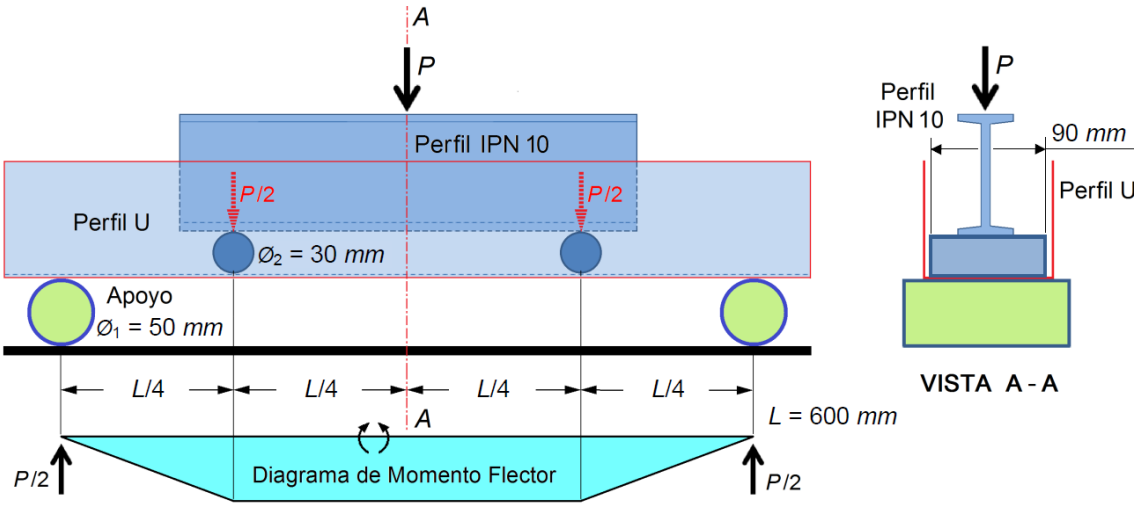


Figura 2: Esquema del ensayo de flexión

El dispositivo se montó en una máquina de ensayos universal hidráulica, Ibertest Serie UBM [5], del Departamento de Estructuras de la FCEFyN, según se muestra en la Figura 3. Antes del inicio de los ensayos se verificó las condiciones de seguridad del mismo y se realizó la calibración de la puesta a cero de la máquina indicada.

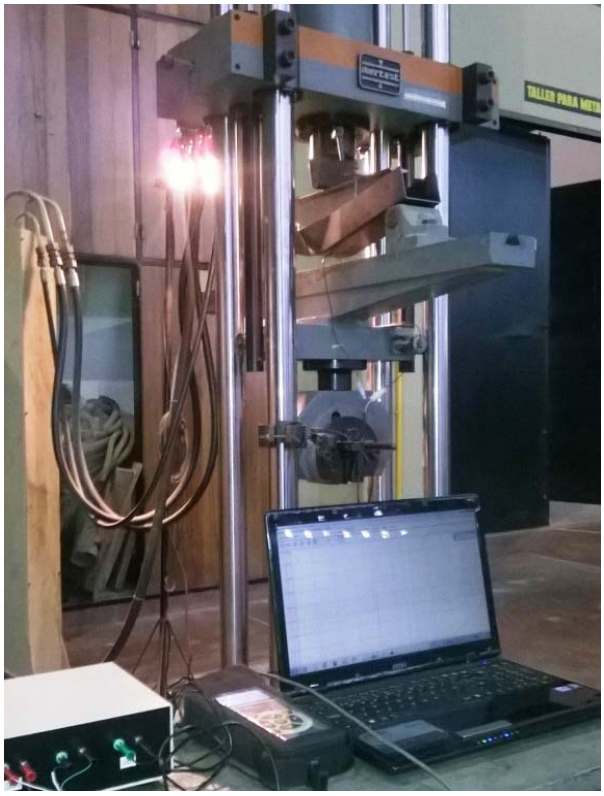


Figura 3: Ensayo de flexión en máquina Ibertest

Como se muestra en la Figura 2, se aplica una carga *P* a un perfil doble T IPN10. Ese perfil

ISBN: 978-987-1676-63-7

transfiere la carga a los rodillos de diámetro 30 *mm* adosados a él, lo que permite aplicar simétricamente las cargas *P/2* al espécimen en ensayo, garantizando la presencia de un momento flector M_f de valor constante como único esfuerzo actuante en la zona central (de longitud 300 *mm* entre rodillos), dado por la Ecuación (1):

$$M_f = \frac{P}{2}\frac{L}{4} = 0{,}075\,P \quad N\,m \tag{1}$$

La carga vertical *P* se aplicó en forma gradual y creciente hasta llegar al valor P_{crit} que provocó la falla por pandeo de las alas. En la Figura 4 se puede observar la deformación progresiva de una de las vigas al ir incrementando la carga, hasta llegar al colapso de la viga cuando $P = P_{crit}$.



Figura 4: Deformación progresiva de un perfil ensayado mostrando el pandeo de las alas



Figura 5: Distintos modos de deformación de los perfiles ensayados

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se ensayaron tres probetas de tamaño real. En el ensayo 1 las alas del perfil se deformaron una hacia afuera y la otra adentro (ver Figura 5); mientras que en los ensayos 2 y 3, las dos alas se deformaron hacia afuera. Los resultados de los ensayos se indican en la Tabla 1.

Tabla 1: Cargas críticas de pandeo $P_{crít}$ obtenidas en los ensayos

Número de ensayo	1	2	3
$P_{crít}$ [N]	27760	32520	32590

Al analizar los resultados de los ensayos se observa una diferencia del orden del 15 % entre los valores extremos. Tanto las diferencias entre los resultados de los ensayos como también entre los modos de pandeo, se deben fundamentalmente a las imperfecciones constructivas de los perfiles ensayados.

4. SOLUCIÓN ANALÍTICA

Para analizar el problema de estabilidad del equilibrio del componente mecánico en estudio, se recurre a las teorías vigentes de pandeo de placas [6, 7, 8]. En este caso se trata del fenómeno conocido como pandeo local que ocurre en algunos componentes de estructurales cuando son sometidos a tensiones de compresión o bien compresión - tracción combinada. Debido a que el componente estructural bajo estudio es una viga de sección U compuesta por elementos placa, el estudio del pandeo local se realiza considerando que:

a) El alma ubicada en la parte inferior está traccionada, por lo cual no presenta problemas de inestabilidad (ver Figura 1).

b) Las alas están sometidas a esfuerzos de flexo-compresión de modo que existe la posibilidad del pandeo local (ver Figura 5).

4.1. Tensión crítica en la parte superior de las alas

La tensión crítica de pandeo σ_{crit} de una placa sometida compresión o flexo-compresión es:

$$\sigma_{crít} = K \frac{\pi^2 E}{12\,(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{h}\right)^2 \qquad (2)$$

donde: K es un coeficiente adimensional que depende de las dimensiones de la placa y sus condiciones de borde, E es el módulo de elasticidad del material, ν es el módulo de Poisson, t es el espesor de la placa y h su altura. En las soluciones analíticas existentes, las condiciones de borde de los lados de las placas (tipo de apoyo) son: apoyado, empotrado o libre.

Las alas del perfil en estudio (Figura 1) tienen su lado superior libre y su lado inferior unido al alma. La condición del lado inferior es intermedia entre apoyado y empotrado, esto depende de los espesores de las placas concurrentes al punto y las condiciones de carga.

Para determinar el valor del coeficiente K de la Ecuación (2) se utiliza el procedimiento dado en la Ref. [8]. Es necesario determinar previamente la relación entre las tensiones en los bordes del ala, lo que depende del valor de los módulos resistentes en esos bordes ($W_{sup.}$, W_{inf}).

ISBN: 978-987-1676-63-7

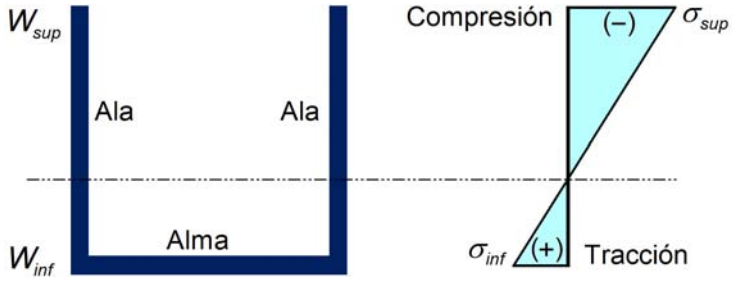


Figura 6: Tensiones en las alas de la sección del perfil

Relacionando las tensiones existentes en la parte superior e inferior de la sección del perfil, según se muestra en la Figura 6, se tiene:

$$\frac{\sigma_{inf}}{\sigma_{sup}} = \frac{M_f / W_{inf}}{M_f / W_{sup}} = \frac{W_{sup}}{W_{inf}} \tag{3}$$

donde: M_f es el momento flector aplicado en el tramo central de la viga de longitud 300 *mm*, ver Ecuación (1), W_{sup} es el módulo resistente de la parte superior de la sección del perfil y W_{inf} es el módulo resistente de la parte inferior de dicha sección.
Los módulos resistentes considerando viga de pared delgada resultan,

$$W_{sup} = \frac{t\,h^2\,(2b+h)}{3\,(b+h)} = 12{,}5 \text{x} 10^{-6}\ m^3; \qquad W_{inf} = \frac{t\,h\,(2b+h)}{3} = 25 \text{x} 10^{-6}\ m^3 \tag{4}$$

y la Ecuación (3) queda $$\frac{\sigma_{inf}}{\sigma_{sup}} = \frac{12{,}5 \text{x} 10^{-6}}{-25 \text{x} 10^{-6}} = -0{,}5 \tag{5}$$

Borde inferior apoyado: Caso 8 de la Tabla 3 del Capítulo 8 de la Ref. [8]:

$$x = \frac{\sigma_{inf}}{\sigma_{sup}} = -0{,}5 \quad \rightarrow \quad K = 0{,}57 - 0{,}19x + 0{,}06x^2 - 0{,}02x^3 = 0{,}6825 \tag{6}$$

Borde inferior empotrado: Caso 6 de la Tabla 3 del Capítulo 8 de la Ref. [8]:

$$x = \frac{\sigma_{inf}}{\sigma_{sup}} = -0{,}5 \quad \rightarrow \quad K = 1{,}60 - 0{,}37x + 0{,}13x^2 - 0{,}06x^3 = 1{,}825 \tag{7}$$

La tensión crítica de compresión en las alas se obtiene de la Ecuación (2) y se puede acotar usando los coeficientes para dos situaciones límites dadas en (6) y (7). En definitiva haciendo $E = 206000\ MPa$ y $\nu = 0{,}3$ se obtiene el siguiente intervalo:

$$79{,}5\ MPa \ \leq \ \sigma_{crít} \ \leq \ 212{,}6\ MPa \tag{8}$$

4.2. Determinación del modo de falla de la viga

Teniendo en cuenta la Ecuación (5), la tensión de mayor valor absoluto ocurre en la parte superior del alma (σ_{sup}), algo que también se observa en la Figura 6. Como la tensión crítica es menor que el valor de la tensión de fluencia del material (σ_f) se tiene:

$$W_{sup} < W_{inf} \ \Rightarrow \ \sigma_{sup} > \sigma_{inf} \ \Rightarrow \ \sigma_{falla} = \sigma_{sup} \ \Rightarrow \ \sigma_{falla} = menor\{\sigma_{crít}, \sigma_f\} \ \Rightarrow \ \boxed{\sigma_{falla} = \sigma_{crít}} \tag{9}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Teniendo en cuenta (9) se concluye que el modo de falla de la viga es el pandeo local de las alas:

$$\boxed{\sigma_{falla} = \sigma_{crít}} \quad \Rightarrow \quad \textbf{El modo de falla es el pandeo de las alas} \qquad (10)$$

ya que en un contexto de carga creciente las alas pandean antes de llegar a fluencia.

4.3. Carga crítica que produce la falla por pandeo de las alas

La tensión σ_{sup} de compresión actuando en la parte superior de las alas está relacionada con la carga aplicada P a través de las ecuaciones (1) y (4):

$$\sigma_{sup} = \frac{M_f}{W_{sup}} = \frac{0{,}075\,P}{12{,}5\text{x}10^{-6}} = 6000\ P \qquad \Rightarrow \qquad P = \frac{\sigma_{sup}}{6000} \qquad (11)$$

A partir del rango dado en la Ecuación (8) para la tensión crítica de pandeo $\sigma_{crít}$ de las alas se puede calcular el rango para la carga crítica de pandeo $P_{crít}$, teniendo en cuenta la Ecuación (11):

Borde inferior apoyado**:**
$$P_{crít} = \frac{\sigma_{crít}}{6000} = \frac{79{,}5\text{x}10^{6}}{6000} = 13250\ N \qquad (12)$$

Borde inferior empotrado**:**
$$P_{crít} = \frac{\sigma_{crít}}{6000} = \frac{212{,}6\text{x}10^{6}}{6000} = 35430\ N \qquad (13)$$

Resumiendo, el análisis analítico provee el siguiente rango para la carga crítica:

Resultado analítico: $\boxed{13250\ N \leq P_{crít} \leq 35430\ N}$ (14)

5. MODELO NUMÉRICO

Para el análisis numérico del componente mecánico ensayado, se utilizó el método de los elementos finitos empleando un software comercial [9]. Se modeló la viga de 700 *mm* de largo y de sección U, cuyas dimensiones se indican en la Figura 1.

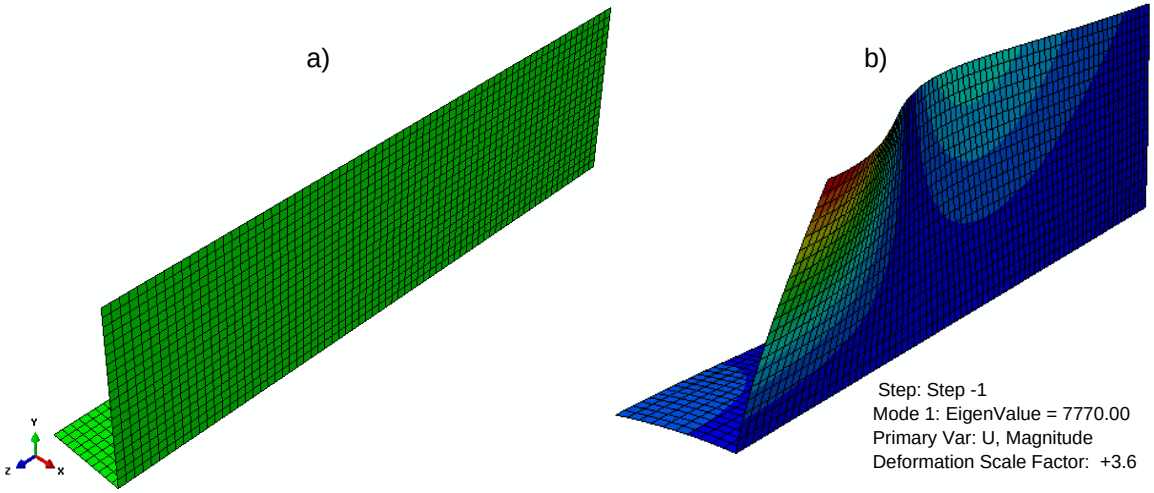


Figura 7: Modelado de la viga de perfil U con elementos finitos

Se consideró al material como elástico y se calculó la carga crítica de pandeo P_{crit} mediante el uso del módulo de pandeo del software. En la Figura 7-a se presenta la malla utilizada para modelar un cuarto de la viga, a fin de aprovechar la doble simetría existente, según los planos "x-y" y "y-z". La condición de apoyo deslizante se ubicó según los rodillos $ø_1$ (ver Figura 2). Y se definió una carga a lo largo de una línea que representa el contacto de los rodillos $ø_2$. Se utilizó el método de iteración por subespacios, permitiendo encontrar el autovalor asociado a la carga crítica y el correspondiente autovector asociado al modo de pandeo. En la Figura 7-b se muestra el primer modo de pandeo (amplificada x 3,6) y se reporta el valor de la carga crítica de 7770 *N* (un 25% del valor total). Por lo tanto la carga crítica de la viga es:

Resultado numérico: $P_{crít} = 4 \times 7770 = 31080 \quad N$ (15)

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Al comparar los resultados obtenidos en los ensayos con los de la solución analítica y del modelo numérico (ver resumen en Tabla 2), se observa que la solución analítica, proporciona un rango para la carga crítica del caso planteado, ya que se desconocen las condiciones reales de borde de las alas en el borde inferior. Tanto los resultados de los ensayos como el de la solución numérica se encuentran en el rango provisto por la solución analítica. Además, esos resultados se encuentran próximos al obtenido por la solución analítica considerando a las alas empotradas en el alma del perfil (35430 *N*).

Tabla 2: Carga crítica de pandeo P_{crit} obtenida con tres diferentes metodologías

Métodología	Ensayos 1	Ensayos 2	Ensayos 3	Modelo numérico	Solución analítica
$P_{crít}$ [*N*]	27760	32520	32590	31080	Entre 13250 y 35430

Es importante destacar que los resultados obtenidos representan una guía en la definición de los coeficientes adimensionales *K*, utilizados para la obtención de la carga crítica de pandeo P_{crit}.

Para este tipo de perfil y carga, la utilización del coeficiente adimensional *K* correspondiente a borde inferior apoyado es altamente conservativo. Un coeficiente *K* más adecuado se obtiene adoptando un valor intermedio entre los coeficientes correspondientes a borde inferior apoyado y borde inferior empotrado; y siendo más ajustado a la realidad dicho coeficiente se debería acercar al del caso borde inferior empotrado.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se proponen métodos destinados a la enseñanza del fenómeno de falla por pandeo local de componentes mecánicos conteniendo paredes delgadas que soportan cargas de flexo-compresión. Con este objetivo, se diseñó un problema típico con un perfil de pared delgada, que falla por pandeo local y presenta características adecuadas para el análisis y comprensión del fenómeno, la comparación de metodologías de cálculo y la discusión de resultados. Se cotejó la solución analítica existente en la bibliografía con el resultado provisto

ISBN: 978-987-1676-63-7

por un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos y valores obtenidos mediante ensayos experimentales de modelos en laboratorio con la presencia de los alumnos.

El material y los procedimientos definidos fruto del presente trabajo, se utilizaron como complemento de los conceptos desarrollados en las clases teórico-prácticas durante el estudio del pandeo de estructuras mecánicas. Resultó especialmente importante la integración de conocimientos y su aplicación a través de los ensayos experimentales propuestos. Los detalles de su ejecución fijan la atención del alumnado, plantean preguntas y requieren especial interpretación. Se cita aquí como ejemplo la posibilidad de observación de distintas formas de deformación, correspondiente al primer modo de pandeo, de acuerdo con los distintos grados de imperfecciones de los especímenes ensayados. La comparación de los resultados provenientes de los tres métodos citados (analítico, numérico y experimental), fomenta además el interés por los métodos científicos.

Desde el punto de vista didáctico, la implementación de los procedimientos descriptos ha mostrado un aumento notable en la motivación y una contribución a la rápida internalización del conocimiento.

Por último, los autores quieren subrayar que la implementación de este tipo de actividades docentes y la motivación que esto genera, no sólo en los alumnos sino también en los docentes, conduce a una mejor comunicación alumno – docente y a un aumento de la calidad de la enseñanza impartida debido al enfoque integral que se proporciona a las diferentes problemáticas que se abordan en la asignatura.

7. REFERENCIAS

[1] Heck O. et al. *Methods and Formulas for Calculating the Strength of Plate a Shell Constructions as Used in Airplane Design*. Luftfahrtforschung, Vol XI Nro.8, Munchen and Berlin, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Note 785, 1936.

[2] Gerard G. et al. *Handbook of Structural Stability, Part 1 – Buckling of Flat Plates*. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Note 3781, 1957.

[3] Brush D. et al. *Buckling of Bars, Plates and Shells*. McGraw Hill Companies, 1975.

[4] Escuela de Ingeniería Mecánica Electricista, Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, http://www.esc.ime.efn.uncor.edu/?page_id=240, 2016.

[5] *Ibertest Advanced Testing Solutions*, http://www.ibertest.es/, 2016.

[6] Jones R., Buckling of Bars, Plates and Shells, Bull Ridge Publishing, 2006.

[7] Ziemian R. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. Sixth Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[8] Massa et al. *Compendio de Cálculo Estructural para Ingeniería Mecánica.* Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, http://www.portal.efn.uncor.edu/ y http://www.cat.calc_est_2_im.efn.uncor.edu/, 2016.

[9] *Abaqus, Unified FEA product, Dassault Systèmes*, http://www.3ds.com/products-services/simulia, 2016.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FLEXION PURA Y MEDICIONES INDIRECTAS DE UN FLUJO VISCOSO ANÁLOGO

José Di Paolo, Darío R. Lattanzi y Mariano A. Cupelín

Cátedra Estática y Resistencia de Materiales
Departamento de Ingeniería Industrial – Facultad Regional Santa Fe – UTN
Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina
jdipaolo@bioingenieria.edu.ar

RESUMEN

Un objetivo de la enseñanza de las ciencias fácticas debe ser la experimentación y la demostración práctica de los fenómenos estudiados en el aula, más aún en carreras de Ingeniería. Por lo general, en las clases teóricas se plantean determinados fenómenos que se estudian y resuelven de modo idealizado, tal que sin la fase experimental se debilita su anclaje con la realidad de donde ha partido la motivación para su estudio. Es aquí donde la clase práctica de laboratorio se convierte en la clave para la correcta interpretación del alumno y por ende del aprendizaje. Sin embargo, hay disciplinas donde la experimentación se dificulta o directamente no está al alcance, pudiendo ser un paliativo para esta dificultad el uso de analogías.

Como en otras áreas de la Física, en el área de la Mecánica de Materiales también existen analogías y una de las más básicas es la que se presenta entre la línea elástica de un tramo de viga sometido a un momento flector constante y el perfil de velocidades de un flujo laminar entre placas paralelas sometido a un gradiente de presión constante. Esta analogía es muy útil de aprovechar: para comprobar experimentalmente las predicciones teóricas en flexión pura, para medir indirectamente flujos viscosos y para dar al alumno un enfoque integrador de la Mecánica de Materiales.

En este trabajo se presenta una actividad experimental donde se solicita una viga a flexión pura dentro del campo elástico, para medir las deformaciones máximas variando momentos flectores y dimensiones geométricas de barras de un material conocido. En virtud de la analogía, cada medición se convierte en una medición indirecta de la velocidad máxima de un flujo viscoso entre placas paralelas, que de otro modo sería muy difícil conocer por las dificultades de medición que entrañan las pequeñas dimensiones donde se producen estos fenómenos.

Palabras Claves: *Flexión pura, flujo laminar, didáctica experimental, metrología.*

1. INTRODUCCIÓN

Un objetivo de la enseñanza de las ciencias fácticas debe ser la experimentación y la demostración práctica de los fenómenos estudiados en el aula, más aún en carreras de Ingeniería. Particularmente, la experimentación en el campo de la Mecánica de Fluidos es escasa o nula debido a la falta de equipamiento que, por su costo, es privativo para la mayoría de las instituciones públicas. Por ello, se vuelve válido el desarrollo de equipos de bajo costo o la utilización de alternativas que permitan experimentar indirectamente; una de estas alternativas son las analogías. Una analogía es el reconocimiento de que una cosa es, se comporta o se describe como otra.

Puede decirse que las analogías ayudan a explicar, generalizar, formular hipótesis, modelar, validar y predecir; en lo académico, en lo científico y en lo pedagógico. A nivel pedagógico la analogía presenta una utilidad indudable porque permite aprender de lo ya aprendido a partir de situaciones análogas anteriores a la que se está estudiando. Asimismo, permite al estudiante sensibilizar lo abstracto y conocer a partir de lo conocido. A nivel científico ocurre lo mismo con las analogías, se especula sobre lo desconocido a partir del conocimiento establecido más análogo. Más precisamente, en el campo de la Física la analogía se da entre modelos matemáticos análogos para describir fenómenos del mismo tipo en escalas diferentes o bien fenómenos distintos en escalas distintas.

En el área de la Mecánica de Materiales existe una analogía entre la línea elástica de un tramo de viga recta sometido a un momento flector constante y el perfil de velocidades de un flujo puramente viscoso (laminar) entre placas paralelas sometido a un gradiente de presión constante [1]. Esta analogía es muy útil de aprovechar dado que el primer fenómeno se puede recrear en espacios a escala humana, mientras que el segundo no porque sólo se produce en escalas del orden del milímetro. La deformación máxima de la viga (flecha) es relativamente sencilla de medir mientras la velocidad máxima del flujo laminar es casi imposible de medir experimentalmente.

En este trabajo se presenta una actividad de laboratorio propuesta para alumnos de 3º año de Ingeniería Industrial de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (FRSF-UTN) que cursan en paralelo Estática y Resistencia de Materiales y Mecánica de los Fluidos. La actividad se basa en medir la flecha de un tramo de viga sujeto a un momento flector constante y con esa medición, obtener la velocidad máxima de un flujo viscoso análogo.

Se ensayaron tres tipos de vigas: dos barras macizas y una hueca, todas de sección circular y de dimensiones comerciales. Las mediciones son muy buenas en cuanto a las diferencias respecto a las predicciones teóricas y han permitido obtener mediciones indirectas de la velocidad máxima de un flujo, utilizando cualquier medición efectuada en cualquiera de las tres barras.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. OBJETIVOS Y FUNDAMENTOS

Para este trabajo se establecieron los siguientes objetivos generales y específicos:

Objetivos Generales

1. Motivar el aprendizaje mediante la utilización de un equipo experimental.
2. Contrastar por analogía conocimientos previos y nuevos.
3. Utilizar la matemática como herramienta esencial para idear una experiencia basada en analogía.
4. Contrastar los resultados experimentales con las predicciones teóricas.

Objetivos Específicos

a. Lograr un aprendizaje significativo en los temas de flexión pura y flujo puramente viscoso.

b. Lograr habilidades para la toma de datos, su organización y utilización.

c. Utilizar conceptos de Estática y Resistencia de Materiales, Mecánica de los Fluidos, Ecuaciones Diferenciales, Análisis Dimensional y Metrología.

2.1 Analogía

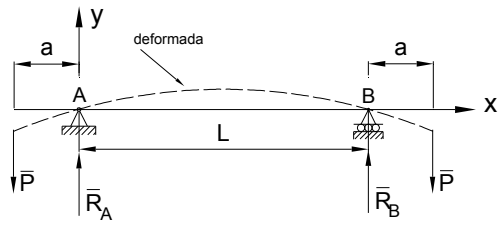
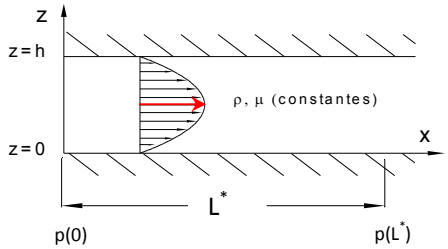
La analogía se plantea entre dos fenómenos distintos: la deformación de una viga debido a un momento flector constante y el flujo puramente viscoso (laminar) de un fluido impulsado a través de dos placas paralelas fijas, por un gradiente de presión constante. Las placas paralelas son infinitas (o de dimensiones indeterminadas) en la dirección transversal al plano de flujo (x,y) [2, 3]; no obstante, en la realidad es suficiente tomar la zona central de una caja de ancho mucho mayor que h. Tal como se discute profusamente en el trabajo de Di Paolo y col. [1], pueden resumirse en la tabla 1 los esquemas de ambos fenómenos y las ecuaciones gobernantes. El trabajo mencionado presenta el desarrollo analítico para la obtención de las ecuaciones gobernantes de los problemas análogos aquí evaluados. El proceso parte de la ecuación diferencial de cantidad de movimiento lineal para un medio continuo, primero particularizada para un sólido elástico lineal y luego para un fluido newtoniano e incompresible. Ambos análisis plantean materia continua en equilibrio, hecho que los autores presentan como causa de la analogía matemática.

En la ecuación diferencial (1) de la tabla 1, M_z es el momento flector e I_z el momento de inercia de la sección recta respecto al eje z, es decir el eje respecto al cual rota la sección recta haciendo posible la deformación y E es el módulo elástico del material. La doble integración de la ecuación diferencial (1) permite obtener la función $y(x)$ de la línea elástica conociendo la función $M_z(x)$. Si esta última es una función constante, la viga estará sometida a un estado de

flexión pura en todo el tramo en donde ello se verifique. Es decir, si $M_z(x)=M$ (constante), de la doble integración se obtendrá la expresión (2) [4, 5].

En la expresión (3), p es la presión, v_x la función velocidad y μ la viscosidad del flujo. La doble integración resulta en la expresión (4) donde el gradiente de presión ha sido expresado en términos de las presiones en la salida y en la entrada y el largo de las placas fijas, en razón de que necesariamente es constante [6].

Tabla 1: Resumen de los fundamentos teóricos

<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>$y'' = \frac{M_z}{E\ I_z}$ (1)</td><td>$\frac{d^2 v_x}{dz^2} = \frac{1}{\mu}\ \frac{dp}{dx}$ (3)</td></tr>
<tr><td>$y(x) = \frac{1}{2\ E\ I_z}\ M\ (x^2 - x\ L)$ (2)</td><td>$v_x = \frac{1}{2\ \mu}\ \frac{dp}{dx}\ (z^2 - z\ h)$ (4)</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\frac{x}{L} = \frac{z}{h} \Rightarrow z = \frac{h}{L}\ x$ (5)</td></tr>
<tr><td>$y(x) = \frac{1}{2\ E\ I_z}\ M\ (x^2 - x\ L)$ (2)</td><td>$v_x = \frac{1}{2\ \mu}\ \frac{\Delta p}{L^*}\ \left(\frac{h}{L}\right)^2\ (x^2 - x\ L)$ (6)</td></tr>
<tr><td>$v_x = \frac{E\ I_z}{M\ \mu}\ \frac{\Delta p}{L^*}\ \left(\frac{h}{L}\right)^2\ y(x)$ (7)</td><td>$v_{máx} = \frac{E\ I_z}{M\ \mu}\ \frac{\Delta p}{L^*}\ \left(\frac{h}{L}\right)^2\ f$ (8)</td></tr>
<tr><td>$f = \frac{M\ L^2}{8\ E\ I_z}$ (9)</td><td>$\frac{f}{L} = \frac{M\ L}{8\ E\ I_z}$ (10)</td></tr>
</table>

El mapeo (o cambio de variable) de la coordenada z para el flujo, en la coordenada x para la viga (ecuación (5)), permite reescribir la ecuación (2) y la (4) en términos de x (ver ec. (6)). Se vé en la ecuación (6) que por el mapeo aparece la longitud del tramo de viga sujeto a momento flector constante.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La relación miembro a miembro entre las expresiones (2) y (6) da como resultado la expresión (7) y, particularmente para los valores correspondientes a *L/2*, la expresión (8) muestra que con la medida de la flecha de la viga puede conocerse indirectamente la velocidad máxima del flujo.

Por último, la expresión (2) evaluada en *L/2* permite expresar la flecha de la viga según la expresión (9) que, dividiéndola miembro a miembro por *L*, deriva en la relación adimensional (10), válida para todas las vigas rectas de sección constante que se encuentren en la condición asumida en la tabla 1.

3. METODOLOGÍA

La analogía puede explotarse experimentalmente flexionando una o más vigas, midiendo la flecha en cada caso y utilizando dicha medición para, indirectamente, medir la velocidad máxima de un flujo en las condiciones de la tabla 1.

La figura 1 muestra el arreglo experimental efectuado sobre la mesa nivelada de una fresadora universal ubicada en el Laboratorio Mecánica de la FRSF, empleando como vigas a barras de acero inoxidable AISI 304, dos macizas, de 3/8” y 1/2” respectivamente y una hueca de 1/2“ de diámetro exterior. Los soportes simulando apoyos libres se fabricaron en “V”, de modo que las barras quedaran bien sostenidas a la vez que estos se fijaron con tuerca y contratuerca en las colas de milano de la mesada. Los momentos flectores se generaron con pesas calibradas colgando de distintos puntos, situados a distancias conocidas de los apoyos (ver parámetro *a* en la tabla 1). La deformación máxima o flecha fue medida en cada caso mediante un comparador centesimal situado exactamente en el centro de la barra.

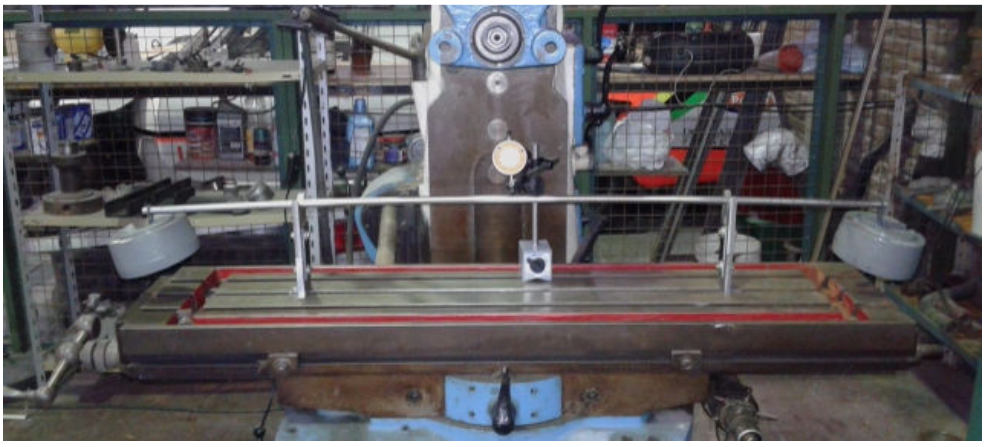


Figura 1: Fotografía del esquema experimental utilizado

ISBN: 978-987-1676-63-7

El proceso experimental implicó un protocolo para minimizar errores y asegurar la repetitividad de los resultados. Este protocolo consiste en:

1) Marcado de las barras: en su centro, en las secciones donde actuarán los apoyos y en las distintas posiciones donde se ubicarán las cargas.
2) Centrado y ajuste de apoyos en la mesada.
3) Puesta en cero del comparador centesimal sobre el centro de la viga sin carga.
4) Carga simétrica de la viga, variando sucesivamente las posiciones de las pesas y midiendo en cada caso la indicación de la aguja del comparador.

4. RESULTADOS

4.1 Flexión pura

Se realizaron varias mediciones sobre cada barra, pero por razones de extensión sólo se muestran los resultados obtenidos en una de esas mediciones, del mismo modo como realizan la experiencia y el informe los estudiantes. Teniendo en cuenta los parámetros materiales del acero empleado, las pesas utilizadas y la disposición geométrica elegida, en cada medición se mantuvieron constantes:

L = 0,700 m
E = 193x10^9 N/m^2
m_{pc} = 5,000 kg (masa de las pesas calibradas)
m_{sspc} = 0,069 kg (masa de los soportes de sujeción de pesas calibradas)
P = 5,069 kg x 9,80 m/s^2= 49,676 N (carga total)

En todos los cálculos se trabajó con un máximo de tres cifras decimales y los valores medidos se expresaron con cifras hasta la apreciación del instrumento utilizado. Los resultados de cuentas parciales fueron tronchados y aproximados por redondeo. Asimismo, para cada medición se cuantificó la diferencia de los resultados experimentales respecto de los teóricos a través de la siguiente expresión:

$$\Delta\% = \frac{f_{exp} - f_{teor}}{f_{teor}} . 100 \qquad (11)$$

donde f_{exp} representa la flecha medida y f_{teor} representa la predicción teórica de la flecha, dada por la expresión (9).

ISBN: 978-987-1676-63-7

Caso 1: barra de sección circular de diámetro 3/8" (D = 9,50x10^{-3} m, medido sobre la barra)

Tabla 2: Resultados de las mediciones sobre la barra de sección circular y diámetro 3/8"

a (m)	f_{teor} (m)	f_{exp} (m)	$\Delta_{\%}$	f_{teor}/L	f_{exp}/L
0,080	3,15x10^{-3}	3,11x10^{-3}	-1,27	4,50x10^{-3}	4,44x10^{-3}
0,100	3,94x10^{-3}	3,88x10^{-3}	-1,52	5,63x10^{-3}	5,54x10^{-3}
0,120	4,73x10^{-3}	4,66x10^{-3}	-1,48	6,76x10^{-3}	6,66x10^{-3}
0,140	5,52x10^{-3}	5,48x10^{-3}	-0,72	7,89x10^{-3}	7,83x10^{-3}

Caso 2: barra de sección circular de 1/2" (D = 12,70x10^{-3} m, diámetro medido sobre la barra)

Tabla 3: Resultados de las mediciones sobre la barra de sección circular y diámetro de 1/2"

a (m)	f_{teor} (m)	f_{exp} (m)	$\Delta_{\%}$	f_{teor}/L	f_{exp}/L
0,080	0,99x10^{-3}	0,99x10^{-3}	0,00	1,41x10^{-3}	1,41x10^{-3}
0,100	1,23x10^{-3}	1,24x10^{-3}	0,81	1,76x10^{-3}	1,77x10^{-3}
0,120	1,48x10^{-3}	1,49x10^{-3}	0,68	2,11x10^{-3}	2,13x10^{-3}
0,140	1,73x10^{-3}	1,74x10^{-3}	0,58	2,47x10^{-3}	2,49x10^{-3}
0,160	1,96x10^{-3}	1,98x10^{-3}	1,02	2,80x10^{-3}	2,83x10^{-3}
0,180	2,22x10^{-3}	2,24x10^{-3}	0,90	3,17x10^{-3}	3,20x10^{-3}
0,200	2,47x10^{-3}	2,50x10^{-3}	1,21	3,53x10^{-3}	3,57x10^{-3}
0,220	2,72x10^{-3}	2,75x10^{-3}	1,10	3,89x10^{-3}	3,93x10^{-3}
0,240	2,96x10^{-3}	3,00x10^{-3}	1,35	4,23x10^{-3}	4,29x10^{-3}

Caso 3: barra de sección circular hueca de 1/2" (D_{ext} = 12,70x10^{-3} m y D_{int} = 10,30x10^{-3} m, medidos en la barra)

Tabla 4: Resultados de las mediciones sobre la barra de sección circular hueca y diámetro exterior de 1/2"

a (m)	f_{teor} (m)	f_{exp} (m)	$\Delta_{\%}$	f_{teor}/L	f_{exp}/L
0,080	1,74x10^{-3}	1,76x10^{-3}	1,15	2,49x10^{-3}	2,51x10^{-3}
0,100	2,18x10^{-3}	2,15x10^{-3}	-1,38	3,11x10^{-3}	3,07x10^{-3}
0,120	2,61x10^{-3}	2,62x10^{-3}	0,38	3,73x10^{-3}	3,74x10^{-3}
0,140	3,05x10^{-3}	3,05x10^{-3}	0,00	4,36x10^{-3}	4,36x10^{-3}
0,160	3,48x10^{-3}	3,46x10^{-3}	-0,57	4,97x10^{-3}	4,94x10^{-3}
0,180	3,92x10^{-3}	3,91x10^{-3}	-0,26	5,60x10^{-3}	5,56x10^{-3}
0,200	4,35x10^{-3}	4,35x10^{-3}	0,00	6,21x10^{-3}	6,21x10^{-3}
0,220	4,79x10^{-3}	4,80x10^{-3}	0,21	6,84x10^{-3}	6,86x10^{-3}
0,240	5,22x10^{-3}	5,24x10^{-3}	0,38	7,46x10^{-3}	7,49x10^{-3}

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para la evaluación experimental de la expresión (10), es sencillo inferir que la igualdad teórica estricta se transforma en una igualdad aproximada. Es decir:

$$\frac{f_{exp}}{L} \cong \frac{M\ L}{8\ E\ I_z} \qquad (12) \qquad\qquad \frac{f_{exp}}{L} \cong \frac{f_{teor}}{L} \qquad (13)$$

La figura 2 muestra los resultados teóricos y experimentales graficados según la relación adimensional de la ecuación (13). Se observa que las gráficas de los resultados para las tres barras de sección circular, están muy próximas a la recta de pendiente 1 que representa la situación teórica ideal.

Como puede observarse en las tablas 2 a 4 y en la figura 2, hay diferencias en exceso y defecto entre los resultados de las mediciones y contraparte teórica. No obstante, ninguna de tales diferencias supera el 1,52% en exceso y el 1,48% en defecto, valores que vuelven confiables el proceso experimental y por lo tanto los valores medidos.

En todos los casos las mediciones corresponden al campo elástico, ya que, siendo el límite elástico del acero empleado de 195 MPa, las tensiones máximas para las barras de 3/8", 1/2" y hueca de 1/2", son: 82,6 MPa, 59,3 MPa y 104,5 MPa respectivamente. Esta comprobación asegura también el valor de lo realizado porque, sólo en el campo elástico, es válida la suposición de pequeñas deformaciones y por lo tanto la ecuación linealizada (9).

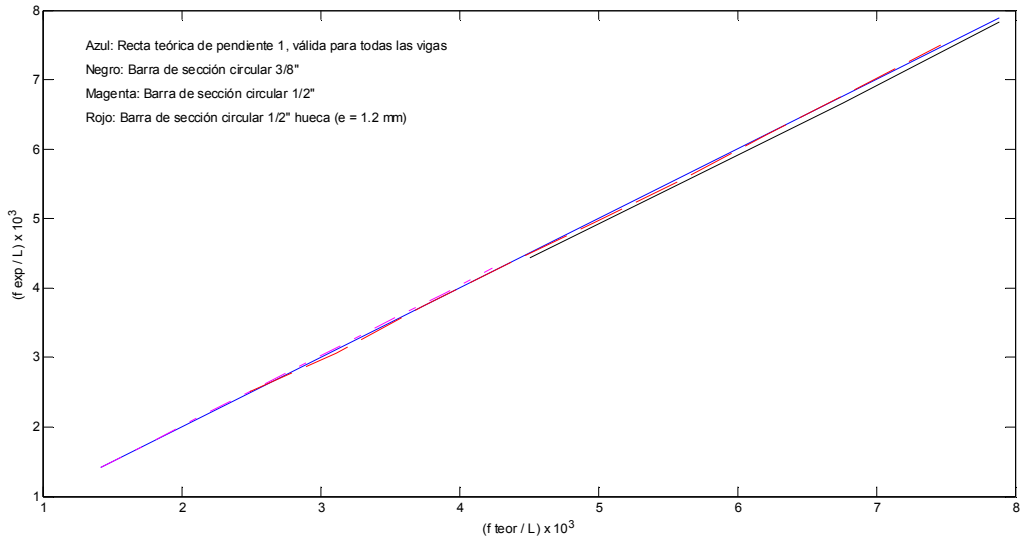


Figura 2: Resultados teóricos y experimentales graficados según la relación adimensional de la ecuación 2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4.2 Flujo puramente viscoso

Suponiendo un flujo puramente viscoso (tipo aceite Castrol) con los siguientes parámetros: $h = 10^{-3}$ m, $\Delta p = 10^3$ Pa, $\mu = 1$ Pa s, $\rho = 0{,}9\text{x}10^3$ kg/m^3 y $L^* = 10^{-2}$ m, la expresión teórica (4), para $z = h/2$, predice un valor para $v_{máx}$ de 1,25x10^{-2} m/s. Por su parte, el valor del número de Reynolds para los parámetros elegidos es $R_e = (\rho\ v_{máx}\ h) / \mu = 0{,}011$ (mucho menor a 2000) lo cual justifica la validez de las ecuaciones (3) y (4).

La tabla 5 condensa los valores de la medición indirecta de la velocidad máxima del flujo puramente viscoso supuesto (ver ecuación 8), a partir de las mediciones de la flechas realizadas sobre las tres barras. La diferencia porcentual está tomada de modo equivalente a la expresión (11), entre las velocidades máximas medidas y el valor teórico.

Tabla 5: Mediciones experimentales indirectas de la velocidad máxima de un flujo puramente viscoso, a partir de la flecha medida sobre tres vigas conocidas.

a (m)	M (Nm)	Barra de diámetro 3/8”		Barra de diámetro 1/2”		Barra hueca de diámetro 1/2”	
		$v_{máx\text{-}exp}$ (m/s)	$\Delta\%$	$v_{máx\text{-}exp}$ (m/s)	$\Delta\%$	$v_{máx\text{-}exp}$ (m/s)	$\Delta\%$
0,080	3,974	1,23 x10^{-2}	-1,60	1,25 x10^{-2}	0,00	1,26 x10^{-2}	0,80
0,100	4,968	1,23 x10^{-2}	-1,60	1,25 x10^{-2}	0,00	1,23 x10^{-2}	-1,60
0,120	5,961	1,23 x10^{-2}	-1,60	1,26 x10^{-2}	0,80	1,25 x10^{-2}	0,00
0,140	6,955	1,24 x10^{-2}	-0,80	1,26 x10^{-2}	0,80	1,25 x10^{-2}	0,00
0,160	7,949	----------	----------	1,25 x10^{-2}	0,00	1,24 x10^{-2}	-0,80
0,180	8,942	----------	----------	1,26 x10^{-2}	0,80	1,25 x10^{-2}	0,00
0,200	9,936	----------	----------	1,26 x10^{-2}	0,80	1,25 x10^{-2}	0,00
0,220	10,929	----------	----------	1,26 x10^{-2}	0,80	1,25 x10^{-2}	0,00
0,240	11,923	----------	----------	1,26 x10^{-2}	0,80	1,25 x10^{-2}	0,00

Puede observarse que todas las mediciones de la flecha, en distintas situaciones de carga, han servido para obtener un valor experimental de la velocidad máxima del flujo análogo, cada una arrojando una diferencia que en ningún caso ha superado el -1,60% en defecto y el 0,80% en exceso. En varios casos –incluso- esa diferencia ha sido cero.

Está claro que el procedimiento está influido por múltiples cálculos parciales que dependen además de mediciones previas, realizadas a su vez con ciertas incertezas. Entre ellas se encuentran los diámetros de las barras, la distancia entre apoyos, el pesaje de los soportes para la sujeción de las pesas y la delicada tarea de la puesta en cero del comparador. No

ISBN: 978-987-1676-63-7

obstante, las diferencias entre lo experimental y lo teórico en ningún caso han superado el 2%, con lo cual la propuesta y el trabajo poseen mérito para ser utilizado con los estudiantes.

El trabajo práctico ha sido muy bien valorado por los estudiantes y es posible, con los cambios que se requieran, realizar otras comparaciones basadas también en analogías.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un trabajo experimental basado en una analogía existente entre la deformación en flexión pura y el perfil de la velocidad en un flujo puramente viscoso entre placas paralelas fijas. El arreglo experimental implicó la realización de soportes libres para vigas cilíndricas con un amarre adecuado a las colas de milano de la mesada de una fresadora universal. El momento flector con el que se flexionaron tres vigas de acero inoxidable AISI 304, se logró aumentando el brazo de palanca de pesas calibradas.

Los valores de la flecha de cada viga y para cada momento flector, fueron listados y luego utilizados para, mediante la relación derivada de la analogía matemática entre ambos fenómenos, obtener los valores experimentales de la velocidad máxima de un flujo puramente viscoso.

Las diferencias de las mediciones y las predicciones teóricas están en valores tolerables, en ningún caso superiores al 2%, tanto para las flechas medidas directamente como para las velocidades medidas indirectamente. Ello pone de manifiesto la correcta disposición del esquema experimental, de las mediciones y el manejo numérico de los resultados.

Como práctica experimental dirigida a los estudiantes, la misma posee méritos relativos a: el uso concreto de material de laboratorio, la verificación de expresiones de cálculo de uso corriente en la ingeniería y la evaluación indirecta de un fenómeno a través de otro análogo.

6. REFERENCIAS

[1] J. Di Paolo, M. Berli y H. Tosone. Una actividad de cátedra basada en una analogía entre flexión pura y flujo laminar en el área de la Mecánica de Materiales. Publicado en las memorias del Segundo Congreso de Ingeniería Mecánica (2º CAIM), San Juan, Argentina, 16-19 Noviembre 2010.

[2] W.M. Lai, D. Rubin, E. Krempl, *Introduction to Continuum Mechanics*, Butterworth and Heinemann, Burlington, MA, 1993.

[3] S. Whitaker, *Introduction to Fluid Mechanics,* Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1981.

[4] L. Ortiz Berrocal, *Resistencia de Materiales*, Mc Graw Hill, Madrid, 1991.

[5] J.M. Gere; *Mecánica de Materiales*, 6º edición Ed. Thomson, Méjico, 2006.

[6] R. Fox, A.T. Mc Donald; *Introducción a la Mecánica de los Fluidos*, Mc Graw Hill, México, 1995.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Departamento de Ingeniería Industrial de la FRSF de la UTN el apoyo prestado para la realización del mismo. Asimismo, se agradece al Grupo CALIBRA de la misma institución, la cesión del instrumental de medición.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

NIVELES DE REPRESENTACIÓN EMPLEADOS EN ELECTROSTÁTICA POR ALUMNOS DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UTN - FRSF

Claudio Enrique[1,2]
[1] UDB Física - Departamento de Materias Básicas - Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina
correo-e: cenrique@frsf.utn.edu.ar
[2] Grupo de Investigación en Enseñanza de la Ingeniería (GIEDI). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe

RESUMEN

Este trabajo indaga sobre los niveles de representación mental que tienen los alumnos de Ingeniería Mecánica sobre un fenómeno particular de electrostática. Para ello, se realizó una experiencia práctica dentro de una perspectiva situación – problema, que consistió en someter un chorro de agua continuo y delgado a un campo electrostático externo. Posteriormente se les pidió a los alumnos de Física II que escriban y argumenten el fenómeno ocurrido, utilizando todas las herramientas que consideren necesarias. Se considera la definición de la situación – problema según Meirieu (1998): es una situación didáctica en la que se propone al sujeto una tarea que no pueda lograrse sin efectuar un aprendizaje preciso; y este aprendizaje, que constituye el verdadero objetivo de la situación-problema, se va a producir al superar los obstáculos en la realización de la tarea. El objetivo es analizar si los alumnos superan el obstáculo epistemológico de la experiencia práctica empleando los niveles macroscópico, microscópico y simbólico de pensamiento, evidenciado mediante la escritura. Estos tres niveles fueron propuestos por Johnstone (1991) para las ciencias naturales; y si bien su intención particular fue para la Química, sostenemos que también es posible su uso en la Física. También se reconoce a esta experiencia como punto de partida para un aprendizaje significativo, coincidiendo con Cachapuz (1999) que considera que este tipo de aprendizaje se puede dar planteando situaciones problema relacionadas preferentemente a contextos reales que despierten la atención del estudiante y que se inserten en la temática curricular. En este trabajo se intenta averiguar cuáles son los niveles representacionales empleados por los estudiantes. Las conclusiones preliminares indican que los alumnos tienen muchas dificultades en involucrar los tres niveles al realizar un análisis científico.

Palabras Claves: *Enseñanza de las Ciencias; Física; Electrostática; Niveles Representacionales.*

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, y desde hace un tiempo, ya nadie discute sobre la necesidad de que la enseñanza de las ciencias debe ser más auténtica, es decir, que se encuentre más próxima a la manera de cómo es construida la misma [1]. Dicho de otro modo, para que se favorezca el desarrollo de un conocimiento, se debe ayudar e incentivar al alumnado para que comprenda mejor el mundo y su entorno, facilitando la búsqueda y la interpretación de diversas fuentes de información y fomentando en él una postura crítica en su medio, situándose alejado de la memorización de hechos, ecuaciones y procedimientos.

Para los fines de la educación en ciencias, ésta debe ser entendida como aquella que hace que el alumno comparta significados en el contexto de las ciencias e interprete el mundo desde el punto de vista de las ciencias, generando nuevas capacidades representacionales que hagan posibles nuevas formas de conocimiento que se alejen de la inmediatez de los conocimientos intuitivos [2,3].

En la perspectiva de la investigación en educación en ciencias se considera importante conocer cómo los estudiantes construyen los conceptos científicos, qué tipo de representaciones construyen, qué procesos cognitivos ocurren, y cómo asimilan y comprenden sus significados, ya que esto permitiría conocer los cambios cognitivos o de desarrollo conceptual como una construcción y discriminación de significados [4,5], y guiar el diseño de modelos de enseñanza que permitan un mejor aprendizaje del conocimiento científico [6].

En consecuencia, creemos que una de las formas de contribuir a una enseñanza de las ciencias es fundamentándola en actividades de modelación. “La construcción de modelos es una actividad poderosa para enganchar a los alumnos en actividades encaminadas a “hacer ciencia”, “pensar sobre ciencias” y desarrollar “pensamiento científico y crítico” [7].

Es reconocido el papel de la formación experimental en el currículo de las ingenierías como un requerimiento imprescindible para alcanzar los objetivos propuestos en estas carreras, tanto en la etapa inicial - Ciclo Básico - como en las disciplinas más específicas. La experimentación es un componente imprescindible para el aprendizaje del objeto de estudio de las ciencias, sirve de fuente de motivación a los estudiantes y, además, contribuye de diferentes formas a la adquisición, consolidación, sistematización y generalización de los conocimientos [8].

2. EL CASO DE LA ELECTROSTÁTICA

El Electromagnetismo es una ciencia abstracta debido a la imposibilidad de acceso a la observación directa de sus objetos de estudio. Por ello, es necesario aceptar que en los fenómenos electromagnéticos existen efectos “que se originan por causas no definibles

ISBN: 978-987-1676-63-7

sensorialmente ni directamente observables, (electrización, imantación), sino sólo detectables de forma indirecta" [9].

Un aprendizaje significativo de conceptos científicos claves, como en nuestro caso el de Campo Electrostático, es una condición necesaria para la formación científica de los estudiantes, su comprensión de los fenómenos físicos y el conocimiento de principios que sustentan diversas aplicaciones tecnológicas.

Los docentes de Física de los ciclos básicos universitarios compartimos la idea de que el concepto de Campo Eléctrico representa un obstáculo para los estudiantes, fundamentalmente cuando ellos ponen en práctica sus conocimientos en situaciones problemáticas. Es habitual "…que los estudiantes encuentren serias dificultades en la adquisición de este concepto teniendo en cuenta su grado de abstracción, el conjunto de significados previos sobre los que se organiza y las cuestiones que pueden derivarse de una presentación acumulativa, acrítica y aproblemática, que obstruyen los procesos constructivos" [10].

Las dificultades más evidentes en la conceptualización del Campo Electrostático corresponden, según Alzugaray (2009) [10], a deficientes conocimientos e interpretaciones del algebra vectorial; a representaciones gráficas y simbólicas; y a diferentes niveles de pensamiento alcanzados por los estudiantes, incluyendo sus conocimientos previos. "Muy probablemente, estos problemas de aprendizaje que se presentan en la naturaleza eléctrica de la materia y, en particular, en el concepto de campo eléctrico, puedan atribuirse…a ideas previas de los estudiantes derivadas de un análisis "superficial" de las experiencias sensoriales relativas a Electrostática" [11]. También se pueden adjudicar a una deficiente familiarización de los estudiantes en los métodos y contenidos de la ciencia [12, 13].

Cuando se trabaja con la Electrostática y en particular con la carga eléctrica, es inevitable relacionarlo con conceptos asociados al átomo. Para ello, se debe tener en cuenta que la materia tiene una constitución corpuscular o no continua, y que los átomos – los corpúsculos – están constituidos por partículas más pequeñas, algunas de las cuales están cargadas. "Para ello sería necesario, en primer lugar, adoptar una visión microscópica de la materia… Entonces, conocida la existencia de dos tipos de cargas, éstas habrían de ser identificadas también como partículas "microscópicas" y ubicarlas en los átomos, lo que exige abordar cómo es el átomo por dentro" [9].

Por lo tanto, su enseñanza tiene como uno de sus principales desafíos favorecer la comprensión en torno al supuesto de una determinada realidad que debe ser modelada a través de diferentes modos de representación. Por ello, los estudiantes deben desarrollar habilidades para transitar entre estos modos de representación y comprender las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos en contextos diferentes. Estas habilidades son difíciles de ser desarrolladas [14], pues las

ISBN: 978-987-1676-63-7

explicaciones de los fenómenos y procesos están casi siempre en el nivel sub-microscópico que no pueden ser observados, pero sí descritos y explicados con modelos mentales, muchas veces expresados a través de símbolos. Sin embargo, investigaciones en esta área evidencian, por ejemplo, que los alumnos son capaces de operar mentalmente en los niveles macro y simbólico, pero encuentran dificultades en relacionarlos con las representaciones equivalentes al nivel microscópico [15, 16, 17]; que los expertos son mucho mejores que los principiantes para transformar un modo de representación en otro [18]; y que estudiantes inexpertos, que no hacen uso de múltiples representaciones, utilizan aquella que les parece más familiar o simplificada [19]. También es importante considerar las ideas o información que manejan los alumnos, para lo cual se deben "…desarrollar actividades específicamente dedicadas a que analicen y discutan hasta qué punto son adecuadas cada una de ellas" [9].

Por ello, sostenemos la idea de que aprender el Electromagnetismo consiste en hallar sentido a lo que es invisible e intocable. Por lo tanto, el uso de representaciones en su enseñanza debe ser inherente al proceso de enseñanza - aprendizaje, y "que las relaciones entre los tres niveles de representación – microscópico, macroscópico y simbólico– son esenciales para el desarrollo del conocimiento de los estudiantes y para que comprendan el proceso de construcción de la ciencia" [7]. En este sentido, creemos que el uso de modelos macroscópicos; microscópicos, y simbólicos en la enseñanza de la Electrostática puede contribuir a facilitar la visualización, es decir, la formación de imágenes mentales de entidades abstractas y, a partir de ello, la comprensión de la naturaleza, y sus propiedades y comportamientos.

3. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de este trabajo fue indagar si los alumnos de Ingeniería Mecánica que cursan la materia Física II tienen la capacidad de emplear los tres niveles representacionales (macroscópico; microscópico; y simbólico) según Johnstone (1991) [20], en una experiencia de Electrostática. Para ello, se consideró emplear una situación – problema según Meirieu (1988) [21], que es una situación didáctica en la que se propone al sujeto una tarea que no pueda lograrse sin efectuar un aprendizaje preciso. Creemos que este aprendizaje, que constituye el verdadero objetivo de la situación - problema, se va a producir al superar los obstáculos en la realización de la tarea.

También se reconoce a esta experiencia como punto de partida para un aprendizaje significativo, coincidiendo con Cachapuz (1999) [22], que considera que este tipo de aprendizaje se puede dar planteando situaciones problema relacionadas preferentemente a contextos reales que despierten la atención del estudiante y que se inserten en la temática curricular.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Respecto a la población estudiantil a ser investigada, sabemos que los contenidos preliminares básicos asociados a la experiencia de laboratorio – átomo; interacción y fuerza; Ley de Coulomb y Campo Eléctrico - han sido desarrollados en las materias Química General, Física I, y Física II de la carrera de Ingeniería Mecánica. Sin embargo, no tenemos evidencia objetiva de que dicho aprendizaje haya sido significativo y no memorístico, de modo que pueda ser "útil" para los conocimientos posteriores.

La experiencia problemática fue realizada al final del Trabajo Práctico denominado Experiencias Electrostáticas I, cuyos objetivos son analizar los fenómenos relacionados con los conceptos teóricos de carga eléctrica; electrización de materiales por contacto y por inducción; Ley de Coulomb; e influencias de un Campo Electrostático sobre la materia.

La misma consistió en exhibir a los alumnos cómo se afecta un chorro fino de agua - que cae desde una bureta por acción de la gravedad - por medio de una barra de un material dieléctrico frotada con un paño de lana (primero de acrílico y luego de PVC). El experimento mostró que el chorro se desvió por la acción del campo electrostático, y se les pidió a los alumnos que describan el fenómeno desde un punto de vista macroscópico y microscópico de manera individual, dándole un tiempo máximo de treinta minutos. La intención fue vislumbrar si los sujetos indagados hacían referencia al concepto de dipolo afectado por un campo electrostático externo, el cual había sido explicado en las clases de teoría.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

La muestra incluyó a una comisión conformada por 26 alumnos, siendo 21 los que respondieron la propuesta educativa (80,8%). Ha llamado la atención la respuesta de uno de los estudiantes que no respondió, indicando: "No lo sé. No entiendo".

Las categorías escogidas en base a las respuestas halladas fueron las siguientes:

- Uso de lenguaje escrito. Categorías: Si / No. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1;

Tabla 1: Uso de lenguaje escrito

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
No	5	19,2	19,2
Si	21	80,8	100,0

- Uso de gráficos. Categorías: Si / No. Ver los resultados hallados en la Tabla 2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2: Uso de gráficos

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
No	18	69,2	69,2
Si	8	30,8	100,0

- Explicación. Categorías: Correcta / Incompleta / Incorrecta / No. Los resultados hallados se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3: Explicación

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Correcta	6	23,1	23,1
Incompleta	13	50,0	73,1
Incorrecta	2	7,7	80,8
No	5	19,2	100,0
Total	26	100,0	

En base a los conceptos vertidos en la explicación, se consideraron:

- Presencia de dipolos. Categorías: Si / No. Ver los resultados obtenidos en la Tabla 4.

Tabla 4: Presencia de dipolos

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
No	16	61,5	61,5
Si	10	38,5	100,0
Total	26	100,0	

- Presencia de Campo Eléctrico (E). Categorías: Si / No. En la Tabla 5 se presentan los resultados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 5: Presencia de Campo Eléctrico

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
No	16	61,5	61,5
Si	10	38,5	100,0
Total	26	100,0	

- Presencia de Fuerzas de atracción y/o de repulsión (F). Categorías: Si / No. Para ver los resultados en este ítem, consultar la Tabla 6.

Tabla 6: Presencia de Fuerzas de Atracción y/o de Repulsión

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
No	6	23,1	23,1
Si	20	76,9	100,0
Total	26	100,0	

- Presencia de Inducción. Categorías: Si / No. Los resultados hallados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Presencia de Inducción

Categorías	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
No	22	84,6	84,6
Si	4	15,4	100,0
Total	26	100,0	

Los dos primeros conceptos justifican el comportamiento del agua debido al efecto de una varilla dieléctrica cargada. La presencia de fuerzas de atracción y/o de repulsión hace referencia al concepto primario de interacción entre partículas cargadas, el cual fue instruido en el inicio de la materia Física II. Finalmente, el concepto de inducción es más abarcativo en relación a la

ISBN: 978-987-1676-63-7

interacción a distancia. Los conceptos asociados a las categorías relacionadas con dipolos, Campo Eléctrico, e inducción, están totalmente referenciados a la materia Física II.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Estos resultados hallados de manera preliminar indican que:

a. la mayoría respondió de manera escrita a la consigna planteada de manera problemática (80,8%);

b. sólo 8 alumnos (30,8%) emplearon gráficos como complemento de las explicaciones escritas;

c. de acuerdo a las explicaciones dadas, 6 alumnos (23,1%) contestaron de manera correcta y completa; 13 alumnos (50%), lo hicieron de manera incompleta (o parcialmente correcta); 5 (19,2%) no respondieron; y 2 (7,7%) lo hicieron de manera incorrecta. En la segunda categoría se consideraron a aquellos alumnos que en general describen la experiencia, aunque no la explican en base a los conceptos desarrollados. Dentro de los que respondieron de manera incorrecta, hubo un alumno que explicó que el comportamiento del agua se debe a la presencia de impurezas, aunque sin especificar la naturaleza de las mismas.

d. 10 alumnos hicieron explícita la presencia de dipolos (38,5%). No obstante ello, se debe mencionar que hubo presencia de errores al respecto, tales como un alumno que dibuja erróneamente la distribución asimétrica de cargas en el mismo. Por otro lado, hubo dos alumnos que citan la polarización del dieléctrico – agua – sin explicitar la presencia del dipolo.

e. 12 alumnos (46,2%) indican la presencia de un campo electrostático (**E**) que afectan al chorro de agua.

f. Por otro lado, 20 alumnos (76,9%) hacen referencia a la presencia de fuerzas de atracción y/o de repulsión. Es evidente que el concepto asociado a E no está tan incorporado a los alumnos como el de Fuerza.

g. Finalmente, sólo 4 alumnos (15,4%) expresan de manera explícita la presencia de un proceso de inducción electrostática. De hecho, dos de estos alumnos asocian por analogía la experiencia realizada con una de las actividades en el TP de Experiencias Electrostáticas I, cuando emplean el péndulo electrostático.

Respecto al uso del lenguaje escrito versus el uso de gráficos, los resultados obtenidos son los siguientes:

- el 30,8% (8 alumnos) hace uso de manera correcta en ambos casos;

- el 50% hace uso de la escritura, pero no usa gráficos;

ISBN: 978-987-1676-63-7

- el 19,2% no hace empleo de ninguna de las dos;

- no existen alumnos (0%) que sólo empleen gráficos.

En relación a la respuesta correcta, las herramientas empleadas adecuadamente indican los siguientes resultados presentados en la Tabla 8, donde figuran la cantidad de alumnos – entre paréntesis, los porcentajes -:

Tabla 8: Cantidad y porcentajes de respuestas correctas

Uso de lenguaje escrito	Uso de gráficos	Presencia de dipolos	Presencia de E	Presencia de F	Presencia de Inducción
6 (23,1%)	5 (19,2%)	6 (23,1%)	5 (19,2%)	6 (23,1%)	3 (11,5%)

Para finalizar, y según las categorías empleadas en esta indagación, se puede considerar de manera preliminar que 6 alumnos (23,1%) han logrado desarrollar niveles de representación mental empleados en las explicaciones usando los niveles macroscópico, microscópico, y simbólico del fenómeno presentado de manera problemática en el laboratorio de Física.

6. CONCLUSIONES

Creemos firmemente que la educación en las ciencias experimentales debe estar basada en un aprendizaje significativo de la misma, y que además incorpore la manera en que dicha ciencia es construida. Ello implica el aprovechamiento de herramientas cognitivas asociadas a la construcción de modelos en el alumnado, diseñadas para hacer usos de situaciones – problemas en contextos reales, y consideradas como obstáculos epistemológicos. La idea es que los alumnos construyan sus conocimientos articulando sus saberes previos – provenientes de distintas fuentes entre las cuales se incluyen las académicas – junto a los nuevos conceptos vertidos en las materias que están cursando. Para el caso nuestro, el de la Electrostática, es necesario que los estudiantes logren una articulación de modelos macroscópicos; microscópicos, y simbólicos en su enseñanza, para que pueda contribuir a facilitar la formación de representaciones de entidades abstractas y, a partir de ello, la comprensión de la naturaleza, sus propiedades y sus comportamientos, mediante el uso de un modelo.

Este trabajo de investigación, si bien de carácter introductorio, llegó a la conclusión de que este proceso no es nada sencillo ni es muy frecuente entre los estudiantes. Por otro lado, existen muchas razones que pueden servir de guía para investigaciones futuras: la búsqueda de mayor información sobre las características del alumnado; la articulación de materias básicas tales como

ISBN: 978-987-1676-63-7

la Química y la Física; o la continuación de esta indagación por más tiempo y con herramientas de carácter etnográfico como las entrevistas.

Lo que queda claro es que si tenemos el objetivo de emplear métodos asociados a la "realidad" de las ciencias experimentales, debemos poner en debate la situación actual de las mismas, intentando realizar investigaciones. Ello implica trabajar sobre el diseño y desarrollo de estrategias didácticas, y finalmente evaluarlas de manera rigurosa. Sólo así podremos indicar el camino a seguir para formar profesionales que puedan "hablar de" y "hacer" ciencias, en un mundo que necesita profesionales competentes para los nuevos desafíos .

7. REFERENCIAS

[1] Gilbert, J. K. *Models and Modeling: Routes to a more authentic science education*. International Journal of Science and Mathematics Education, (2), 115-130, 2004.

[2] Moreira, M.A. *La investigación en educación en ciencias y la formación permanente del profesor de ciencias.* Congreso Iberoamericano de Educación en Ciencias Experimentales, 6 al 10 de junio de 1998, La Serena, Chile.

[3] Pozo, J.I. y M.A. Gómez Crespo. *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*. Morata, Madrid, 1998.

[4] Pozo, J.I. *Más allá del cambio conceptual: El aprendizaje de la ciencia como cambio representacional*. Enseñanza de las Ciencias, 17 (3), 513- 520, 1999.

[5] Moreira, M.A. *Aprendizaje significativo: teoría y práctica*. Visor, Madrid, 2000.

[6] Llancaqueo Henríquez, A., Caballero Sahelices, M. C., y Moreira, M. A. (2003). *El concepto de campo en el aprendizaje de la física y en la investigación en educación en ciencias*. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias. Ourense. 2, (3), 227-253, 2003.

[7] da Silva Justi, R., Queiroz, A. S., y Mendonça, P. C. (2012). *Contribuciones de la enseñanza fundamentada en modelación para el desarrollo de la capacidad de visualización*. Algunas aproximaciones a la investigación en educación en enseñanza de las Ciencias Naturales en América Latina, 155-174, 2012.

[8] Galíndez Enrique, E. y Molina Treviño, A. *Propuesta de formación experimental en el área de las estructuras*. 2001. Disponible en: http:// www.caedi.org.ar/pcdi/Area%206/6-645.pdf. [Consultado en marzo 30 del 2016].

[9] Criado, A. M., & de León, P. C. *Obstáculos para aprender conceptos elementales de electrostática y propuestas educativas.* Investigación en la Escuela, (47), 53-63, 2002.

[10] Alzugaray de la Iglesia , G. (2009). *Variables que afectan la comprensión del concepto de campo eléctrico*. Enseñanza de las Ciencias, Número Extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona, 1929-1932, 2009.

[11] Furió-Mas, C., y Aranzabal, J. G. (1998). *Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad*. Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas, 16(1), 131-146, 1998.

[12] Gil, D. y Carrascosa, J. *Science learning as aconceptual and methodological change*. European Journal of Science Education, 5, pp. 70-81, 1985.

[13] Galili, I. *Mechanics background influences students'conceptions in electromagnetism*. International Journal of Science Education, 17(3), pp. 371-387, 1995.

[14] Johnstone, A. H. *Macro- and microchemistry*. The School Science Review, 64 (227), 377-379, 1982.

[15] Gómez Crespo, M. Á., Pozo, J. I., y Gutiérrez Julián, M. S. *Enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos*. Educación química, 2004.

[16] Talanquer, V. *Construyendo puentes conceptuales entre las varias escalas y dimensiones de los modelos químicos*. Educación Química, 5, 11-17, 2010.

[17] Carpintero, C. C., Cortés, M. A., & Salazar, M. D. C. M. *Red Conceptual en la Enseñanza de la Química.* Anfei digital, 2015.

[18] Kozma, R. B. y Russell, J. *Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena*. Journal of Research in Science Teaching, 34 (9), 949 - 968, 1997.

[19] Treagust, D. F. y Chittleborough, G. *Chemistry: a matter of understanding representations*. Subject-Specific Instructional Methods and Activities (8), 239-267, 2001.

[20] Johnstone, A.H. *Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem.* J. Computer Assisted Learning, Vol. 7, pp 75-83, 1991.

[21] Meirieu, P. (1988). *Aprender... Sim, mas como?.* Artmed, Porto Alegre, 1988.

[22] Cachapuz, A. *Epistemologia e ensino das ciências no pós mudança conceptual: análise de um percurso de pesquisa*. Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 1 al 4 de septiembre, Valinhos, SP, Brasil, 1999.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

HACIA UN MODELO DE FORMACIÓN POR COMPETENCIAS EN LA ASIGNATURA MECANISMOS Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS

Haupt, M. C. [1], **Kowalski, V. A.** [2] **y Beck, C. R.** [3]

[1] Dpto. de Ing. Electromecánica – correo-e: haupt@fio.unam.edu.ar
[2] Dpto. de Ing. Industrial – correo-e: kowal@fio.unam.edu.ar
[3] Dpto. de Ing. Electromecánica – correo-e: beck@fio.unam.edu.ar
[1,2 y 3] Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Misiones
Rosas 325, Oberá, Argentina

RESUMEN

Un equipo docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, a través de un proyecto de investigación, que concluyó en 2014, formuló y aplicó un Modelo de Formación por Competencias en una asignatura de la carrera Ingeniería Industrial. Este modelo se apoya sobre tres pilares: la Formulación de Competencias a desarrollar, la Mediación Pedagógica y el Sistema de Evaluación de Competencias. En 2015 se inicia un nuevo proyecto con el objetivo de desarrollar un modelo general que pueda ser aplicado a todas las asignaturas de las cuatro carreras de ingeniería que ofrece la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. Se han seleccionado ocho asignaturas, entre las cuales se encuentra Mecanismos y Elementos de Máquinas, que se dicta para las carreras Ingeniería Electromecánica e Ingeniería Industrial. La formulación de las competencias se ha realizado en base a los aportes de Tobón (2013), entre otros, en tanto para el sistema de evaluación de competencias el referencial más importante es el de Roegiers (2007). Actualmente se está completando la primera fase del proyecto, que incluye desde la nivelación de saberes sobre aspectos pedagógicos y de formación por competencias, hasta la formulación de éstas, entre otras actividades. El objetivo del presente trabajo es presentar resultados parciales de la implementación del proyecto en lo que se refiere a la asignatura Mecanismos y Elementos de Máquinas. La metodología se basa en un enfoque mixto, que combina los enfoques cualitativos y cuantitativos. Las principales conclusiones obtenidas hasta el momento señalan que es preciso un cambio del rol del docente, de transmisor a facilitador de contenidos, y que la adecuada formulación de competencias posibilitará una revisión de contenidos para un tratamiento más preciso de los mismos objetivando la formación de ingenieros competentes (CONFEDI, 2007).

Palabras Claves: *formación por competencias; formación de ingenieros; mecanismos y elementos de máquinas.*

1. INTRODUCCIÓN

La Formación por Competencias se ha transformado en un tema difícil de ser soslayado, no solamente a nivel nacional, sino particularmente a nivel iberoamericano, como queda evidente en los documentos del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) [1] y de la Asociación Iberoamericana de Entidades de Enseñanza de la Ingeniería (ASIBEI) [2]. CONFEDI ha establecido Competencias Genéricas, separadas en cinco Tecnológicas e igual cantidad de Sociales, Políticas y Actitudinales, aunque no se ha avanzado sobre las Competencias Específicas [1] para cada titulación de ingeniería. A pesar de la polisemia existente y de la evolución teórica que hubo desde 2007 en torno al concepto de Competencia, la definición que ha propuesto CONFEDI [1]: "Competencia es la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales", sigue en plena vigencia. Aún más, se ha fortalecido a partir de la "Declaración de Valparaíso" en noviembre de 2013 cuando ASIBEI toma como propia esta definición y además adopta tanto el esquema como el listado de CG de CONFEDI, que de por sí marca un distintivo respecto de otros referenciales.

Un equipo docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) comenzó con una serie de experiencias piloto que derivaron en la implementación de un proyecto de investigación a partir de 2011. Mediante este proyecto, que concluyó en 2014, se formuló y aplicó un Modelo de Formación por Competencias con resultados muy positivos en la asignatura de la carrera de Ingeniería Industrial. Este Modelo se apoya sobre tres pilares fundamentales: la Formulación de Competencias a desarrollar, la Mediación Pedagógica (Selección de Métodos y Modalidades de Enseñanza) y el Sistema de Evaluación de Competencias [3].

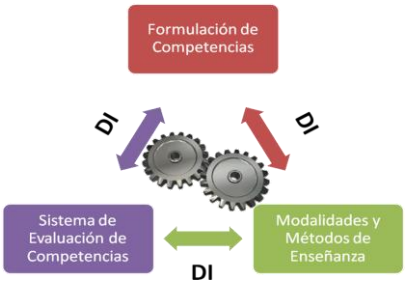


Figura 1: Estructura general del Modelo de Formación por Competencias implementado en la Facultad de Ingeniería de la UNaM (Fuente: Elaboración Propia)

ISBN: 978-987-1676-63-7

Si bien este modelo "funciona" eficientemente en una asignatura, y además está en permanente revisión y mejora, extrapolarlo en forma directa a otras asignaturas con características diferentes, sin hacer un análisis previo, puede conducir a formulaciones inconsistentes con la realidad de cada asignatura. Es preciso entonces ver qué impacto tienen ciertas características objetivas de cada asignatura en el primer modelo y realizar los ajustes pertinentes. Mediante ello, se puede lograr un modelo general que sí puede ser replicado en cualquier asignatura, inclusive de otras carreras. Por esta razón a partir de 2015 se inicia un nuevo proyecto que incluye ocho asignaturas las cuales han sido seleccionadas de manera que se contemplen la mayor variedad de características objetivas diferentes. Entre estas asignaturas se encuentra Mecanismos y Elementos de Máquinas (en adelante se hará referencia a esta asignatura simplemente como Mecanismos), que se dicta para las carreras Ingeniería Electromecánica e Ingeniería Industrial. Una de las características de análisis es la "Pertenencia a una o más carreras". Este factor puede resultar crítico a la hora de definir competencias específicas y resultados de aprendizaje para una asignatura en tanto ésta sea común a más de una carrera. A partir del análisis correspondiente se podrá evaluar qué ajustes hay que hacer al modelo en función de las características señaladas. El objetivo del presente trabajo es presentar resultados parciales de la implementación del proyecto en lo que se refiere a la asignatura Mecanismos.

2. BREVES ASPECTOS METODOLÓGICOS

Si bien la investigación general del proyecto se realiza bajo el paradigma pragmático [4], la estrategia que se está utilizando aquí es el estudio de caso simple, junto al análisis de la práctica interpretativa y la investigación participativa cooperativa. Según Mertens [4] esto implica que los co-investigadores: identifican un problema para investigar juntos; implementan sus procedimientos de investigación en la vida cotidiana y el trabajo; revisan e interpretan los datos y sacan conclusiones para el cambio en la práctica o la necesidad de investigaciones adicionales. En este esquema se "puede construir explicaciones que vinculan fenómenos y procesos en términos causales, referidos a un determinado contexto y expresados en términos narrativos" [5]. Las técnicas e instrumentos utilizados son, entre otras, revisión documental y bibliográfica, técnicas de observación, y encuestas semi-estructuradas, grupos de discusión, y la posterior triangulación. Se puede decir que la metodología se basa en un enfoque mixto, que combina los enfoques cualitativos y cuantitativos. Aquí, por razones de espacio, solamente se presentarán los resultados de tres actividades del proyecto: Selección de las asignaturas con las cuales se trabajará, Formulación de Competencias Específicas para la(s) carrera(s), relacionadas a las asignaturas involucradas en el proyecto, y Formulación de Resultados de Aprendizaje. La primera es general al proyecto, en tanto las dos siguientes se relacionan con el segmento referido a Mecanismos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Selección de las asignaturas para el proyecto

Las asignaturas seleccionadas para el proyecto han sido: A1. Física 1, A2. Ingeniería e Industrias, A3. Mecánica Racional, A4. Ingeniería Económica, A5. Investigación Operativa, A6. Mecanismos, A7. Sistemas Informáticos Industriales y A8. Ingeniería y Comercialización de Productos y Servicios. Esta selección se realizó de manera que entre todas se cubren las características objetivas que se mencionan a continuación. Pertenencia a Bloques Curriculares (de acuerdo a como lo establecen las Resoluciones ME 1232/01 [6] y 1054/2 [7], como ser Ciencias Básicas, Tecnologías Básicas, etc.); Criterio de Intensidad de Formación Práctica (Resolución de Problemas de Ingeniería, Actividades de Proyecto y Diseño, etc.); Pertenencia a una o más carreras, Nivel en la carrera (1er año; 2do año; etc.), Relación alumno/docente (se establecieron tres niveles) y Dependencia de una asignatura con otras (de acuerdo a cómo se relacionan los contenidos). Más allá que estas asignaturas cubren las características mencionadas, resultó de suma importancia que los cuerpos docentes se encuentren involucrados y motivar a aceptar todos los cambios que sean necesarios para orientarse a un Modelo de Formación por Competencias.

El caso particular de Mecanismos pertenece al bloque curricular de las Tecnologías Básicas para Ingeniería Industrial, en tanto para Ingeniería Electromecánica pertenece al bloque de las Tecnologías Aplicadas. Aquí hay una diferencia sustantiva, ya que las Tecnologías Básicas “deben apuntar a la aplicación creativa del conocimiento y la solución de problemas de la Ingeniería teniendo como fundamento las Ciencias Básicas” [6, 7], en tanto en las Tecnologías Aplicadas “Deben considerarse los procesos de aplicación de las Ciencias Básicas y Tecnologías Básicas para proyectar y diseñar sistemas, componentes o procedimientos que satisfagan necesidades y metas preestablecidas” [6, 7]. En cuanto a la Intensidad de Formación Práctica las actividades en Mecanismos principalmente están centradas en la Resolución de Problemas de Ingenierías, definido como “aquellas situaciones reales o hipotéticas cuya solución requiera la aplicación de los conocimientos de las ciencias básicas y de las tecnologías” [6, 7]. Por otra parte, como se ha mencionado, pertenece a dos carreras, estando ubicada en ambas en 4to año, teniendo una Relación alumno/docente media (entre 10 y 20 alumnos) para cada carrera. Finalmente, tiene una “Dependencia de una asignatura con otras” alta, ya que se encadena hacia atrás con otras dos asignaturas del proyecto: A1. Física 1 y A3. Mecánica Racional. El hecho que Mecanismos pertenezca a dos carreras es un factor significativo en el proyecto, particularmente al momento de la redacción de los Resultados de Aprendizaje, donde esta diferencia tiene que quedar en evidencia. Por otra parte la posibilidad de tener una “Dependencia de una asignatura con otras” alta es especialmente importante ya que los diferentes niveles de dependencias marcan la mayor o

ISBN: 978-987-1676-63-7

menor posibilidad de generar espacios de integración, y consecuentemente diseñar situaciones de integración para una orientación efectiva hacia un Modelo de Formación por Competencias.

3.2. Formulación de Competencias Específicas para Cada Carrera

Una metodología adecuada para diseñar los programas de formación de ingenieros enfocados a la Formación por Competencias y que es utilizada por varios países latinoamericanos se menciona a continuación. A partir del Modelo Educativo propuesto por una Universidad para todas sus facultades, cada carrera formula el Perfil del Egresado. Luego, las Competencias Específicas se formulan de acuerdo a cómo se han desagregado los Dominios Disciplinares. Éstos son el conjunto de áreas de conocimiento, de las actividades o problemas profesionales que generalmente resuelve, en este caso un cierto tipo de ingeniero, pero también está relacionado con el contexto institucional, el Modelo Educativo, los recursos y las prácticas institucionales, y las necesidades de un país, entre otros factores [8, 9]. Seguidamente los Dominios Disciplinares se desagregan en Dominios de Competencias, y luego se formulan las Competencias Específicas y las Genéricas. Esto último por lo menos en la Argentina ya se encuentra pautado a través del documento de CONFEDI [1]. Seguidamente se redactan los Resultados de Aprendizaje que aseguren la formación de las competencias específicas. Luego las asignaturas son consecuencia del agrupamiento de los Resultados de Aprendizaje, y recién a partir de allí se elabora el Plan de Estudios, las planificaciones o programas de las asignaturas, la malla curricular, el régimen de equivalencias, y toda otra documentación pertinente. No obstante, cuando este esquema aún se adoptó institucionalmente, se puede trabajar dentro de las asignaturas a partir de las Hipotéticas Competencias de Egreso para cada carrera, en función de las Actividades Reservadas al Título de cada especialidad y la Experiencia del Cuerpo Docente. Esta situación no estará muy distante de la ideal, sea por las propias características de una disciplina, o porque los contenidos, que se relacionan estrechamente con las competencias específicas, fueron adecuadamente tratados en los planes de estudio, los que a su vez fueron convalidados por los procesos de acreditación [10]. El esquema adoptado para formular las Competencias Específicas es el siguiente [11]: [Verbo de Desempeño]+ [Objeto de Conocimiento]+ [Finalidades]+ [Condiciones de Referencia].

Ingeniería Industrial: [Especificar] [las instalaciones de mediana complejidad, dispositivos, equipos, aparatos y sus condiciones de disposición, funcionamiento, utilización y mantenimiento] [para la implementación, administración y desarrollo de los procesos de producción, movimiento, almacenamiento y distribución de bienes y servicios], [de acuerdo a los requisitos del diseño de los procesos y tecnologías disponibles, aplicando herramientas cualitativas y cuantitativas, asegurando niveles de rentabilidad, con criterios de eficacia, eficiencia, competitividad, innovación, higiene y

ISBN: 978-987-1676-63-7

seguridad, calidad y sustentabilidad, respetando estándares, normas y reglamentaciones vigentes, e integrando equipos interdisciplinarios].

Ingeniería Electromecánica: [Diseñar] [piezas, dispositivos, equipos, elementos de máquinas y máquinas de aplicación general] [para los procesos de producción industrial de bienes, y para los procesos de transformación y reconversión de la energía], [de acuerdo a los requisitos del diseño de los procesos y tecnologías disponibles, aplicando herramientas computacionales de diseño y simulación de las tecnologías de vanguardia, usando los materiales más adecuados, con criterios de eficacia, eficiencia, competitividad, innovación, higiene y seguridad, calidad y sustentabilidad, confiabilidad, respetando estándares, normas y reglamentaciones vigentes, e integrando equipos interdisciplinarios].

La Competencia Específica de Ingeniería Industrial está ubicada en el dominio Gestión de Operaciones, en tanto la de Ingeniería Electromecánica en el Dominio Procesos de Manufactura. La asignatura Mecanismos en ambas carreras es la que se relaciona más estrechamente con estas Competencias Específicas, lo cual no implica que se relacione o contribuya a otras Competencias Específicas. Estas contribuciones de Mecanismos deben ser diferentes para las Competencias Específicas de ambas carreras. Por otra parte, como se ha tomado solamente una Hipotética Competencia Específica de Egreso para cada carrera, la redacción de la misma es un tanto extensa. En el caso que se avance en cada carrera con todas las Competencias Específicas de Egreso la configuración cambiaría, ya que habría elementos transversales que pueden ser especificados de otra manera. No obstante, estas Competencias Específicas deben ser entendidas como Guías de Trabajo, que son las que permitirán avanzar en la Redacción de los Resultados de Aprendizaje, y por lo tanto en esta instancia del diseño no son definitivas. De hecho que este proceso no es lineal y deben revisarse las veces que sean necesarias tanto las Competencias Específicas como los Resultados de Aprendizaje, sobre todo luego de avanzar con la definición de la Mediación Pedagógica y del Sistema de Evaluación.

Como se observa, en ambos casos de las Competencias Específicas están presentes los cuatro elementos centrales: verbo de desempeño, objeto de conocimiento, más de una finalidad y más de una condición de referencia. También en ambos casos figura un complemento, “de mediana complejidad” en la primera, y “de aplicación general” en la segunda. Esto es lo que propone un escenario real para el recién egresado, ya que son Competencias Específicas de Egreso, “necesarias para la inserción laboral del recién graduado” [2] y no Profesionales, de acuerdo al concepto de Delimitación de la Formación de Grado, propuesto por la ASIBEI [2]. Resulta tener claro esto para no incurrir en la sobrecarga de contenidos y ser consistente con la sentencia de la ASIBEI “Baste recordar que ni siquiera un ingeniero con un par de años de experiencia profesional está en condiciones de realizar de manera competente cualquier trabajo ingenieril posible” [2]. Otra

ISBN: 978-987-1676-63-7

característica para destacar en la ambas Competencias Específicas es la frase "integrando equipos interdisciplinarios", que en realidad es una condición de referencia o calidad que propone cómo deber ser el desempeño. La sociedad actual no requiere solamente expertos en las características de su profesión, lo cual se reduce a formar modelistas, calculistas o proyectistas. La sociedad demanda profesionales competentes en un sentido amplio, tanto social, como política y actitudinalmente, y por ello la interdisciplinariedad, el trabajo en equipo y la competencia para comunicarse con los demás debe ser parte intrínseca de la formación.

En ambos casos está presente el carácter de la competencia ya que tanto en las finalidades como en las condiciones de referencia, se evidencia que necesariamente deben ser articuladas y movilizadas las competencias genéricas. Esto implica un tratamiento integral así como la movilización "de manera interiorizada, un conjunto integrado de recursos con miras a resolver una familia de situaciones-problemas" [12]. Por ello Le Boterf [13] sentencia que "Disponer de un equipamiento de recursos es una condición necesaria pero no suficiente para ser reconocido como competente". Finalmente Villa y Poblete [14] afirman que "… al trabajar en el aprendizaje de determinadas competencias conviene ser consciente de que se desarrollan otras".

3.3. Redacción de Resultados de Aprendizaje

El Marco Europeo de Cualificaciones para el Aprendizaje Permanente, o EQF, [15] define los Resultados de Aprendizaje como la "expresión de lo que una persona sabe, comprende y es capaz de hacer al culminar un proceso de aprendizaje". La estructura para redactar un Resultado de Aprendizaje que se encuentra en diferentes guías es similar a la usada para formular las competencias, salvo que en numerosas oportunidades la condición y la finalidad suelen estar agrupadas en un solo elemento denominado "contexto" o simplemente "condiciones" [16]. Se han desarrollado numerosas taxonomías para definir el verbo, sin embargo la mayoría utiliza la Taxonomía de Bloom [16-17] generalmente lo hacen sobre los aportes de Kennedy [18]. La Taxonomía de Bloom para los objetivos educacionales está basada en tres dominios: Cognitivo, Afectivo, también denominado Subjetivo o Emocional y Psicomotor [18]. Esta taxonomía en el plano cognitivo "describe como construimos sobre lo anteriormente aprendido para desarrollar niveles más complejos de comprensión" y establece seis niveles, los cuales son, desde el más bajo hasta el superior: conocimiento, comprensión, aplicación, análisis, síntesis y evaluación. Los tres primeros niveles son denominados categorías de orden inferior, en tanto los otros tres son de categoría superior, porque implican operaciones de pensamientos más complejas [18]. El concepto es que cada nivel indefectiblemente involucra al anterior. No se puede comprender si no se conoce, no puede haber análisis, si previamente no se alcanzó la aplicación, y así sucesivamente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Si bien se han redactado todos los Resultados de Aprendizaje para ambas carreras, por razones de espacio, y con la intención de reflexionar y discutir sobre algunos aspectos centrales, se presenta aquí uno solo de ellos, para cada carrera, sobre un mismo objeto de conocimiento. Este objeto será denominado "elementos de máquinas transmisores de par y velocidad a través de elementos rígidos", y comprenden las ruedas de fricción, ruedas cilíndricas de dientes rectos, ruedas cilíndricas de dientes helicoidales, ruedas dentadas cónicas y tornillos sinfín. Este objeto, que también se denomina objeto de conocimiento o de desempeño, describe el sujeto o al elemento sobre el que recae una acción, es decir es el ¿QUÉ?, tema, asunto, contenido o saber [17], o para decirlo en términos vulgares: es lo que está en los libros específicos o en las unidades temáticas de los programas analíticos de las asignaturas. La pregunta que sigue es qué se espera que el alumno sea capaz de hacer con ese objeto de conocimiento. Esto lo define el verbo (o frase verbal), que debe ser un verbo de acción que debe demostrar diferentes niveles de aprendizaje al finalizar el curso [17], y es donde interviene las diversas tablas de verbos que responden a la Taxonomía de Bloom. De acuerdo a esto se han propuesto dos niveles distintos para los alumnos de ambas carreras: Nivel 2 de Comprensión para Ingeniería Industrial y Nivel 5 de Síntesis para Ingeniería Electromecánica para el objeto de conocimiento mencionado. En el Nivel 2 el alumno debe alcanzar "la habilidad para comprender e interpretar información aprendida" [18], en tanto en el Nivel 5 se alcanza "puede crear algo nuevo mediante la suma y el compendio de las partes y su análisis" [17]. Los verbos adoptados han sido "Comparar" para el caso de Ingeniería Industrial y "Especificar Dimensionalmente" (frase verbal) para el caso de Ingeniería Electromecánica. A continuación se presentan ambos Resultados de Aprendizaje completos:

Ingeniería Industrial: [Comparar] [diferentes elementos de máquinas transmisores de par y velocidad a través de elementos rígidos] [para proponer alternativas de utilización y mantenimiento, en procesos industriales de producción de bienes].

Ingeniería Electromecánica: [Especificar Dimensionalmente] [diferentes elementos de máquinas transmisores de par y velocidad a través de elementos rígidos] [para que cumplan las funciones que demanda el diseño de los equipos mecánicos, aplicando los fundamentos de la ciencia de los materiales].

Se observa que no solamente difieren los verbos, sino también las condiciones. En el caso del Resultado de Aprendizaje de Ingeniería Industrial hay una condición de finalidad y una de entorno, en tanto en el caso de Ingeniería Electromecánica hay una condición de finalidad y una disciplinaria. La condición de finalidad "es prácticamente infaltable pues cumple la función de establecer el sentido del objetivo, instituyendo los propósitos y/o resultados del mismo, de manera endógena" [16], en tanto las de entorno "especifican desde las condiciones, circunstancias y/o contextos en donde se movilizará o ejecutará el aprendizaje" [16]. Finalmente las disciplinarias "do-

sifican o clasifican el aprendizaje desde una visión conceptual propia, o bien a través del prisma de una determinada disciplina". Se observa entonces una redacción adecuada, no solamente en función de las especificidades de cada carrera, sino también con la situación de Mecanismos como Tecnología Básica en un caso y como Tecnología Aplicada en el otro.

Por último, cabe acotar que de las diferentes ventajas que ofrece el uso de Resultados de Aprendizaje, uno de ellos está relacionado con la claridad y la transparencia ya que aportan estas características al sistema de educación superior "fomentando la coherencia entre formación, evaluación y resultados, promoviendo la integración y la consistencia de las diferentes asignaturas con los resultados globales que se pretende que alcancen los estudiantes" [17]. Esto particularmente significativo en el caso de asignaturas de carreras de ingeniería, cuando son ofrecidas desde un Departamento Académico Disciplinario diferente al de una especialidad de ingeniería. En el presente caso, Mecanismos es impartida por el cuerpo docente del Departamento de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNaM para la carrera Ingeniería Industrial. Las formaciones de grado de estos docentes están relacionadas o bien con la Ingeniería Mecánica o bien con la Ingeniería Electromecánica, y por tanto, tener una meta clara de formación para otra carrera facilita tanto a la Mediación Pedagógica que tiene que seleccionar, como los instrumentos y criterios de evaluación que debe utilizar, atendiendo fundamentalmente al principio de alineamiento constructivo, cuya denominación está asociada a Biggs [19].

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas hasta el momento señalan que es preciso un cambio del rol del docente. El docente debe salir de su postura de transmisor de contenidos y mudar a un facilitador de contenidos, permitiendo que sea el alumno el actor principal del proceso, porque es quien tiene que ser capaz de movilizar diferentes recursos para demostrar si es competente o no para lo que se propuso. Por ello el alumno debe tomar un rol totalmente activo, construyendo su propio conocimiento y demandando al docente el acompañamiento en dicha construcción, ya que ambos conocen qué resultados se esperan de él al finalizar el curso.

Por otra parte, la adecuada formulación de competencias y redacción de resultados de aprendizaje pone en contraste los contenidos, porque importa más qué es lo que debe ser capaz de hacer el alumno con dichos contenidos, en función de lo que se espera de él, y no simplemente cargar la "mochila" del saber. No es competente el que "sabe mucho", sino aquel que es capaz de resolver los problemas de la ingeniería, al servicio de la sociedad, a partir de los recursos que dispone, y buscando aquellos que le faltan. Por ello no solamente importa lo específico de cada disciplina, sino la formación de competencias genéricas, como el aprendizaje autónomo, entre otras.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Finalmente, en las etapas que siguen del proyecto se está avanzando con la Mediación Pedagógica, que implica definir modalidades y métodos de enseñanza, que no deben ser de un único tipo, sino todo lo contrario, tiene que haber una multiplicidad de ellos, cuya elección estará sustentada por los Resultados de Aprendizaje esperados en cada caso. Posteriormente se avanzará sobre el sistema de evaluación, que también implica una multiplicidad de técnicas e instrumentos, los cuales deberán estar alineados con cada Resultados de Aprendizaje y cada mediación pedagógica. Esto también pone en tensión al docente, porque implica mirar desde otro ángulo lo que viene haciendo, que para nada implica descalificar lo actuado hasta ahora. Simplemente es tiempo de revisión, reflexión y optimización de lo que se hace, lo cual obviamente no está librado de costos.

5. REFERENCIAS

[1] CONFEDI (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería). *Competencias Genéricas: Desarrollo de competencias en la enseñanza de la ingeniería argentina*. Universidad Nacional de San Juan, San Juan, 2007.

[2] Anónimo. *Competencias en Ingeniería*. Universidad FASTA, Mar del Plata, 2014.

[3] Kowalski, V., Erck, M., Enriquez, H. *Formación por competencias en ingeniería industrial: moda o mejora académica*. III Congresso Internacional de Educação Científica e Tecnológica (CIECITEC), ISSN: 2238-9237, 10 al 12 de Junio 2015, Santo Ângelo, Brasil.

[4] Mertens, D. M. *Research and evaluation in education and psychology: integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods*. 3rd ed. Thousand Oaks, Sage, 2010.

[5] Neiman, G; Quaranta, G. Los estudios de caso en la investigación sociológica. En: Vasilachis de Gialdino, I. (coord.) *Estrategias de Investigación Cualitativa*. Barcelona, Gedisa, 2006.

[6] Resolución Ministerio de Educación1232/01. *Estándares para la acreditación de Ingeniería Aeronáutica, en Alimentos, Ambiental, Civil, Electricista, Electromecánico, Electrónica, en Materiales, Mecánico, en Minas, Nuclear, en Petróleo, y Química.* Boletín Oficial N°29.805. Buenos Aires, 2001.

[7] Resolución Ministerio de Educación1054/02. *Estándares para la acreditación de Ingeniería Industrial*. Boletín Oficial N°30.014. Buenos Aires, 2002.

[8] Irigoyen, J., Acuña, K., Jiménez, M. *Evaluación de Desempeños Académicos*. Universidad de Sonora, Sonora, 2011.

[9] Universidad Nacional de Ingeniería. Vicerrectoría Académica. *Metodología para el Diseño Curricular de las Carreras de la UNI*. UNI, Managua, 2009.

[10] Kowalski, V., Posluszny, J., López, J., Erck, M., Enriquez, H. *Hacia un Modelo Integrador para Formar Ingenieros e Ingenieras Competentes*. VIII Congreso Argentino de Ingeniería Industrial. ISBN: 978-987-1896-50-9, 12-13 Noviembre 2015, Córdoba.

[11] Tobón, S. *Formación integral y competencias: pensamiento complejo, currículo, didáctica y evaluación*, 4a ed., Ecoe Ediciones, Bogotá, 2013.

[12] Roegiers, X., P*edagogía de la integración: Competencias e integración de los conocimientos en la enseñanza*. Coordinación Educativa y Cultural Centroamericana y AECI. Colección IDER (Investigación y desarrollo educativo regional), San José, 2007.

[13] Le Boterf, G. *Professionnaliser. Construire des parcours personnalisés de professionnalisation*. 6 ed. Éditions d'Organisation Groupe Eyrolles, Paris, 2008.

[14] Villa, A., Poblete M. (Dir.). *Aprendizaje basado en competencias. Una propuesta para la evaluación de las competencias genéricas*. Ediciones Mensajero, Bilbao, 2007.

[15] COMISIÓN EUROPEA. *El Marco Europeo de Cualificaciones para el aprendizaje permanente* (EQF-MEC). Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Luxemburgo, 2009.

[16] Universidad del Bío Bío. Vicerrectoría Académica. *Manual de Elaboración de Programas de Asignaturas: Material de apoyo para la implementación del Modelo Educativo en el marco del proceso de Renovación Curricular en la Universidad del Bío-Bío*. Ediciones Universidad del Bío-Bío, Concepción, 2013.

[17] ANECA. *Guía de apoyo para la redacción, puesta en práctica y evaluación de los Resultados de Aprendizaje*. Agencia Nacional de Evaluación y de la Calidad y Acreditación (ANECA), Madrid, 2013.

[18] Kennedy, D. *Redactar y utilizar resultados de aprendizaje*. University College Cork, Cork, 2007.

[19] Biggs, J., Tang, C. *Teaching for Quality Learning at University*. 4th ed. Mc.Graw-Hill, Glascow, 2011.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

LOS ERRORES EN PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA: UN ANÁLISIS DESDE EL ENFOQUE ONTOSEMIÓTICO

Minnaard,C. [1]

1Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Camino de Cintura y Juan XXIII, Llavallol, Argentina
minnaardclaudia@gmail.com
Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación (IIT&E)

RESUMEN

Abordar las investigaciones en matemática educativa, significa considerar las relaciones entre el sistema de prácticas y la configuración de objetos y procesos[1]. El Enfoque Ontosemiótico (EOS) proporciona herramientas de análisis que permiten indagar en estas relaciones. Es importante destacar que el problema epistémico cognitivo no puede desvincularse del ontológico. [2]

A partir de la observación de las producciones de los alumnos, es posible observar que aquellos con muy buen desempeño académico cometen errores. Esto se debe a que la producción del error no es necesariamente falta de estudio, sino la aplicación de un "esquema cognitivo inadecuado".

El objetivo principal de la investigación consistió en indagar la relación entre los errores cometidos por alumnos de la cátedra de Probabilidad y Estadística de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (Exámenes parciales y Trabajos prácticos) durante el Primer Cuatrimestre de 2015 a través de la frecuencia de ocurrencia del error y el tipo de problema propuesto.

En el presente trabajo se muestran los principales resultados obtenidos, así como la incidencia de dos tipologías de errores y su vinculación con la semiótica de los objetos matemáticos estudiados y el sistema de prácticas utilizado [3]. Al analizar la variación de la frecuencia de ocurrencia del error si se presenta un mismo problema variando el registro de representación semiótica (RRS) los problemas que se utilizan en los TP difieren de los utilizados en los Exámenes Parciales en que tienen gráficos que acompañan el enunciado textual y se utilizan situaciones reales.

Palabras Claves: Errores – Probabilidad – Estadística – Sistema de prácticas

1. INTRODUCCIÓN

Abordar las investigaciones en matemática educativa, significa considerar las relaciones entre el sistema de prácticas y la configuración de objetos y procesos [4]

El Enfoque Ontosemiótico (EOS) proporciona herramientas de análisis que permiten indagar en estas relaciones. Es importante destacar que el problema epistémico cognitivo no puede desvincularse del ontológico. [2]

A partir de la observación de las producciones de los alumnos, es posible observar que aquellos con muy buen desempeño académico cometen errores. Esto se debe a que la producción del error no es necesariamente falta de estudio, sino la aplicación de un "esquema cognitivo inadecuado". [5]Los errores tienen su génesis en el mismo proceso de aprendizaje y estos a su vez se conectan formando redes verdaderamente complejas, actuando como obstáculos que se translucen en la práctica en respuestas erróneas. [6]

Las producciones de los alumnos (exámenes parciales y trabajos prácticos) permiten indagar la aparición del error vinculándolo con el sistema de prácticas y la configuración de objetos y procesos.

En función de lo descripto se pueden formular las siguientes hipótesis:

- La ocurrencia de error que cometen los alumnos en Probabilidad y Estadística está relacionado con el sistema de prácticas.
- El tipo de error que cometen los alumnos en Probabilidad y Estadística está relacionado con el tipo de objeto semiótico con el que trabaja.

Para corroborar o refutar las hipótesis planteadas se considera el portafolio de actividades realizadas por los alumnos de la cátedra de Probabilidad y Estadística de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (Exámenes parciales y Trabajos prácticos) durante el Primer Cuatrimestre de 2015.

El objetivo principal de la investigación consiste en indagar la relación entre los errores cometidos por alumnos de la cátedra de Probabilidad y Estadística de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (Exámenes parciales y Trabajos prácticos) durante el Primer Cuatrimestre de 2015 a través de la frecuencia de ocurrencia del error y el tipo de problema propuesto. Siendo los objetivos secundarios: identificar los errores cometidos por los alumnos, clasificándolos según criterios; analizar los ejes de contenidos de Probabilidad y Estadística que presentaron mayor dificultad ; determinar la variación de la frecuencia de

ISBN: 978-987-1676-63-7

ocurrencia del error si se presenta un mismo problema variando el registro de representación semiótica (RRS)[7]; evaluar si existe alguna relación entre el tipo de problema propuesto y el tipo de error cometido por los alumnos; contribuir a elaborar un modelo teórico que caracterice el tipo de errores a fin de implementar estrategias de enseñanza

1.1 ¿Cómo se producen los errores en matemática?

Algunos autores consideran que "algunos obstáculos o dificultades que encara un estudiante en el manejo del lenguaje matemático son fuente de errores en la solución de problemas. La naturaleza del obstáculo puede explorarse mediante el análisis de los errores cometidos". [8]

En el ámbito de la educación matemática los errores aparecen permanentemente en las producciones de los alumnos: las dificultades de distinta naturaleza que se generan en el proceso de aprendizaje se conectan y refuerzan en redes complejas que obstaculizan el aprendizaje, y estos obstáculos se manifiestan en la práctica en forma de respuestas equivocadas.[6]

Por otra parte se plantea el concepto de "obstáculo epistemológico", considerando que

> *Cuando se investigan las condiciones psicológicas del progreso de la ciencia hay que plantear el conocimiento científico en términos de obstáculos…el conocimiento de lo real es una luz que siempre proyecta alguna sombra, jamás es inmediata y plena. Al volver sobre un pasado de errores se encuentra la verdad. En efecto, se conoce en contra de un conocimiento anterior, destruyendo conocimientos mal adquiridos o superando aquello que, en el espíritu mismo, obstaculiza.[9]*

Según Socas (1997), "el error debe ser considerado como la presencia en el alumno de un esquema cognitivo inadecuado y no sólo la consecuencia de una falta específica de conocimiento o una distracción". Brousseau, Davis y Werner (1986) (citados por Rico, 1995), señalan, en el mismo sentido, que "los errores son el resultado de un procedimiento sistemático imperfecto que el alumno utiliza de modo consistente y con confianza".[9],[10]

1.2 El enfoque ontosemiótico (EOS)

El Enfoque Ontosemiótico (EOS) al vincular el sistema de prácticas con la configuración de los objetos y procesos permite evaluar si existe una relación entre la aparición del error y un sistema de prácticas inadecuado.

La "noción de idoneidad didáctica" es utilizada como herramienta dentro del EOS vinculando Idoneidad epistémica, Idoneidad cognitiva, Idoneidad interaccional, Idoneidad mediacional, Idoneidad afectiva e Idoneidad ecológica tal como se observa en el Gráfico 1. [11]

ISBN: 978-987-1676-63-7

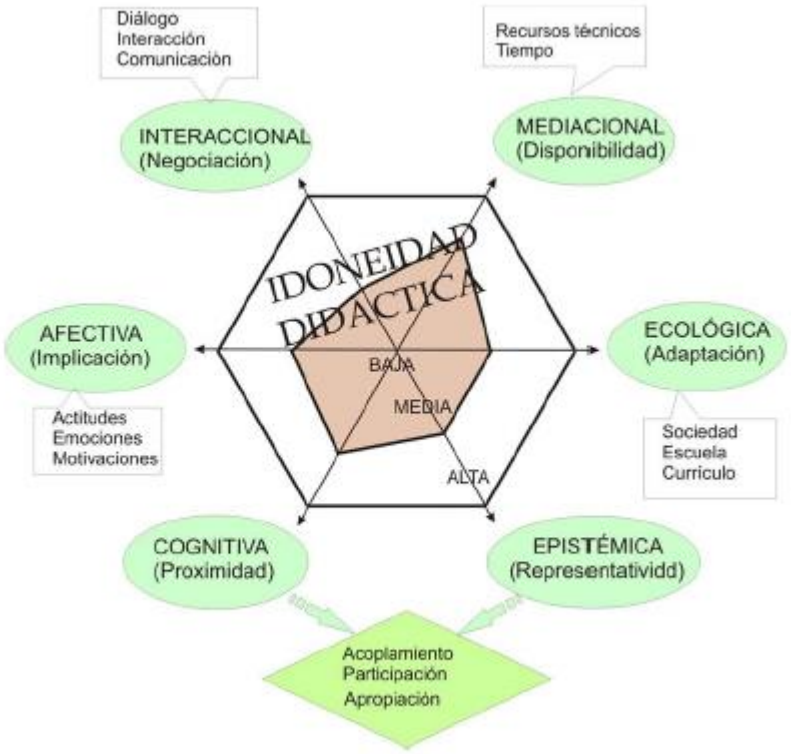


Gráfico 1: Idoneidad didáctica

Fuente: Godino; J. (2013) Indicadores de la idoneidad didáctica de procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas. Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática. 2013. Año 8. Número 11. pp 111-132. Costa Rica

Godino(2013) describe cada una de las idoneidades que llevan a la idoneidad didáctica. La idoneidad epistémica hace referencia a la representatividad de los significados; la cognitiva expresa la proximidad que se encuentran los contenidos con respecto al desarrollo potencial de los alumnos; la interaccional hace referencia a aquellas acciones docentes que permiten eliminar los obstáculos epistemológicos; la mediacional hace referencia a la disponibilidad de los medios y recursos necesarios en el proceso de enseñanza aprendizaje; la afectiva tiene que ver con el interés y la motivación del alumno y por último la ecológica indica el grado en que el proceso educativo se enlaza en la institución de referencia.

Asimismo, Minnaard (2014) indaga sobre las competencias que en el área de matemática traen los alumnos ingresantes a las carreras de ingeniería. Los exámenes, surgidos de la aplicación del Test Diagnóstico, de alumnos ingresantes a las carreras de ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, fueron el objeto de estudio de la investigación. [12]

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tal como se observa en el Tabla 1 al relacionar la ocurrencia del error con los tipos de problemas propuestos se consideran dos tipologías. Para obtener tales tipologías se aplicó un Análisis Factorial Multivariante.

Tabla 1: Relación Tipo de problemas – Ocurrencia del error

	Tipo I	**Tipo II**
	Ocurrencia del error : BAJA	Ocurrencia del error: ALTA o MEDIA
Tipos de problemas	No tienen enunciado textual (solamente) Tienen gráficos No es necesario aplicar fórmulas Aplican definiciones Aplican propiedades No realizan operaciones numéricas	Tienen enunciado textual (solamente) No aplican definiciones No aplican propiedades No tienen expresiones algebraicas Realizan operaciones numéricas Aplican fórmulas

Fuente: Elaboración propia

El Análisis Factorial realizado para determinar estas tipologías, permitió corroborar una de las hipótesis de trabajo de la investigación realizada, ya que la ocurrencia de los errores que cometen los alumnos en el Test Diagnóstico está relacionada con el tipo de problema que se le presenta para resolver. Sobre la base de estos resultados precedentes se procedió a focalizar en la ocurrencia de los errores en Probabilidad y Estadística.

1.3 Características de la materia

El propósito del trabajo realizado fue identificar y analizar los errores más frecuentes cometidos por los alumnos en Probabilidad y Estadística. La asignatura corresponde al tercer cuatrimestre del Ciclo del Plan de Estudios de las carreras de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Para cursar esta asignatura deben tener conocimientos previos de Matemática I y II, Cálculo I[1] y Álgebra. Los alumnos que cursan sus materias "al día" la cursan junto con Cálculo II y Física I[2].

Probabilidad y Estadística es común a todas las carreras de Ingeniería en la Facultad de Ingeniería de Lomas de Zamora (FIUNLZ). La carga horaria corresponde a 64 hs totales por cuatrimestre con una frecuencia de 4 hs por semana presenciales. La modalidad de enseñanza se encuadra en el modelo Blended Learning (presencialidad + virtualidad). La cátedra tiene su aula virtual alojada en

[1] Las materias correlativas necesarias para poder cursar son Cálculo I y Matemática II.
[2] A partir del año 2015 se implementa un cambio en el Plan de estudios de la Carrera con el fin de que la materia Química que estaba en el primer cuatrimestre del primer año de estudios pase al cuarto cuatrimestre. De esta forma los alumnos adquieren los contenidos más próximos a las materias en que los aplican.

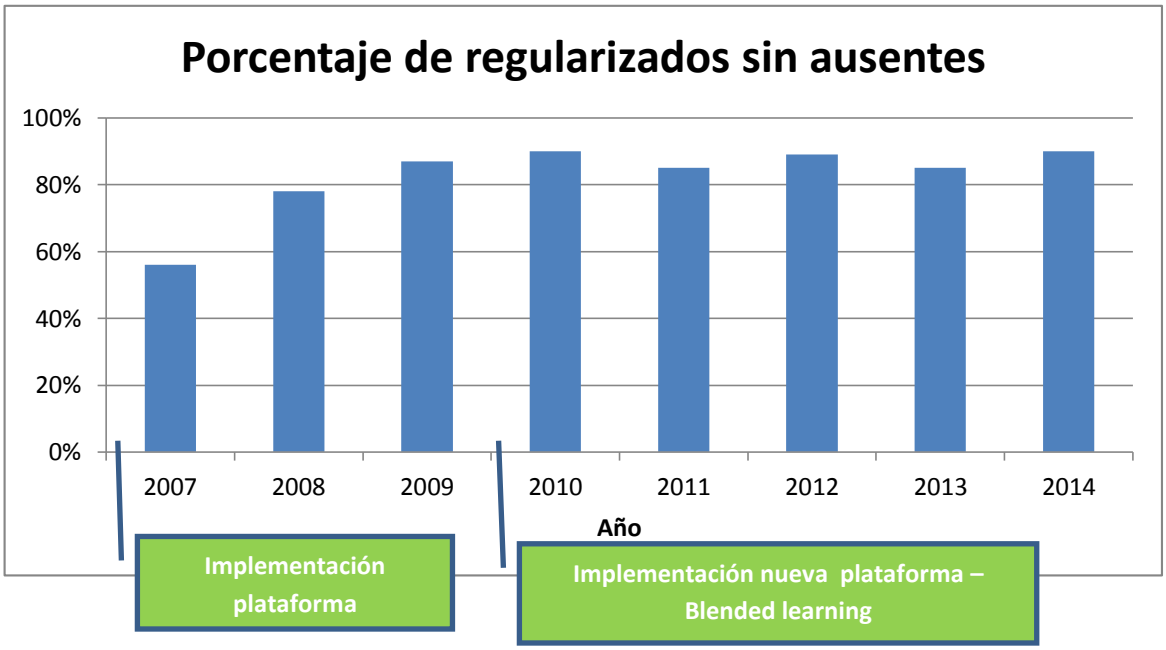
ISBN: 978-987-1676-63-7

la plataforma institucional[3]. El aula virtual se ha ido optimizando desde el año 2006, permitiendo tener un repositorio del material utilizado en las clases, así como también un espacio de interacción e intercambio con los docentes y entre los alumnos a través de los foros.

1.4 Cambios en los sistemas de prácticas en la materia Probabilidad y Estadística

La introducción del uso del aula virtual produjo diferencias cualitativas y cuantitativas en el proceso de enseñanza aprendizaje. La posibilidad de que, entre clases presenciales, el alumno tuviera acceso a los materiales de la cátedra, así como a consultas asincrónicas y atemporales a través de los foros habitados para tal fin, contribuyeron a una mejora en la calidad. A partir del año 2010 se migra a una nueva plataforma (e-ducativa) manteniéndose las mismas características funcionales.

Gráfico 2: Evolución porcentaje de regularizados sin ausentes



Fuente: Elaboración propia

Para este período el porcentaje medio de alumnos que regularizan y aprueban la materia es del 82,5 %, con un desvío estándar del 11,4 %. El intervalo [0,729; 0,9203] cubre el verdadero porcentaje medio con una confianza del 95%.

Es a partir del año 2012 que se hace un cambio en el sistema de prácticas incluyendo la resolución obligatoria de dos Trabajos Prácticos que se resuelven en el aula virtual. Los Trabajos Prácticos al desarrollarse en el aula virtual, pudiendo consultar las dudas a través de los foros y contando con un grupo cooperativo y colaborativo, reflejan tanto los errores que se pueden subsanar en forma

[3] En: http://www.itc-unlz.com.ar/acceso.cgi?extra=&wAccion=login&wIdSeccion=82 [Consultado: 12/05/ 2016]

inmediata, como el esfuerzo individual de cada uno de los alumnos, ya que los vestigios digitales de la plataforma así lo permiten. En la Imagen 1 se ilustra el proceso de retroalimentación

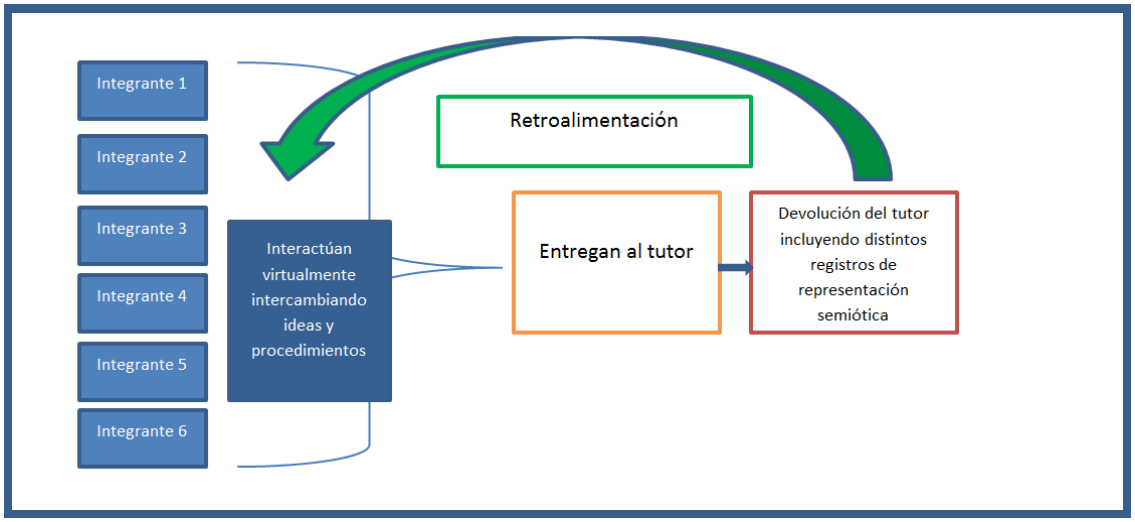


Imagen 1: Proceso de retroalimentación

Fuente: Elaboración propia

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolla en forma descriptivo-correlacional ya que se propone describir el comportamiento de variables y/o identificar tipos o pautas características resultantes de las combinaciones de un cierto número de ellas. Las técnicas que se utilizaron para recoger los datos post experiencia han sido desde una perspectiva cuantitativa y desarrollada a través de los resultados de los exámenes parciales y de los trabajos prácticos que conforman el portafolio de actividades desarrolladas por los alumnos de Probabilidad y Estadística durante el Primer Cuatrimestre de 2015. La investigación indaga las relaciones entre las prácticas docentes, los objetos matemáticos involucrados y el tipo de error cometido. Las herramientas estadísticas utilizadas para analizar los datos obtenidos son: Análisis univariado; Análisis multivariado y Análisis de regresión multivarriante

3. PRINCIPALES RESULTADOS

Al relacionar los errores cometidos con la clasificación de Radatz[4] es posible observar que para el TP1 la mayor incidencia se presenta en Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y

[4] La clasificación de Radatz (1980) citada por Rico(1995) clasifica los errores en matemática en 5 grandes grupos: 1.Dificultades del lenguaje; 2.Dificultades para obtener información espacial; 3. Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y conceptos previos; 4. Asociaciones incorrectas o rigidez del pensamiento; 5. Aplicación de reglas o estrategias irrelevantes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

conocimientos previos, así como Dificultades para obtener información espacial. A modo de ejemplo se presentan los errores en Estadística descriptiva (Imagen 2), en forma análoga se han trabajado los restantes contenidos del TP1 (Probabilidad y Variables aleatorias)

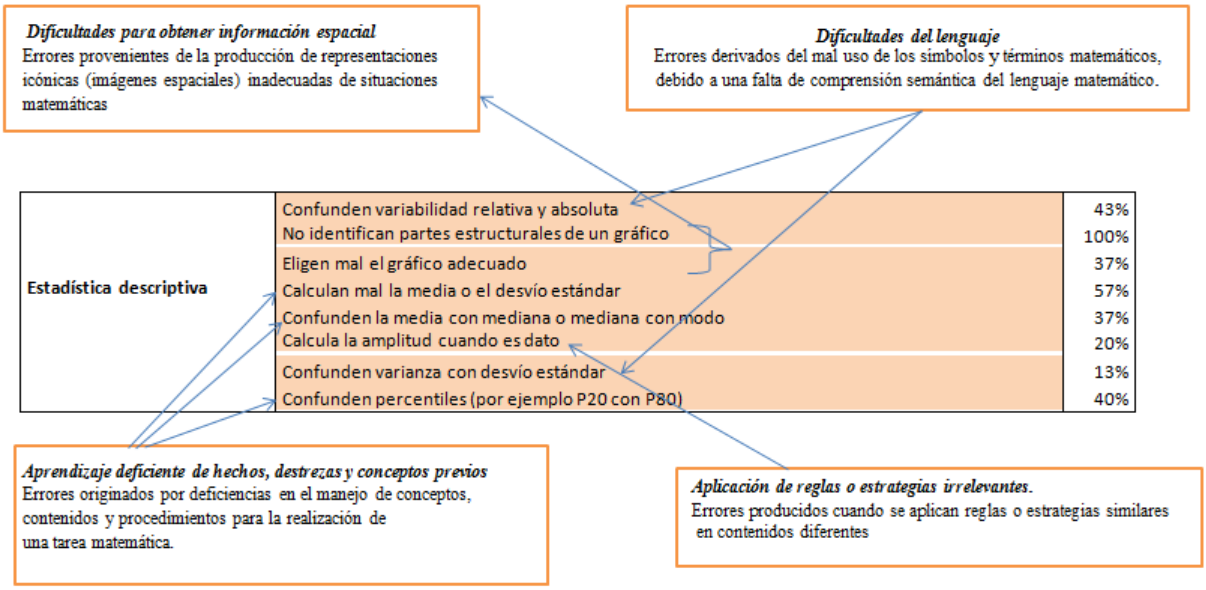


Imagen 2: Relación entre los errores en el TP1 (Estadística descriptiva) y la clasificación de Radatz

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, al analizar los errores en el TP 2 la mayor incidencia se encuentra en aquellos errores relacionados con Dificultades del lenguaje y Asociaciones incorrectas o rigidez de pensamiento.(Imagen 3)

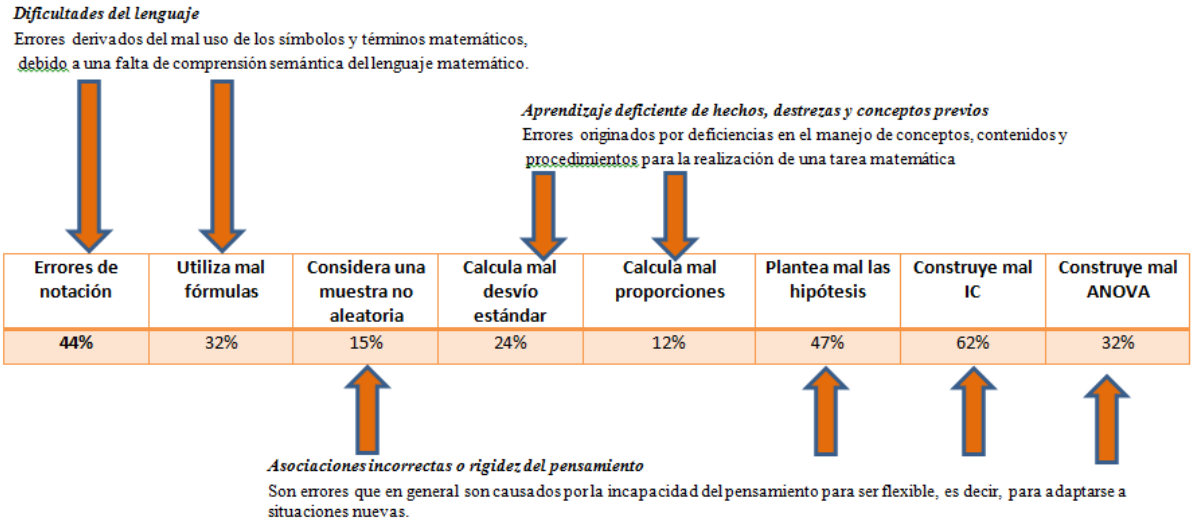


Imagen 3: Relación entre los errores en el TP2 y la clasificación de Radatz Fuente: Elaboración propia

ISBN: 978-987-1676-63-7

En síntesis de los Análisis Multivariados aplicados es posible observar que:

En el TP1 es posible apreciar dos perfiles

Perfil 1: Errores asociados a Dificultades de lenguaje y para obtener información espacial y Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y conceptos previos
Perfil 2: Errores asociados a Asociaciones incorrectas o rigidez del pensamiento y Aplicación de reglas o estrategias irrelevantes

En el TP2 es posible apreciar dos perfiles:

Perfil 1: Errores asociados a Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y conceptos previos y Dificultades de lenguaje
Perfil 2: Errores asociados a Asociaciones incorrectas o rigidez del pensamiento

Ahora bien al considerar en una tabla de doble entrada la Ocurrencia del error clasificada por Tipología y por Contenidos es posible visualizar su incidencia (Tabla 2)

Tabla 2: Ocurrencia del error clasificada por Tipología y por Contenidos

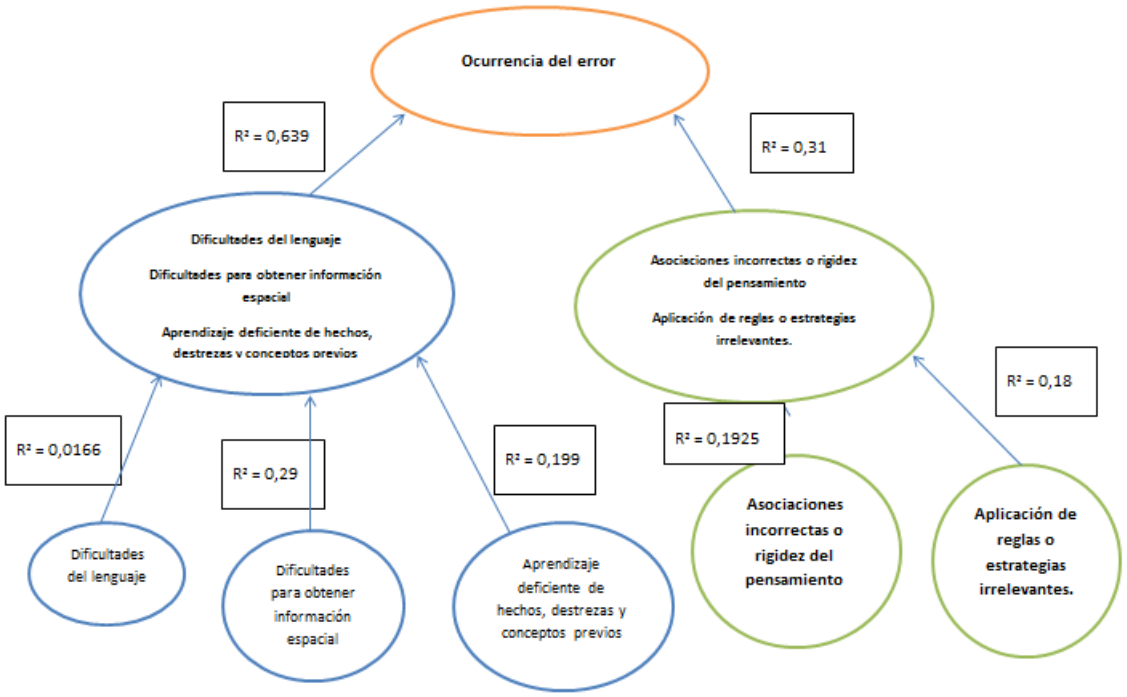
	Estadística descriptiva	Probabilidad	Variables aleatorias	Intervalos de confianza	Pruebas de hipótesis	ANOVA	Regresión y correlación	Total
1.Dificultades del lenguaje	3%	5%	2%	4%	4%	4%	4%	27%
2.Dificultades para obtener información espacial	8%	0%	0%	1%	0%	0%	7%	15%
3. Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y conceptos previos	7%	1%	5%	2%	2%	2%	3%	23%
4. Asociaciones incorrectas o rigidez del pensamiento	0%	8%	4%	4%	3%	2%	2%	22%
5. Aplicación de reglas o estrategias irrelevantes.	1%	3%	1%	2%	2%	1%	3%	13%
Total	19%	17%	13%	13%	11%	9%	18%	100%

Fuente: Elaboración propia

Por último se aplica un Diagrama de Caminos a partir de un Análisis de Regresión Multivariante (Gráfico 3)

ISBN: 978-987-1676-63-7

Gráfico 3: Diagrama de Caminos



Es posible apreciar en el Gráfico 3 que la incidencia de los errores que corresponden al Perfil 1 (Dificultades del lenguaje, Dificultades para obtener información espacial y Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y conceptos previos) en la Ocurrencia del error es mayor (0,639) que la que corresponde a los del Perfil 2 (Asociaciones incorrectas o rigidez de pensamiento y Aplicación de reglas o estrategias irrelevantes).

4. CONCLUSIONES

Los nuevos escenarios de enseñanza-aprendizaje y las demandas cambiantes del mercado laboral nos llevan a cambios en los enfoques de estos procesos. Los alumnos y los docentes trabajan juntos con el fin de lograr aprendizajes significativos.

Estos procesos apuntan no solamente a la adquisición de nuevos conocimientos sino también habilidades, actitudes y valores. (Imagen 4)

ISBN: 978-987-1676-63-7

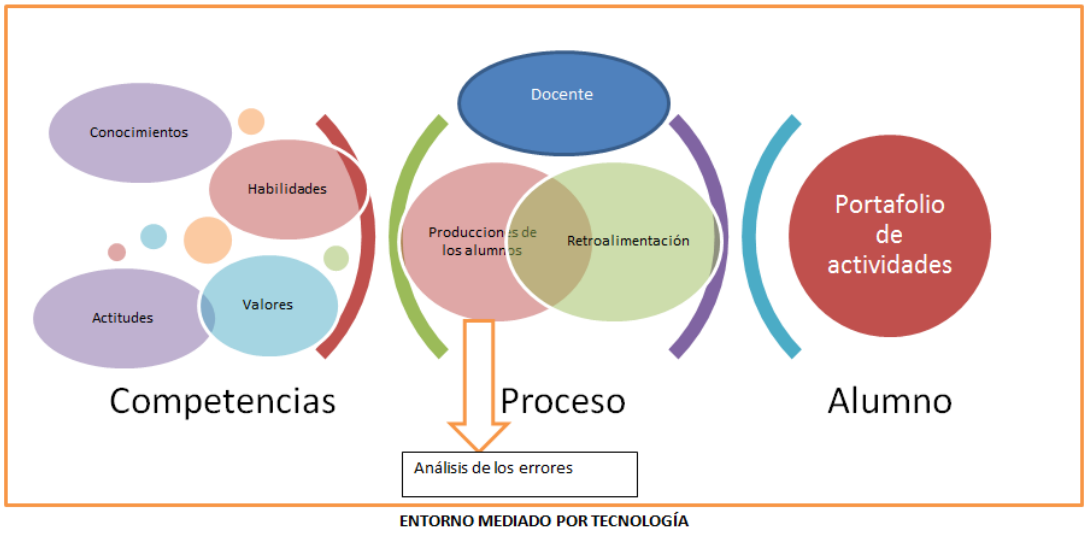


Imagen 4: Dinámica del proceso de enseñanza aprendizaje

Fuente: Elaboración propia

Dentro de estos procesos el análisis de los errores en las producciones de los alumnos proporciona herramientas para una revisión crítica de las prácticas docentes.

Desde el Enfoque Ontosemiótico (EOS) se vincula el sistema de prácticas con la configuración de los objetos y procesos permite evaluar si existe una relación entre la aparición del error y un sistema de prácticas inadecuado. Los ejes de contenidos con mayor porcentaje de error son Estadística descriptiva, Probabilidad y Regresión y correlación.

Al analizar la variación de la frecuencia de ocurrencia del error si se presenta un mismo problema variando el registro de representación semiótica (RRS) los problemas que se utilizan en los TP difieren de los utilizados en los Exámenes Parciales en que tienen gráficos que acompañan el enunciado textual y se utilizan situaciones reales. La ocurrencia del error es mayor en las entregas sucesivas del TP, como cada una de las entregas que van realizando los alumnos son semanales, reciben una retroalimentación por parte de los docentes. Este proceso no es lineal, sino de intercambio recurriendo a distintas representaciones semióticas del objeto matemático en estudio. Los porcentajes de error son más altos que los que corresponden a los Exámenes parciales ya que corresponden a la primera aproximación al objeto y se van superando por acercamientos sucesivos.

Por último, se han podido determinar dos perfiles con respecto a la ocurrencia de los errores, la incidencia de los errores que corresponden al Perfil 1 (Dificultades del lenguaje, Dificultades para obtener información espacial y Aprendizaje deficiente de hechos, destrezas y conceptos previos) en la Ocurrencia del error es mayor (0,639) que la que corresponde a los del Perfil 2 (Asociaciones incorrectas o rigidez de pensamiento y Aplicación de reglas o estrategias irrelevantes). La

elaboración de Trabajos prácticos así como Evaluaciones parciales teniendo en cuenta distintos tipos de RSS y en base a los perfiles determinados podría ser un camino posible para disminuir la ocurrencia del error.

5. REFERENCIAS

[1] Godino, J. D. Batanero, C. y Font, V.. The ontosemiotic approach to research in mathematics education. ZDM. The International Journal on Mathematics Education, 39 (1-2), 127-135. (2007)

[2] Godino, J. Origen y aportaciones de la perspectiva ontosemiótica de investigación en Didáctica de la Matemática. En A. Estepa, Á. Contreras, J. Deulofeu, M. C. Penalva, F. J. García y L. Ordóñez (Eds.), Investigación en Educación Matemática XVI (pp. 49 - 68). Jaén: SEIEM. (2012)

[3] Minnaard, C. Los errores en Probabilidad y Estadística: un análisis desde el enfoque ontosemiótico. Editorial Publicia, Alemania. (2015)

[4] Font, V.; Godino, J. & Gallardo, J.*The emergence of objects from mathematical practices*. Educational Studies in Mathematics.(2012)

[5] Socas, M. Dificultades, obstáculos y errores en el aprendizaje de las Matemáticas en la Educación Secundaria, cap. 5., pp. 125-154, en RICO, L., y otros: La Educación Matemática en la Enseñanza Secundaria. Barcelona: Ed. Horsori. (1997)

[6] Del Puerto, S., Minnaard, C. & Seminara , S. *Análisis de los errores una valiosa fuente de información acerca del aprendizaje de las matemáticas*. Revista Iberoamericana de Educación. Organización de los Estados Iberoamericanos(2006). En: http://www.rieoei.org/1285.htm [consultado: 10/05/2016]

[7]Duval, R. (2006). Un tema crucial en la educación matemática: La habilidad para cambiar el registro de representación. La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española, 9(1), 143-168.

[8] Radillo Enriquez, M. & Huerta Varela, S. *Obstáculos en el aprendizaje de la Geometría euclideana, relacionados con la traducción entre códigos del lenguaje matemático.* Experiencias, propuestas y reflexiones para la clase de matemática. Raquel Abrate y Marcel Pochulu (Comp). Universidad Nacional de Villa María Córdoba. (2007).

[9] Rico, L.. *Errores y dificultades en el aprendizaje de las Matemáticas*, cap. 3. pp. 69-108, en KILPATRIK, J.; GÓMEZ, P., y RICO, L.: Educación Matemática. Méjico: Grupo Editorial Iberoamérica. (1995)

[10] Pochulu, M. D. Análisis y categorización de errores en el aprendizaje de la matemática en alumnos que ingresan a la universidad. Revista Iberoamericana de Educación. Organización de Estados Iberoamericanos. N° 35/4. (2005) En: http://www.rieoei.org/did_mat28.htm [consultado: 11/07/2015]

[11]Godino. J. Indicadores de la idoneidad didáctica de procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas. Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática. Año 8. Número 11. pp 111-132. Costa Rica (2013)

[12] Minnaard, C. Análisis de los errores en matemática de los alumnos ingresantes a las carreras de Ingeniería: el Test Diagnóstico en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Tesis de Maestría en Metodología de la Investigación Científica. Universidad Nacional de Lanús, Buenos Aires, Argentina. (2014).

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DETERMINACIÓN DE DEFORMACIONES, TENSIONES Y DESPLAZAMIENTOS EN LA ENSEÑANZA DE RESISTENCIA DE MATERIALES.

Raffo Javier L.[1], Carrizo Marcos R.[1]

[1]Laboratorio de Mecánica Computacional y Experimental – Facultad Regional Delta – Universidad Tecnológica Nacional, San Martin 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
correo-e: jraffo@frd.utn.edu.ar - mcarrizo@frd.utn.edu.ar.

RESUMEN

En la mayoría de las carreras de ingeniería, una de las primeras etapas donde confluyen conocimientos del área de la física, matemática y materiales consiste en el estudio del comportamiento macroscópico de los materiales frente a cargas externas. Esta situación requiere que el alumno, además de la habilidad de combinar conocimientos previos, debiera adquirir una llamada "intuición" o "criterio" no explícito. Muchos de estos "criterios" están asociados a prácticas, que no siempre se realizan en cursos regulares.

A raíz de la experiencia en el dictado de la materia de grado Estabilidad I y II de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional es que evidenciamos la necesidad de contar con prácticas de laboratorio de los temas tratados en clase.

En el presente trabajo se desarrollaron prácticas que dotan a los estudiantes de medios para experimentar y aplicar la teoría. Por lo tanto, se intenta mejorar el entendimiento de los conceptos teóricos y así se busca que ganen confianza para enfrentar situaciones complejas. Por otra parte se busca aumentar su motivación y compromiso con la asignatura e incentivarlos a participar de los grupos de investigación para que generen experiencia durante el cursado de su carrera.

Las prácticas desarrolladas consisten en realizar cálculos analíticos complementados con modelos numéricos por el método de los elementos finitos y mediciones experimentales de deformaciones, tensiones y desplazamientos en una viga y un pórtico de dos tramos. De esta manera, los estudiantes refuerzan los conceptos estudiados en las clases teóricas y prácticas; como ser el cálculo de los esfuerzos internos, tensiones normales a la sección, energía de deformación y desplazamientos.

Palabras Claves: *ENSEÑANZA, RESISTENCIA DE MATERIALES, MEDICIONES, ELEMENTOS FINITOS, MÉTODO ANALÍTICO.*

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos mecánicos son parte integrante del curso de resistencia de Materiales. Esta materia necesita la argumentación experimental de las hipótesis originales, la comprobación de las deducciones teóricas y el estudio del proceso de deformaciones. Estas tareas deben ser cumplidas por las prácticas de laboratorio que acompañan el Curso de Resistencia de Materiales. [1,2]

Consideramos que en gran parte estas tareas deben ser cumplidas por las prácticas de laboratorio que acompañan el curso de la asignatura Estabilidad I, de la carrera de Ing. Mecánica de la UTN – FRD. Dentro de los temas curriculares de la Resistencia de los Materiales de varias carreras de ingeniería, se aplica la teoría de vigas Euler-Bernoulli, donde se estudia la relación existente entre las propiedades del material, la rigidez de una viga, las cargas aplicadas, los esfuerzos internos, las tensiones, deformaciones y el desplazamiento asociado.

El objetivo es que el alumno además de resolver con métodos analíticos, pueda observar el fenómeno físico de los problemas resueltos en clase para interpretar y afianzar los conceptos desarrollados. Por otra parte, se motiva acercarlos a la realización de modelos computacionales numéricos, a la programación para resolución de los problemas y a observar mediciones en laboratorio. Se busca además que el alumno reconozca las ventajas y limitaciones de cada método y que adquiera un criterio ingenieril a la hora de resolver problemas.

La motivación con que los alumnos afrontan las actividades académicas es uno de los factores más determinantes del proceso de aprendizaje. El alumno se ve atraído por todo aquello que tenga una aplicación real y directa, asumiendo un rol activo. Es decir, estar en contacto con el problema, observarlo, palparlo, medirlo. Por este motivo, es que la presente propuesta de trabajo se basa en la escuela del construccionismo aplicada a los campos de la teoría del aprendizaje [3,4], y siguiendo el planteo propuesto por Murillo y Saxe donde explican que tanto el proceso de creación como el producto final deben ser compartidos con otros para que el aprendizaje sea robusto [5].

En el presente trabajo se desarrollaron prácticas de laboratorio que dotan a los estudiantes de medios para experimentar y mejorar el entendimiento de los conceptos teóricos y ganar confianza para enfrentar situaciones complejas. De esta manera se busca un aumento en su motivación y compromiso con la asignatura.

2. ANÁLISIS DE TENSIONES, DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS.

Se analizan dos casos, el primero es el de una viga empotrada-libre sometida a una carga puntual en su extremo libre y el segundo es el de un pórtico de dos tramos que forman una L donde uno de los extremos se encuentra rígidamente empotrado y el otro extremo libre donde se aplica la carga puntual.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En el caso de la viga, el valor de la carga puntual aplicada se determina a partir de registrar el valor del desplazamiento. En el caso del pórtico, se aplican cargas puntuales mediante pesas calibradas. Se analizan diferentes valores de desplazamiento y cargas aplicadas y se determinan las tensiones en cuatro puntos de estudio mediante cálculos analíticos, modelos computacionales y mediciones. Finalmente se realiza una comparación entre los resultados obtenidos.

En la Figura 1a y 1b se presentan las dimensiones expresadas en milímetros, la posición de la carga y la posición de los instrumentos de medición de la viga y del pórtico respectivamente.

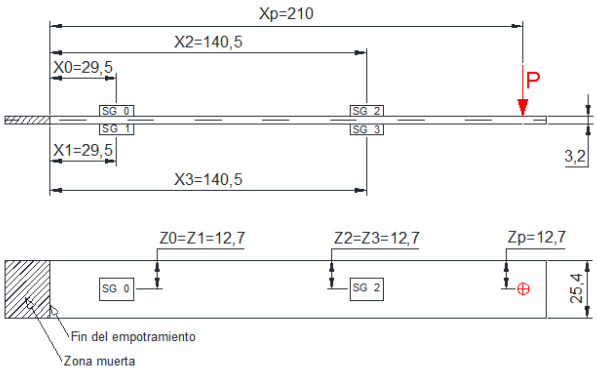


Figura 1a: Relevamiento dimensional de la viga.

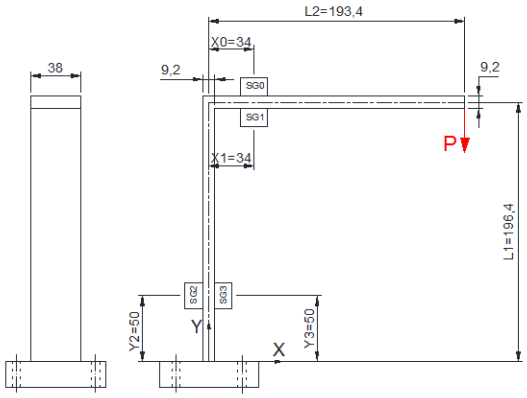


Figura 1b: Relevamiento dimensional del pórtico.

La viga es de aluminio 6063 cuya densidad es 2700 kg/m^3, módulo de Young, 6.3021 10^{10} N/m^2 y coeficiente de Poisson, 0.33. El pórtico es de acero al carbono con densidad 7850 kg/m^3, módulo de Young 2.06 10^{11} N/m^2 y coeficiente de Poisson 0.3.

2.1 Método analítico.

El valor de la carga aplicada se determina analíticamente aplicando el método de Castigliano [6] que relaciona la rigidez, la carga aplicada y el desplazamiento. En el caso de la viga, la energía de deformación es

$$U = \int_0^{x_p} \frac{M^2}{2EI} dx = \frac{1}{6} \frac{P^2 x_p^{\,3}}{EI}, \qquad (1)$$

donde E es el módulo de Young del material, I es el momento de inercia de la viga, y_p es el desplazamiento de la viga en el punto de aplicación de la carga y x_p es la distancia entre el empotramiento y el punto de aplicación de la carga.

El desplazamiento en el punto de aplicación de la carga está dado por

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$y_p = \frac{d}{dP}U = \frac{1}{3}\frac{P{x_p}^3}{EI}. \tag{2}$$

Por lo tanto la carga se determina considerando que

$$P = \frac{3EIy_p}{{x_p}^3}. \tag{3}$$

En el caso del pórtico, la relación analítica entre la carga y el desplazamiento, aplicando el método de la carga unitaria sin considerar el corte, está dada por

$$\begin{aligned}
\delta_y &= \int_0^{l_1} \frac{N\overline{N}}{EA}dx + \int_0^{l_1} \frac{M\overline{M}}{EI}dx + \int_0^{l_2} \frac{M\overline{M}}{EI}dx, \\
\delta_y &= \int_0^{l_1} \frac{(-P)(-1)}{EA}dx + \int_0^{l_1} \frac{(-Pl_2)(-l_2)}{EI}dx + \int_0^{l_2} \frac{\left[-P(l_2-x)\right]\left[-(l_2-x)\right]}{EI}dx, \\
\delta_y &= \frac{Pl_1}{EA} + \frac{Pl_2^2 l_1}{EI} + \frac{Pl_2^3}{3EI},
\end{aligned} \tag{4}$$

donde A es el área de la sección del pórtico, l_1 es la longitud del tramo vertical y l_2 es la distancia horizontal desde la unión de ambos tramos del pórtico al punto de aplicación de la carga. Para determinar en forma analítica la relación entre carga y desplazamiento y las tensiones, se programó una rutina en el programa Maple.

2.2 Método computacional

Para que los alumnos puedan observar resultados computacionales, se les presentan los componentes estructurales modelados con el método de elementos finitos utilizando tres tipos de elementos: de viga, de cáscara y sólido. En particular se utilizaron elementos Timoshenko de dos nodos en el caso de elementos de viga, elementos de cáscara de cuatro nodos con integración reducida y elementos tetraédricos cuadráticos de 10 nodos. Se realiza un análisis estático lineal para determinar la relación carga - desplazamiento y las tensiones en los puntos de medición.
Los alumnos observan los resultados y se los incita, pero no se les exige, a que los obtengan con programas de elementos finitos disponibles en el Grupo de Mecánica Computacional de la UTN-FRD.
Para definir el valor de la carga, en el caso de la viga, se emplea la relación analítica entre carga y desplazamiento, considerando desplazamientos de 1, 2, 3 y 4 mm.

ISBN: 978-987-1676-63-7

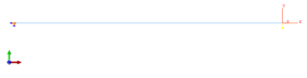
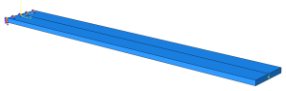
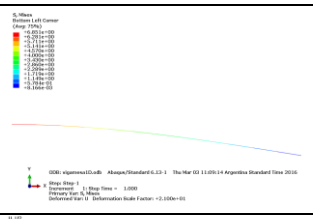
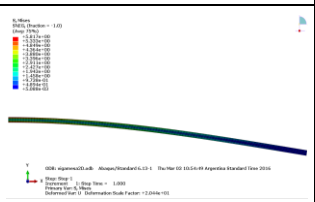
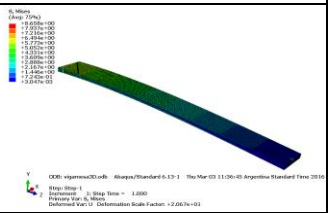
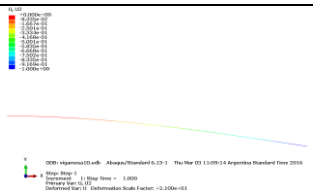
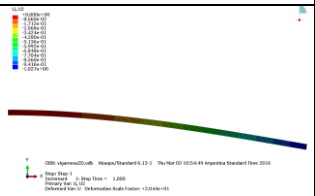
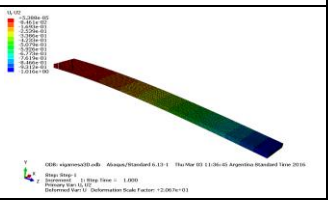
	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Modelo			
Tensiones			
Desplazamientos			

Figura 2: Imágenes de los modelos de elementos finitos, tensiones y desplazamientos de la viga.

En el caso del pórtico, se aplicó una carga puntual en su extremo libre, de 0, 2, 4, 5 y 6 kgf.

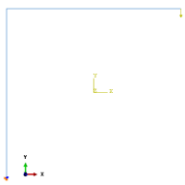
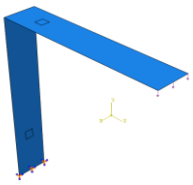
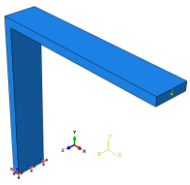
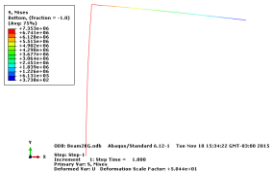
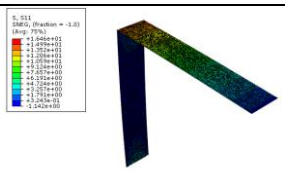
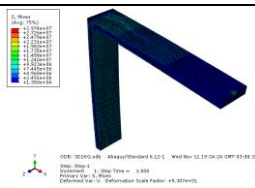
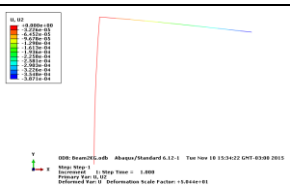
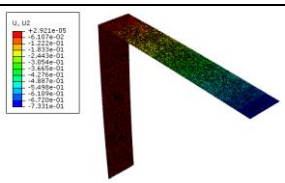
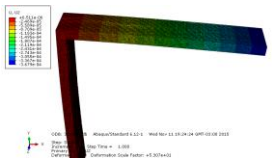
	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Modelo			
Tensiones			
Desplazamientos			

Figura 3: Imágenes de los modelos de elementos finitos, tensiones y desplazamientos del pórtico.

2.3 Mediciones en laboratorio

Se procedió a instalar las galgas extensométricas sobre las probetas, siguiendo un procedimiento de limpieza y acondicionamiento [7], pegado [8], soldado [9] y verificación de la cadena de medición [10].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se seleccionaron galgas específicas para realizar un análisis tensional estático y dinámico de propósito general o universal de la firma M-M Vishay [11]. En el caso de la viga las galgas empleadas son CEA-13-250UW-350 y para el pórtico son CEA-06-125UN-350.

La cadena de medición consiste en conectar las galgas a unas borneras que completan el puente de Wheatstone. Estas a su vez son conectadas al módulo NI 9237 de la firma National Instruments [12], conectado al chasis NI CompactDAQ USB de 4 ranuras de la misma firma.

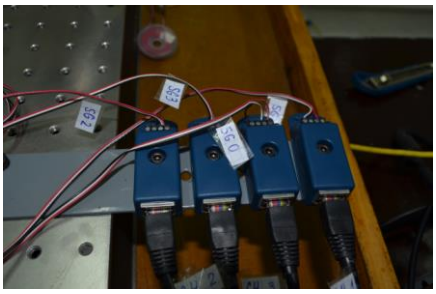


Figura 4a: Borneras para completar el puente de Wheatstone.

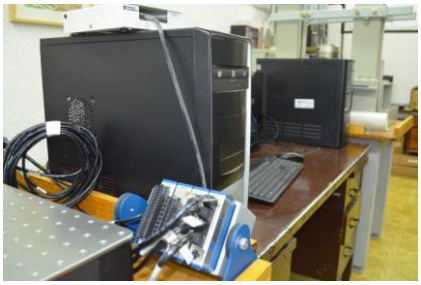


Figura 4b: Sistema de adquisición de datos y PC.

En el caso de la viga, para la adquisición, almacenamiento, visualización, manipulación, procesamiento y presentación de las señales manejadas (voltajes que representan deformaciones unitarias) se desarrolló un programa en LabVIEW 2009. El programa resuelve de forma analítica los valores del momento de inercia, el valor de la carga y las tensiones en los puntos donde están ubicadas las galgas al mismo tiempo que presenta los resultados online de mediciones de tensión y deformación en cada galga extensométrica. En la Figura 5 se presenta una imagen del panel de operaciones desarrollado. En el mismo, el usuario puede ingresar el valor del módulo de Young, la frecuencia de muestreo, la ubicación de las cuatro galgas extensométricas, las dimensiones de la sección, la ubicación de la carga respecto al empotramiento, el valor del desplazamiento inducido y se visualiza en un display las deformaciones, las tensiones junto con su error relativo porcentual.

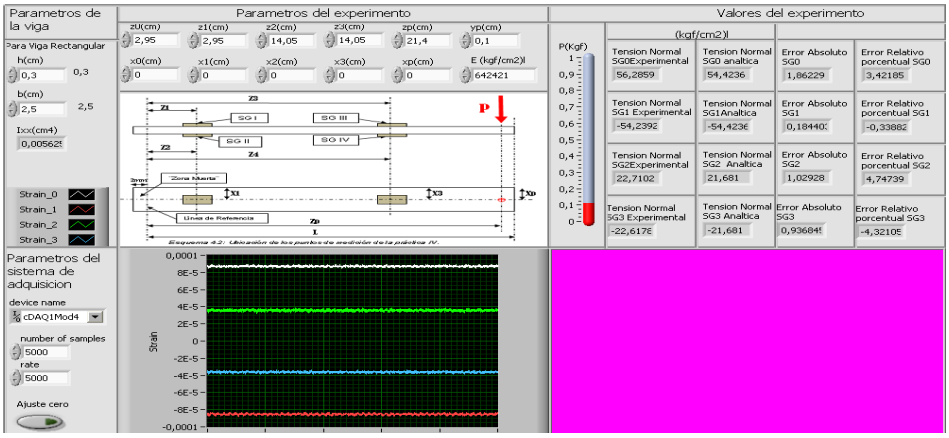


Figura 5: Pantalla de la consola de operaciones desarrollada para calcular y adquirir datos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En el caso del pórtico se utilizó un procedimiento de medición y programa en LabView similar al caso de la viga.

En la Figura 6a se observa la configuración experimental empleada en el caso de la viga. En la Figura 6b, se observa la experiencia para el caso del pórtico.



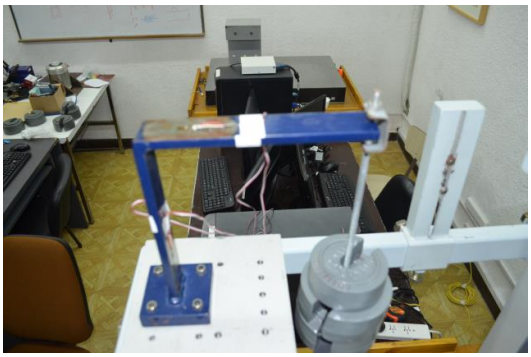


Figura 6a: Desarrollo de la experiencia de la viga.
Figura 6b: Desarrollo de la experiencia del pórtico.

3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 7 se presenta la comparación de los resultados de desplazamiento obtenidos para la viga mediante los tres métodos descritos con las cargas definidas en forma analítica.

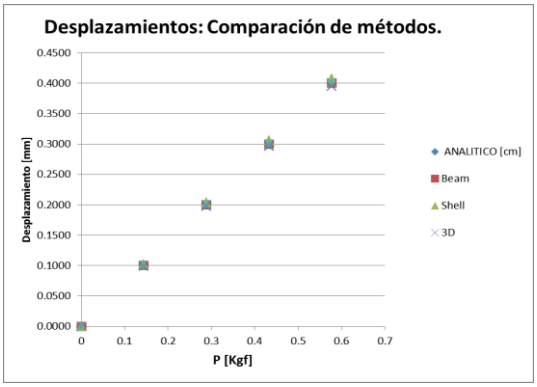


Figura 7: Comparación de los resultados de desplazamiento obtenidos para la viga.

En la Figura 8 se presentan los resultados para la viga de los valores de tensión obtenidos por los distintos métodos en los puntos donde están ubicadas las galgas extensométricas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

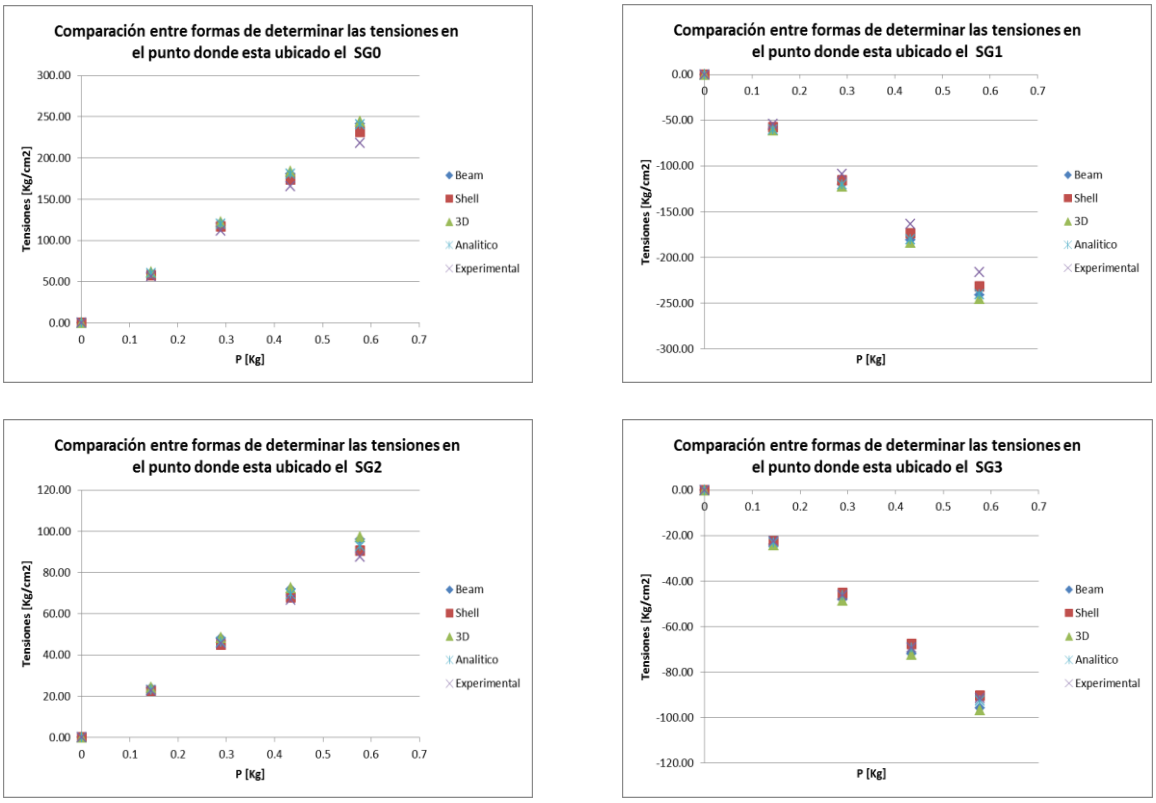


Figura 8: Valores de tensión obtenidos para la viga por los distintos métodos en los puntos donde están ubicadas las galgas extensométricas.

En la Figura 9 se presenta la comparación de los resultados de desplazamiento obtenidos para el pórtico mediante los tres métodos descritos.

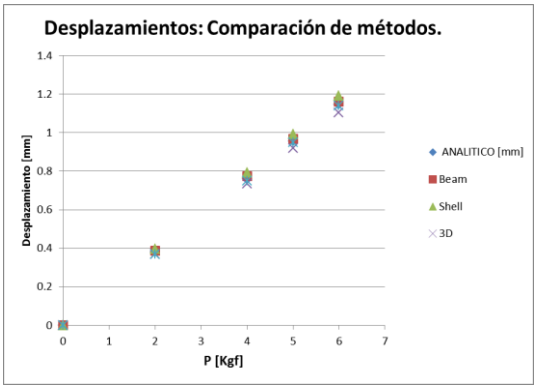


Figura 9: Comparación de los resultados de desplazamiento obtenidos para el pórtico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Figura 10 se presentan los resultados de los valores de tensión obtenidos por los distintos métodos en los puntos donde están ubicados los Strain Gages para el pórtico.

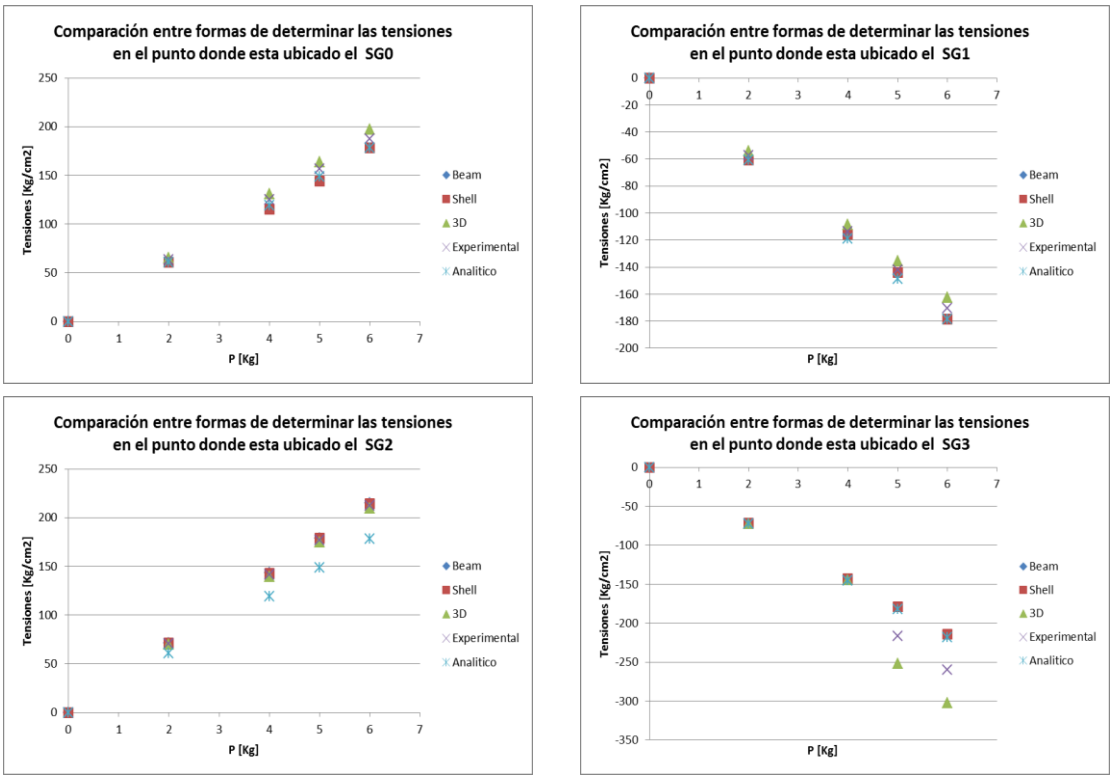


Figura 10: Valores de tensión obtenidos para el pórtico por los distintos métodos en los puntos donde están ubicados los Strain Gages.

4. RESULTADOS DE LA ENCUESTA A ESTUDIANTES

A fin de exponer resultados pedagógicos, mediante algún indicador objetivo que permita evaluar el cambio producido en los estudiantes a partir de la realización de la práctica, se procedió a encuestar a los alumnos participantes de forma no obligatoria y anónima.

Los resultados de la encuesta indican que los alumnos observaron una relación estrecha entre la práctica de laboratorio y los contenidos de la asignatura. Resaltaron el cálculo de las propiedades de la sección, reacción de vínculo, esfuerzo y tensión.

Además relacionan parte de los contenidos de otras asignaturas como Materiales Metálicos, Mecánica I, Análisis matemático I y II, Física, Mediciones y Ensayos y Cálculo Numérico. Moderadamente les permitió tomar contacto con otras disciplinas y herramientas, entre ellas el programa Maple para la resolución de los cálculos analíticos, el programa Labview para la adquisición, visualización, análisis y almacenamiento de las señales y el modelado computacional para implementar el método de los elementos finitos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Resaltan que la práctica les permitió mejorar el entendimiento de los conceptos teóricos y prácticos, les ayudo a visualizar que el sistema físico idealizado y los modelos aplicados en la resolución de problemas de estabilidad y resistencia de materiales son aplicables en el mundo real. La mayoría expresa que les ayudó a aumentar su motivación y compromiso con la asignatura y a interesarse en participar de este u otro grupo de investigación. Además, sugirieron que se realicen más trabajos prácticos de laboratorio, incluso uno por cada tema desarrollado en clase.

En la Figura 11 se presentan algunos resultados de preguntas específicas de la encuesta realizada a los alumnos que participaron de la práctica de laboratorio.

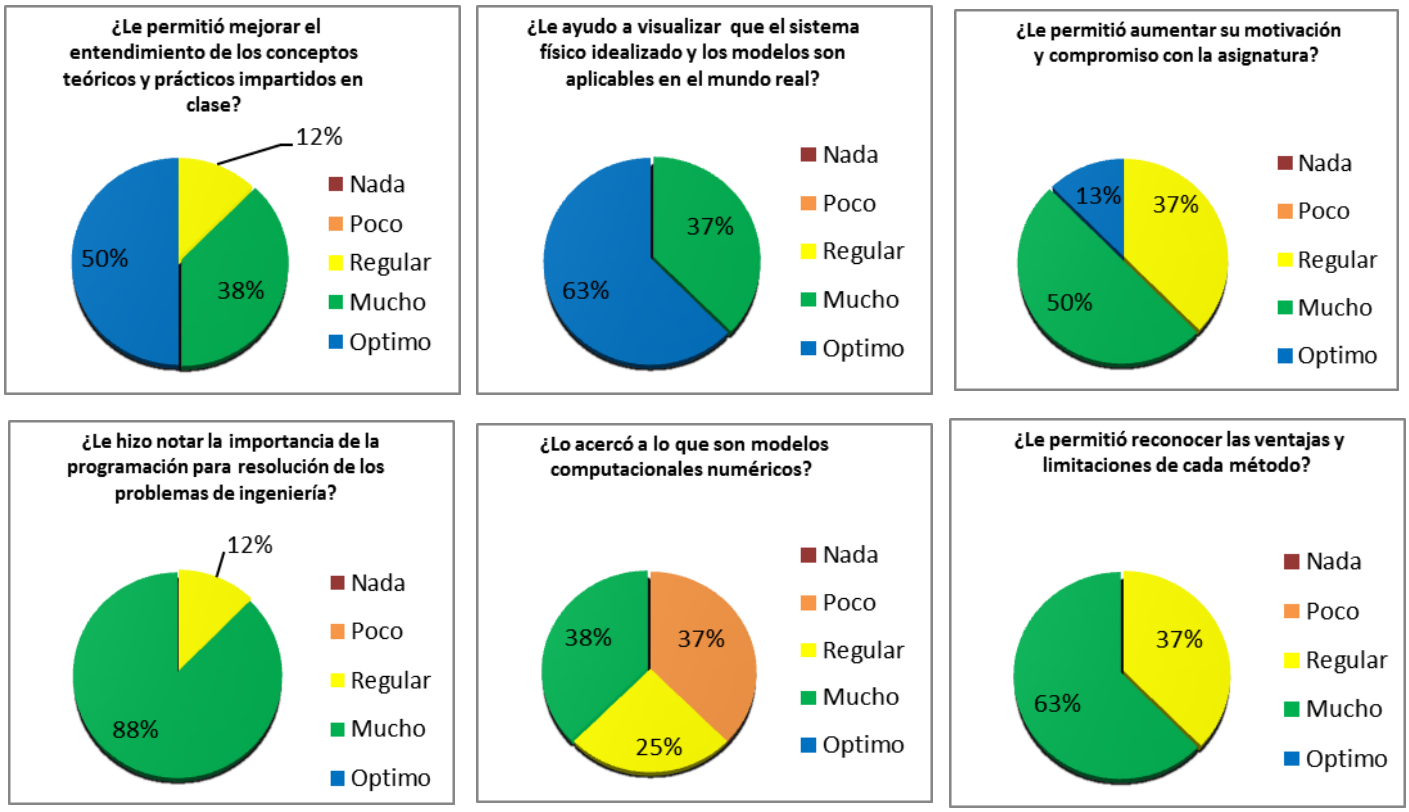


Figura 11: Algunos resultados cuantitativos de la encuesta realizada a los alumnos.

5. CONCLUSIONES

Para la asignatura Estabilidad I de la UTN – FRD se redactaron y ejecutaron prácticas de laboratorio, donde se estudia la relación existente entre las propiedades del material, la rigidez, las cargas aplicadas, los esfuerzos internos, las tensiones, deformaciones y el desplazamiento asociado.

Se obtuvo la relación analítica mediante el teorema de Castigliano entre el desplazamiento transversal y la carga puntual aplicada de una viga y un pórtico de dos tramos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se obtuvieron las tensiones normales a la sección en cuatro puntos de interés, los desplazamientos del extremo libre en ambos componentes estructurales utilizando métodos analíticos, mediciones en laboratorio y mediante el método de elementos finitos con elementos de viga, de cáscara y sólidos.

Los resultados de la encuesta realizada a los alumnos que participaron de la práctica de laboratorio muestran que se logró el objetivo de mejorar el entendimiento de los conceptos teóricos y aumentar su motivación y compromiso con la asignatura e incentivar a los alumnos a participar de los grupos de investigación para que generen experiencia durante el cursado de su carrera.

6. REFERENCIAS

[1] Pisarenko, G. S., Yakovlel, A. P., Matveev, V. V., *Manual de resistencia de materiales*, editorial Mir, Moscú, 1979.

[2] Afanasiev, *Prácticas de laboratorio sobre resistencia de materiales*, Editorial RUBIÑOS 1860, ISBN 9789999032803.

[3] Papert, S., *Desafío de la mente*, Ediciones Galápagos, Buenos Aires, 1987.

[4] Piaget, J. *The origins of intelligence in children (2nd ed.),* International Universities Press, New York, 1952.

[5] Murillo, A., Saxe, E., *Construccionismo: Objetos para pensar, entidades públicas y Micromundos*, Revista Electrónica Actualidades Investigativas en Educación, vol. 4, núm. 1, enero-junio, 2004, p. 8. Disponible en la WEB: http://www.redalyc.org/pdf/447/44740104.pdf, 2004.

[6] James M. Gere, *Mecánica de Materiales*, editorial Thomson, sexta Edición, Mexico D.F., año 2006, Pág. 647.

[7] *Instruction Bulletin B-129-8: Surface Preparation for Strain Gage Bonding*, Vishay, Micro-Measurement´s.

[8] *Instruction Bulletin B-127-14: Strain Gage Installations with M-Bond 200 Adhesive*, Vishay, Micro-Measurement´s.

[9] *Application Note TT-609: Strain Gage Soldering Techniques*, Vishay, Micro-Measurement´s.

[10] *Application Note VMM-8: Installation Verification*, Vishay, Micro-Measurement´s.

[11] *Tech Note TN-505-4 Strain Gage Selection: Criteria, Procedures, Recommendations*, Vishay, Micro-Measurement´s.

[12] *NI 9237 Operating Instructions and Specifications*, pág. 11.

Agradecimientos

Los autores de esta publicación desean agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional y a la Facultad Regional Delta, ya que este trabajo fue realizado dentro del proyecto PID UTN 3487.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE UN MODELO DE EVALUACIÓN POR COMPETENCIAS APLICABLE A LAS CARRERAS DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL DE LA FI-UNLZ

Mg. Rodríguez Leandro [1], **Lic. Fleytas Erika** [2] **y Mg. Morrongiello Noelia** [3]

[1] Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación – Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Camino de Cintura y Juan XXIII, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina
correo-e: lrodriguez@montamar.com.ar; erikafleytas@yahoo.com.ar; morrongiello_noelia@yahoo.com.ar
[2] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora

RESUMEN

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, hace algunos años, teniendo como referencia al CONFEDI, comenzó a indagar, desarrollar y aplicar en diversas actividades el desarrollo y formación de competencias en los estudiantes de ingeniería, con el propósito que los alumnos puedan adquirir competencias básicas y específicas de la carrera.

Por otra parte, además de las carreras de grado y posgrado, la institución dentro de sus ofertas académicas, dispone del Ciclo de Complementación Curricular de Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo, orientado a técnicos graduados en higiene y seguridad en el trabajo.

Con el objetivo de implementar un modelo de evaluación por competencias, aplicable a las carreras de grado, Ingeniería Industrial y Mecánica, desde el Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación, se decidió desarrollar una prueba modelo ajustable al ciclo de licenciatura, con la finalidad de poder determinar la viabilidad de trasladar este modelo, a las carreras de la Facultad de Ingeniería, ya mencionadas.

El modelo desarrollado, se basó en primer lugar, en seleccionar las competencias que más se adecuan a la carrera de Higiene y Seguridad, en base al documento del CONFEDI, las mismas se modificaron adaptándolas a las asignaturas de la misma.

Una vez seleccionadas, se determinó en qué materias se aplicarían, y a ello se le asignó un porcentaje de cumplimentación para cada asignatura. Una vez definido esto, se avanzó a la etapa de determinación de modelos de evaluación para cada materia y competencia.

En base a esta prueba piloto, se espera poder trasladar un modelo efectivo a las distintas ofertas académicas de la institución.

Palabras Claves: *Competencias-Ingeniería-Modelo Aplicable- Higiene y Seguridad.*

Área Temática: Enseñanza.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el desarrollo de documentos basado en competencias, realizados por el CONFEDI, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, se ha interesado por plantear sus planes de estudios y metodología aplicadas en las cátedras, basados en competencias.

Actualmente, y con una previa experiencia en esta temática, se decidió ahondar en el desarrollo de competencias, generando un sistema evaluativo de las mismas, en función de poder establecer un modelo que permita ser aplicado a nuestra institución, en las carreras de ingeniería mecánica e industrial, y por consiguiente a otras instituciones.

Para el inicio de este proceso, se decidió realizar una prueba piloto en el Ciclo de Complementación Curricular que otorga el título de Licenciado en Higiene y Seguridad, el cual se dicta en la Sede Avellaneda, de nuestra Facultad de Ingeniería.

En primera instancia, se seleccionaron competencias del documento del CONFEDI, que se pudieran aplicar y evaluar a las asignaturas de la carrera, modificándolas y adaptándolas en función contenidos de la carrera de higiene y seguridad, luego, se determinó el grado de evaluación para cada una de ellas, en función de las actividades y trabajos o evaluaciones que se prevén en las materias.

Esto arrojó como resultado un cuadro de correspondencia entre resultados del aprendizaje, actividades formativas y métodos de evaluación.

Este modelo, es el primer acercamiento a una posible evaluación y asignación de adquisición de competencias en estudiantes, que se espera, en función de su aplicación en el primer y segundo cuatrimestre 2016, determinar si es posible emplearlo en las carreras de ingeniería de nuestra institución, si necesita modificaciones para que pueda implementarse con el objetivo de formar estudiantes con competencias reales adquiridas.

1.1. Objetivos

Objetivo General: Desarrollar un modelo de evaluación de competencias, aplicable a las carreras de Ingeniería Industrial y Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

Objetivos Específicos:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Desarrollar un modelo de evaluación por competencias específico, para aplicar en el Ciclo de Complementación Curricular de Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

- Aplicar el modelo de evaluación por competencias en el Ciclo de Complementación Curricular de Licenciatura en Higiene y Seguridad de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

1.2 Metodología

Tal como se ha mencionado anteriormente, se optó por desarrollar y aplicar un modelo de evaluación por competencias en el Ciclo de Complementación Curricular, Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo, que se dicta en la Sede Avellaneda de la Facultad de Ingeniería de la UNLZ.

La Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo, posee como principal requisito, que los alumnos sean técnicos graduados en Higiene y Seguridad en el Trabajo o carrera afín, con una duración de tres años, superando una carga horaria mínima de 1164 hs.

Dicha carrera, se encuentra aprobada bajo la Resolución Ministerial 220/05, con una duración de dos años. Para el primer año, las materias que se dictan son de ciencias básicas: álgebra, análisis matemático I, física I, inglés técnico, análisis matemático II, física II, termodinámica, química general y trabajo integrador de ciencias básicas. Esto, permite poder desarrollar y aplicar un modelo de evaluación por competencias, que luego, sencillamente, pueda trasladarse a carreras como ingeniería industrial y mecánica, dado que muchas son asignaturas que se asimilan en ambas ofertas académicas, pudiéndose implementar en el ciclo básico e intermedio de nuestra institución.

En el segundo año de la carrera, las materias que se dictan son: medio ambiente e impacto ambiental, sistemas de gestión de la calidad, seguridad en bancos y empresas de servicios, informática aplicada, trabajo de campo y seminario de tesis, con su defensa de tesis, que permite la obtención del título. Desde esta visión, es posible trasladar la experiencia de aplicación del modelo, a las asignaturas del ciclo superior de las carreras de ingeniería industrial y mecánica de nuestra institución.

En función de las asignaturas mencionadas y teniendo como principal referencia el documento desarrollado por CONFEDI, se realizó una selección de competencias tecnológicas y actitudinales, que se modificaron en función de las necesidades de la carrera de higiene y seguridad, y según las actividades y contenidos previstas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

COMPETENCIAS GENÉRICAS ACORDADAS COMPETENCIAS TECNOLÓGICAS

1. Competencia para identificar, formular y resolver problemas relacionados con la Higiene y Seguridad en el trabajo.
2. Competencia para gestionar -planificar, ejecutar y controlar- proyectos de Higiene y Seguridad en el trabajo.
3. Competencia para utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de la Higiene y Seguridad en el trabajo.

COMPETENCIAS SOCIALES, POLÍTICAS Y ACTITUDINALES

4. Competencia para desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo.
5. Competencia para comunicarse con efectividad.
6. Competencia para aprender en forma continua y autónoma.
7. Competencia para actuar con espíritu emprendedor

Cada una de estas competencias, fue desagregada en sus respectivas capacidades.

Para desarrollar el modelo de evaluación por competencias, y poder aplicarlo en el primer y segundo cuatrimestre 2016, se decidió seleccionar materias que se correlacionan y que tienen similitudes en cuanto a la metodología implementada, aunque diversos contenidos. El avance de estas asignaturas implicará también un avance en el grado de adquisición de competencias.

Las asignaturas seleccionadas fueron:

Trabajo Integrador de Ciencias Básicas: correspondiente al segundo cuatrimestre de la carrera, teniendo como objetivo integrar todas las asignaturas previas a la misma, que se dictan durante todo el primer año de la carrera. Esto abarca todas las ciencias básicas del plan de estudios de la carrera en cuestión.

Trabajo de Campo: corresponde al tercer cuatrimestre de la carrera, y su aplicación permite elaborar informes técnicos aplicados al campo de investigación de la higiene y seguridad en el trabajo.

Seminario de Tesis: corresponde al cuarto y último cuatrimestre de la carrera, su elaboración, conllevará a la defensa de tesis y graduación de los estudiantes de la licenciatura en higiene y seguridad en el trabajo.

Una vez que se seleccionaron las materias de la carrera y las competencias que se evaluarán, se comenzó a trabajar en el cuadro de correspondencia entre resultados del aprendizaje, actividades formativas y métodos de evaluación, lo que nos dan a nuestro modelo de evaluación por competencias aplicado en el ciclo de complementación curricular de licenciatura en higiene y seguridad en el trabajo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para la conformación del modelo de evaluación, se pensó en confeccionarlo con la asignatura, ejemplos de resultado de aprendizaje, contenidos, actividades formativas y el sistema de evaluación.

A continuación, se desarrollarán los resultados de la conformación del modelo de evaluación.

1.3 Resultados

Tal como se mencionó anteriormente, el cuadro de correspondencia entre resultados del aprendizaje, actividades formativas y métodos de evaluación, que en su desarrollo contempla la asignatura, ejemplos de resultados de aprendizaje, contenidos, actividades formativas y sistema de evaluación, permitió desarrollar el modelo que se aplicará en la carrera de higiene y seguridad en el trabajo, que luego, se espera, pueda implementarse en las carreras de ingeniería de nuestra institución.

Acto siguiente, se describe el desarrollo por cada una de las tres asignaturas seleccionadas en esta primera instancia (Ver Tabla 1)

Trabajo Integrador de Ciencias Básicas:

Ejemplos de resultados de aprendizaje: El trabajo integrador de ciencias básicas pretende alcanzar una integración de las ciencias básicas de las carreras con el campo profesional del egresado, dando así un significado global de los saberes obtenidos de manera parcializada, en las distintas asignaturas, y poder comprender la importancia de cada uno de ellos para la profesión.
Contenidos: Organización de la asignatura y explicación de la modalidad de la misma. Cronograma de actividades. Planteo del tema a desarrollar. La estructura del trabajo integrador: introducción, desarrollo y conclusión. Las herramientas que brindan las ciencias básicas que nos permite utilizarlas como herramientas auxiliares de la profesión. Cálculos específicos a desarrollar para realiza la relación con cada asignatura. Relación del tema con cada una de las asignaturas cursadas: Análisis Matemático I y II; Física I y II, Ingles, Química general; Termodinámica y Algebra. Citas bibliográficas. Elaboración de un informe final.
Actividades Formativas: Exposición por parte del cuerpo docente de los lineamientos.
Conformación de los grupos y propuesta del tema del trabajo. Identificación del responsable de las entregas parciales del trabajo que realiza el grupo. Reparto del cronograma de actividades propuesto por el cuerpo docente. Definir los roles dentro del equipo de trabajo. Reparto del trabajo a desarrollar por los integrantes en sus hogares. Reuniones para integrar los resultados.
Participación activa del estudiante para superar las distintas etapas del TI. Exposición oral del grupo en un coloquio.
Sistema de Evaluación:

- 40% entregas realizadas en tiempo y forma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- 25% Trabajo Final entregado.
- 25% Coloquio Final.
- 10% Uso de las herramientas informáticas e información.

A lo largo de todo el trabajo debe observarse una secuencia lógica, coherencia interna, consistencia y claridad conceptual. Así también debe contener información pertinente y precisión en el uso de vocabulario. Se detallan a continuación los criterios a tener en cuenta para la corrección:

- Cumplimiento de consignas.
- Presentación en los plazos acordados y formas adecuadas.
- Elaboración y contenido de la investigación.

Trabajo de Campo:

Ejemplos de Resultados de Aprendizaje de la Asignatura: Trabajo de campo busca lograr la integración entre las asignaturas de la carrera con el ámbito profesional del egresado, desarrollando de esta forma, los conocimientos necesarios para que el egresado tenga una práctica anticipada del ejercicio de la profesión.

Contenidos: Organización de la asignatura y explicación de la modalidad de la misma. Cronograma de actividades. Planteo de los trabajos a realizar. La estructura que deben tener los trabajos de campo: Resumen ejecutivo, Introducción, Desarrollo, Conclusiones, Conclusiones generales, Anexos (protocolos, planos, instructivos). Medición de Iluminación. Medición de ruido. Plan de evacuación. Confección de programa de seguridad.

Actividades Formativas: Exposición por parte del profesor explicando los lineamientos. Reunión de grupo en clase para tomar decisiones acerca del abordaje del trabajo propuesto. Definición de tareas a realizar dentro del establecimiento. Definición de roles dentro del equipo de trabajo. Reuniones para integrar resultados. La partición del estudiante deberá ser activa, proponiendo soluciones, analizando las propuestas y presentando nuevas. Prácticas de exposición oral buscando mejorar las habilidades.

Sistema de Evaluación:

- 35% entregas realizadas en tiempo y forma.
- 30% trabajo de campo entregado.
- 35% exposición oral.

A lo largo de todo el trabajo debe observarse una secuencia lógica, coherencia interna, consistencia y claridad conceptual. Así también debe contener información pertinente y precisión en el uso del vocabulario. Se detallan a continuación los criterios a tener en cuenta para la corrección:

- Cumplimiento de consignas

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Presentación en los plazos acordados y formas adecuadas.
- Elaboración y contenido de la investigación.
- Interacción en el grupo y con el docente.

Seminario de Tesis:

Ejemplos de Resultados de Aprendizaje de la Asignatura: El seminario de tesis tiene como propósito integrar los conocimientos adquiridos y las actividades desarrolladas durante toda la cursada de la Licenciatura en Higiene y Seguridad en el trabajo. Buscando como resultado final elaborar una memoria de investigación (tesis).

Contenidos: Organización general de la tesis. Los antecedentes. Planteamiento del problema. La Justificación. Definición de objetivos. Hipótesis. Contenido. Tratamiento de las fuentes y citas. Relación con el problema de investigación. Relación con los objetivos y las hipótesis. Revisión de las fuentes. Organización de los fundamentos. Enfoque metodológico. Categorías, variables e indicadores. Población y muestra. Elaboración, selección y desarrollo de instrumentos. Prueba piloto, validación y consistencia de los instrumentos. Resultados y apartados finales del documento. Conclusiones. Recomendaciones. Fuentes consultadas

Actividades Formativas: Exposición por parte del profesor explicando los lineamientos. Reunión de grupo en clase para tomar decisiones acerca del abordaje del trabajo propuesto. Reparto del trabajo a hacer individualmente en casa. Definición de roles dentro del equipo de trabajo. Reuniones para integrar resultados. La partición del estudiante deberá ser activa, proponiendo soluciones, analizando las propuestas y presentando nuevas. Prácticas de exposición oral buscando mejorar las habilidades. Exposición oral final de defensa de tesis.

Sistema de Evaluación:

- 20 % Entregas realizadas en tiempo y forma.
- 60 % Memoria de investigación (tesis) final
- 20% Exposición final

Criterios de evaluación: Adecuada estructura formal del trabajo final. La información está integrada. Conocimiento integral del tema tratado. Interacción y trabajo en equipo (asumir liderazgo, completar tareas asignadas, colaborar, negociar)

Una vez desarrollado el cuadro de correspondencia, se designó para todas las asignaturas, las competencias seleccionadas, que deberán ser evaluadas en cada una de ellas.

Se detalla, a continuación, las competencias seleccionadas y las asignaturas definidas (Ver Tabla 2):

1. Competencia para identificar, formular y resolver problemas relacionados con la Higiene y Seguridad en el trabajo: Todas las asignaturas de la carrera.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. Competencia para gestionar -planificar, ejecutar y controlar- proyectos de Higiene y Seguridad en el trabajo: Medio ambiente e impacto ambiental, seguridad en bancos y empresas de servicios, sistemas de gestión de la calidad, trabajo de campo y seminario de tesis.

3. Competencia para utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de la Higiene y Seguridad en el trabajo: Trabajo Integrador, Trabajo de Campo y Seminario de Tesis.

4. Competencia para desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo: Trabajo Integrador, Trabajo de Campo y Seminario de Tesis.

5. Competencia para comunicarse con efectividad: Trabajo Integrador, Trabajo de Campo y Seminario de Tesis.

6. Competencia para aprender en forma continua y autónoma: Trabajo Integrador, Trabajo de Campo y Seminario de Tesis.

7. Competencia para actuar con espíritu emprendedor: Trabajo Integrador, Trabajo de Campo y Seminario de Tesis.

La aplicación de este modelo, en el ciclo de complementación curricular Higiene y Seguridad en el Trabajo, en las asignaturas Trabajo Integrador de Ciencias Básicas, Trabajo de Campo y Seminario de Tesis, este primer y segundo cuatrimestre 2016, se espera poder definir su posibilidad de aplicación a las carreras de ingeniería de nuestra institución.

2. TABLAS

Tabla 1. Cuadro de Correspondencia entre resultados del aprendizaje, actividades formativas y métodos de evaluación

CORRESPONDENCIA ENTRE RESULTADOS DEL APRENDIZAJE, ACTIVIDADES FORMATIVAS Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN

ASIGNATURA	EJEMPLOS DE RESULTADOS DE APRENDISAJE DE ASIGNATURA	CONTENIDOS	ACTIVIDADES FORMATIVAS	SISTEMA DE EVALUACIÓN
SEMINARIO DE TESIS FORMACIÓN OBLIGATORIA **TÍTULO:** LICENCIADO EN HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO **INSTITUCIÓN:** UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA	El seminario de tesis tiene como propósito integrar los conocimientos adquiridos y las actividades desarrolladas durante toda la cursada de la Licenciatura en Higiene y Seguridad en el trabajo. Buscando como resultado final elaborar una memoria de investigación (tesis).	Organización general de la tesis. Los antecedentes. Planteamiento del problema. La Justificación. Definición de objetivos. Hipótesis. Contenido. Tratamiento de las fuentes y citas. Relación con el problema de investigación. Relación con los objetivos y las hipótesis. Revisión de las fuentes. Organización de los fundamentos. Enfoque metodológico. Categorías, variables e indicadores. Población y muestra. Elaboración, selección y desarrollo de instrumentos. Prueba piloto, validación y consistencia de los instrumentos. Resultados y apartados finales del documento. Conclusiones Recomendaciones. Fuentes consultadas	• Exposición por parte del profesor explicando los lineamientos. • Reunión de grupo en clase para tomar decisiones acerca del abordaje del trabajo propuesto. • Reparto del trabajo a hacer individualmente en casa. • Definición de roles dentro del equipo de trabajo. • Reuniones para integrar resultados. La partición del estudiante deberá ser activa, proponiendo soluciones, analizando las propuestas y presentando nuevas. • Prácticas de exposición oral buscando mejorar las habilidades. • Exposición oral final de defensa de tesis.	20 % Entregas realizadas en tiempo y forma. 60 % Memoria de investigación (tesis) final 20% Exposición final Criterios de evaluación: Adecuada estructura formal del trabajo final. La información está integrada. Conocimiento integral del tema tratado. Interacción y trabajo en equipo (asumir liderazgo, completar tareas asignadas, colaborar, negociar)

ISBN: 978-987-1676-63-7

CORRESPONDENCIA ENTRE RESULTADOS DEL APRENDIZAJE, ACTIVIDADES FORMATIVAS Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN

ASIGNATURA	EJEMPLOS DE RESULTADOS DE APRENDISAJE DE ASIGNATURA	CONTENIDOS	ACTIVIDADES FORMATIVAS	SISTEMA DE EVALUACIÓN
TRABAJO DE CAMPO FORMACIÓN OBLIGATORIA **TÍTULO:** LICENCIADO EN HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO **INSTITUCIÓN:** UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA	Trabajo de campo busca lograr la integración entre las asignaturas de la carrera con el ámbito profesional del egresado, desarrollando de esta forma, los conocimientos necesarios para que el egresado tenga una práctica anticipada del ejercicio de la profesión.	Organización de la asignatura y explicación de la modalidad de la misma. Cronograma de actividades. Planteo de los trabajos a realizar. La estructura que deben tener los trabajos de campo: Resumen ejecutivo, Introducción, Desarrollo, Conclusiones, Conclusiones generales, Anexos (protocolos, planos, instructivos). Medición de Iluminación. Medición de ruido. Plan de evacuación. Confección de programa de seguridad.	• Exposición por parte del profesor explicando los lineamientos. • Reunión de grupo en clase para tomar decisiones acerca del abordaje del trabajo propuesto. • Definición de tareas a realizar dentro del establecimiento. • Definición de roles dentro del equipo de trabajo. • Reuniones para integrar resultados. La partición del estudiante deberá ser activa, proponiendo soluciones, analizando las propuestas y presentando nuevas. • Prácticas de exposición oral buscando mejorar las habilidades.	35% entregas realizadas en tiempo y forma. 30% trabajo de campo entregado. 35% exposición oral. A lo largo de todo el trabajo debe observarse una secuencia lógica, coherencia interna, consistencia y claridad conceptual. Así también debe contener información pertinente y precisión en el uso del vocabulario. Se detallan a continuación los criterios a tener en cuenta para la corrección: Cumplimiento de consignas Presentación en los plazos acordados y formas adecuadas. Elaboración y contenido de la investigación. Interacción en el grupo y con el docente.

ASIGNATURA	EJEMPLOS DE RESULTADOS DE APRENDISAJE DE ASIGNATURA	CONTENIDOS	ACTIVIDADES FORMATIVAS	SISTEMA DE EVALUACIÓN
TRABAJO INTEGRADOR DE CIENCIAS BÁSICAS FORMACIÓN OBLIGATORIA **TÍTULO:** LICENCIADO EN HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO **INSTITUCIÓN:** UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA	El trabajo integrador de ciencias básicas pretende alcanzar una integración de las ciencias básicas de las carreras con el campo profesional del egresado, dando así un significado global de los saberes obtenidos de manera parcializada, en las distintas asignaturas, y poder comprender la importancia de cada uno de ellos para la profesión	Organización de la asignatura y explicación de la modalidad de la misma. Cronograma de actividades. Planteo del tema a desarrollar. La estructura del trabajo integrador: introducción, desarrollo y conclusión. Las herramientas que brindan las ciencias básicas que nos permite utilizarlas como herramientas auxiliares de la profesión. Cálculos específicos a desarrollar para realiza la relación con cada asignatura. Relación del tema con cada una de las asignaturas cursadas: Análisis Matemático I y II; Física I y II, Ingles, Química general; Termodinámica y Algebra. Las citas bibliográficas. Elaboración de un informe final.	• Exposición por parte del cuerpo docente de los lineamientos. • Conformación de los grupos y propuesta del tema del trabajo. • Identificación del responsable de las entregas parciales del trabajo que realiza el grupo. • Reparto del cronograma de actividades propuesto por el cuerpo docente. • Definir los roles dentro del equipo de trabajo. • Reparto del trabajo a desarrollar por los integrantes en sus hogares. • Reuniones para integrar los resultados. • Participación activa del estudiante para superar las distintas etapas del TI. • Exposición oral del grupo en un coloquio.	40% entregas realizadas en tiempo y forma. 25% Trabajo Final entregado. 25% Coloquio Final. 10% Uso de las herramientas informáticas e información. A lo largo de todo el trabajo debe observarse una secuencia lógica, coherencia interna, consistencia y claridad conceptual. Así también debe contener información pertinente y precisión en el uso de vocabulario. Se detallan a continuación los criterios a tener en cuenta para la corrección: * Cumplimiento de consignas. * Presentación en los plazos acordados y formas adecuadas. * Elaboración y contenido de la investigación. * Integración de las áreas trabajadas durante el año con el tema seleccionado. * Detallar de manera correcta la bibliografía y páginas de Internet consultadas * Abordaje, contextualización y delimitación del tema de estudio. * Interacción en el grupo y con el docente. * Participación en aula virtual

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2. Asignación de Competencias a las asignaturas de la Carrera de Lic. Higiene y Seguridad en el Trabajo

	COMPETENCIAS GENERICAS ACORDADAS COMPETENCIAS TECNOLÓGICAS			COMPETENCIAS SOCIALES, POLÍTICAS Y ACTITUDINALES.			
MATERIAS	1-IDENTIFICAR, FORMULAR Y RESOLVER PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO.	2- COMPETENCIA PARA GESTIONAR-PLANIFICAR, EJECUTAR Y CONTROLAR-PROYECTOS DE HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO.	3-COMPETENCIA PARA UTILIZAR DE MANERA EFECTIVA LAS TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE LA HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO.	4- COMPETENCIA PARA DESEMPEÑARSE DE MANERA EFECTIVA DE LOS EQUIPOS DE TRABAJO.	5-COMPETENCIA PARA COMUNICARSE CON EFECTIVIDAD.	6-COMPETENCIA PARA APRENDER EN FORMA CONTINUA Y AUTÓNOMA.	7- COMPETENCIA PARA ACTUAR CON ESPÍRITU EMPRENDEDOR.
ÁLGEBRA	x						
ANÁLISIS MATEMÁTICO I	x						
FÍSICA I	x						
INGLÉS TÉCNICO	x						
ANÁLISIS MATEMÁTICO II	x						
FÍSICA II	x						
QUÍMICA GENERAL	x						
TRABAJO INTEGRADOR DE CIENCIAS BÁSICAS	x		x	x	x	x	x
TERMODINÁMICA	x						
TRABAJO DE CAMPO	x	x	x	x	x	x	x
MEDIO AMBIENTE E IMPACTO AMBIENTAL	x	x					
SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	x	x					
SEGURIDAD EN BANCOS Y EMPRESAS DE SERVICIOS	x	x					
INFORMÁTICA APLICADA	x						
SEMINARIO DE TESIS	x	x	x	x	x	x	x

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. CONCLUSIONES

Para finalizar el presente trabajo, dejamos establecido el modelo que se aplicará a modo de prueba piloto en el Ciclo de Complementación Curricular Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo, que se aplicará este primer y segundo cuatrimestre 2016 en las asignaturas Trabajo de Campo, Trabajo Integrador de Ciencias Básicas y Seminario de Tesis.

En función del desarrollo trabajado, la selección de competencias realizadas, se esperan resultados óptimos que nos definirán la posible implementación en las carreras de ingeniería mecánica e industrial de nuestra institución.

Dado que el primer año de la carrera de higiene y seguridad es netamente de ciencias básicas, esto nos permitirá trasladar la experiencia a los primeros ciclos de las carreras de ingeniería, ya que en su mayoría son de ciencias básicas, pero también, podrá aplicarse al ciclo intermedio. Más allá que los contenidos mínimos y analíticos varíen de la carrera que presentamos en este trabajo, las prácticas, resultados y formas de evaluación, podrán aplicarse de igual modo.

En el caso de las asignaturas del segundo año de la carrera, permitirá aplicarse a las materias del ciclo superior de las carreras de ingeniería.

Con esta prueba piloto y primera experiencia en la evaluación de competencias, se espera favorablemente su futura aplicación a las carreras de nuestra institución.

4. REFERENCIAS

[1] Noelia Morrongiello- Miryam Nicolaci- Hugo Rolón El Impacto de la Cátedra de Recursos Humanos, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FI-UNLZ), en la Formación de Competencias Profesionales de los Estudiantes de Ingeniería Industrial con orientación en gestión. JEIN, 2014.

[2] Alles Marta Selección por Competencias. Ediciones Granica, 2006

[3] Alles Marta Desarrollo de Talento Humano basado en competencias. Ediciones Granica, 2008.

[4] Blanco Néstor- Nicolaci Miryam- Morrongiello Noelia Aprendizaje Basado en Problemas: El caso de la cátedra de Recursos Humanos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora. COINI, 2012.

[5] Buol Pablo Gestión por Competencias. 2009

[6] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) Primer acuerdo sobre las competencias genéricas. Segundo Taller de Competencias en la Enseñanza de la Ingeniería Argentina. Buenos Aires, Argentina. 2006

[6] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI). Competencias para el acceso y la continuidad de los estudios superiores. Documento de la XLIV Reunión del CONFEDI. Santiago del Estero, Argentina. 2008

[7] Mario de Miguel Díaz. Modalidades de enseñanza centradas en el desarrollo de competencias orientaciones para promover el cambio metodológico en el espacio europeo de la educación superior. España. 2005

[8] ANECA Guía de apoyo para la redacción, puesta en práctica y evaluación de los resultados del aprendizaje. España.2013

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, y a nuestro Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación por el apoyo y acompañamiento en el desarrollo del presente trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EL USO DE SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y EL DESARROLLO DE COMPETENCIAS. EVALUACIÓN DE LA SATISFACCION EN LOS ALUMNOS

Marta Comoglio[1], Claudia Minnaard[1], Oscar Lacanna[1] Nadia Incaugarat[1]

[1] Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación (IIT&E) – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Ruta 4 y Juan XXIII, Llavallol -Provincia de Buenos Aires, Argentina
correo-e: mcomoglio@gmail.com

RESUMEN

El Consejo Federal Decanos de Ingeniería (CONFEDI), definió para el perfil ideal de un ingeniero, una serie de competencias tecnológicas y otras actitudinales [1]
La Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, a través del Instituto de Investigaciones en Tecnología e Investigaciones (IIT&E) desarrolla experiencias orientadas acompañar una metodología didáctica que organice el proceso de enseñanza y aprendizaje mediante la elaboración y resolución de problemas basados en proyectos que tengan en cuenta la adquisición de ciertas competencias por parte de los alumnos. Uno de los ámbitos de trabajo sistemático, es el Laboratorio de Simulación, al cual concurren alumnos de distintas asignaturas de la carrera. Para el ingeniero mecánico la posibilidad de modelizar, analizar y visualizar mecanismos, piezas y conjuntos resulta fundamental para adquirir conocimientos y habilidades tanto de orden técnico como actitudinal que de otra manera resultaría difícil alcanzarlas.
El método se apoya en Guías de Trabajo Autónomo elaboradas por los docentes de las cátedras y el equipo técnico del laboratorio, la que requiere para la definición y elaboración de los casos su trabajo proactivo y planificado [2]. El aprendizaje de los alumnos se realiza por descubrimiento, por lo que resulta activo, constructivo y significativo [3] donde el responsable del laboratorio es quien orienta y dinamiza la realización de tareas que implica poner en juego habilidades cognitivas tales como la exploración del problema desde diversas perspectivas, la búsqueda de nueva información, y la reflexión sobre el conocimiento generado
Se presentan los resultados de una encuesta que indaga la percepción de los alumnos respecto de la adquisición de competencias tecnológicas y actitudinales a partir de la implementación de trabajos prácticos de simulación y así mismo explora su nivel de satisfacción frente a la estrategia didáctica.
Los resultados se analizan con técnicas estadísticas descriptivas y correlaciónales

Palabras Claves: Software de simulación. Enseñanza por Competencias. Aprendizaje autónomo

Área Temática: A–Enseñanza

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Antecedentes

En los últimos diez años desde el Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI), las carreras de ingeniería vienen trabajando en la identificación de competencias genéricas de egreso, vinculadas con la formación y perfiles de ingenieros que requiriere la sociedad para su desarrollo sustentable.

Asistimos a un cambio de paradigma en materia de educación superior; en cuyo marco la sociedad actual exige más a la Universidad; no sólo formación profesional, es decir el "saber", sino también, la adquisición de ciertas competencias profesionales vinculadas al "saber hacer". Este cambio se vio claramente reflejado, por ejemplo en la Declaración de Bolonia del año 1999 [4], y posteriormente cuando en la Convención de Salamanca de 2001 las Universidades asumen "la educación como un servicio público" [5].

El antiguo paradigma, se sostenía en un esquema de transferencia de conocimientos desde el que se infería que los alumnos estaban en condiciones de abstraerlos, articularlos y aplicarlos. Esta postura, fue perdiendo consenso en la actualidad, frente a la visión de que los egresados universitarios, son profesionales que durante su formación adquieren una serie de competencias que les permiten ejercer su profesión en el medio social en el que está inserto.

En este sentido el CONFEDI afirma "Hay consenso en cuanto que el ingeniero no sólo debe saber, sino también saber hacer. El saber hacer no surge de la mera adquisición de conocimientos sino que es el resultado de la puesta en funciones de una compleja estructura de conocimientos, habilidades, destrezas, etcétera, que requiere ser reconocida expresamente en el proceso de aprendizaje para que la propuesta pedagógica incluya las actividades que permitan su desarrollo" [3]. Es así como comienza, desde muchas unidades académicas un orientados a definir procesos de enseñanza y aprendizaje tendientes al desarrollo de competencias de sus alumnos, estrategias de evaluación e impacto de la implementación.

En el año 2013, con el objetivo de definir lineamientos que contribuyeran a caracterizar al Ingeniero Iberoamericano, y a orientar a las Unidades Académicas de la región en el proceso de formación, la Asociación Iberoamericana de Entidades de Enseñanza de la Ingeniería (ASIBEI) adopta como propia la síntesis de competencias genéricas de egreso acordadas por CONFEDI, dando lugar a la "Declaración de Valparaíso" sobre Competencias Genéricas de Egreso del Ingeniero Iberoamericano [6].

Para abordar el tema se toman como punto de partida aportes de diversos autores [5,6], que señalan que la noción de competencias implica la capacidad de articular eficazmente un conjunto de esquemas (estructuras mentales) y valores, permitiendo movilizar (poner a disposición) distintos saberes, en un determinado contexto con el fin de resolver situaciones profesionales.

Del concepto se desprende que las competencias aluden a capacidades complejas e integradas, están relacionadas con saberes (teórico, contextual y procedimental), se vinculan con el saber hacer (formalizado, empírico, relacional), están referidas al contexto profesional

ISBN: 978-987-1676-63-7

(entendido como la situación en que el profesional debe desempeñarse o ejercer), están referidas al desempeño profesional que se pretende (entendido como la manera en que actúa un profesional técnicamente competente y socialmente comprometido) ypermiten incorporar la ética y los valores.

Al analizar la delimitación de las diez competencias realizada por CONFEDI, observamos que las mismas se clasifican por su orientación en: a) competencias tecnológicas: 1. Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, 2. Concebir, diseñar y desarrollar proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos), 3. Gestionar,-planificar, ejecutar y controlar- proyectos de ingeniería (sistemas, componentes, productos o procesos), 4. Utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de la ingeniería, 5. Contribuir a la generación de desarrollos tecnológicos y/o innovaciones tecnológicas. Por otro lado encontramos las definidas como Competencias Sociales, Políticas y actitudinales: 1. desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, 7. comunicarse con efectividad, 8. actuar con ética, responsabilidad profesional y compromiso social, considerando el impacto económico, social y ambiental de su actividad en el contexto local y global, 9. aprender en forma continua y autónoma y 10. Actuar con espíritu emprendedor.

1.2.- Objetivos

En el presente trabajo se presentan los resultados de experiencias didácticas con mediación de software de simulación para ingeniería, durante las que se explora la percepción de los alumnos y su nivel de satisfacción ante la propuesta. Las actividades se desarrollan en el ámbito del Laboratorio de Simulación de la FI UNZL, con la intervención del IIT&E y este caso se trabajó la adquisición de dos de las competencias tecnológicas: resolución de problemas de ingeniería y utilizar de manera efectiva herramientas de ingeniería (en este caso software de simulación), y dos competencias sociales, políticas y actitudinales: desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo y desarrollar trabajo autónomo.

2.- FASE EXPERIMENTAL

Para desarrollar las experiencias, los responsables del Laboratorio de Simulación entran en contacto con los titulares de aquellas cátedras, que por su área disciplinar requiere los servicios de aquél. En forma colaborativa se desarrolla una Guía de Trabajo Autónomo, que se orienta a definir problemas para ser resueltos a través del trabajo de los alumnos en forma proactiva y planificada[3] El aprendizaje de los alumnos se realiza por descubrimiento, por lo que resulta activo, constructivo y significativo [4] donde el responsable del laboratorio es quien orienta y dinamiza la realización de tareas que implica poner en juego habilidades cognitivas tales como la exploración del problema desde diversas perspectivas, la búsqueda de nueva información, y la reflexión sobre el conocimiento generado.

Antes de finalizar la actividad, se les solicita que completen en forma anónima una encuesta, a partir de la cual se generan datos que son utilizados para realimentar la metodología e introducir los cambios que sean necesarios.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.- RESULTADOS

Los resultados que se presentan, corresponden a alumnos de las carreras de ingeniería mecánica e ingeniería mecánica con orientación mecatrónica, cursantes de la asignatura Seguridad e Higiene en el Trabajo, durante el año 2016. Para el desarrollo de la experiencia se utilizó el siguiente software: Delmia Quest y Delmia Ergonomics, de acuerdo a la distribución que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Software utilizado

Cátedra /N° de observaciones	Software utilizado	Frecuencia por categoría	Porcentaje
Asignatura Higiene y Seguridad en el Trabajo / 51	Delmia Quest	18,000	35,294
	Delmia Ergonomics	33,000	64,706

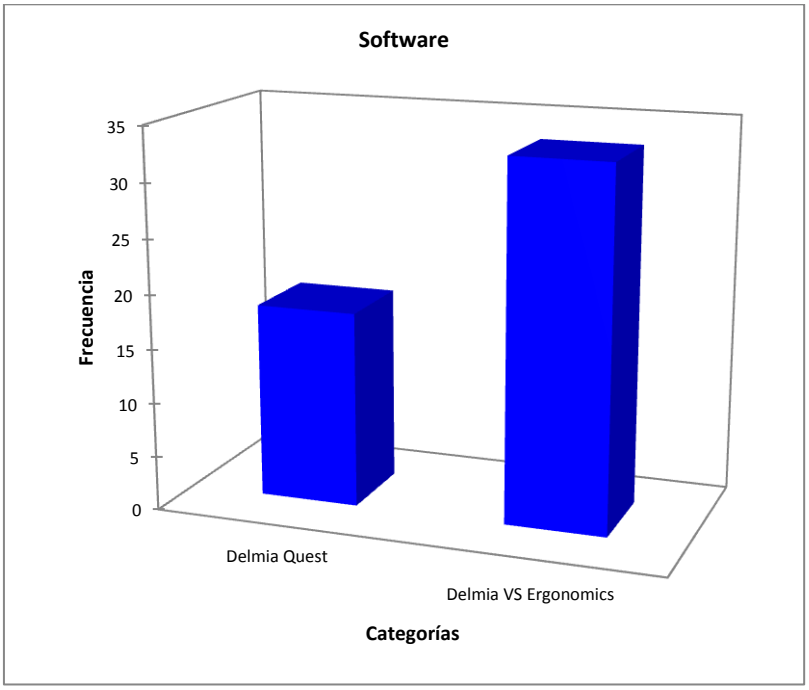
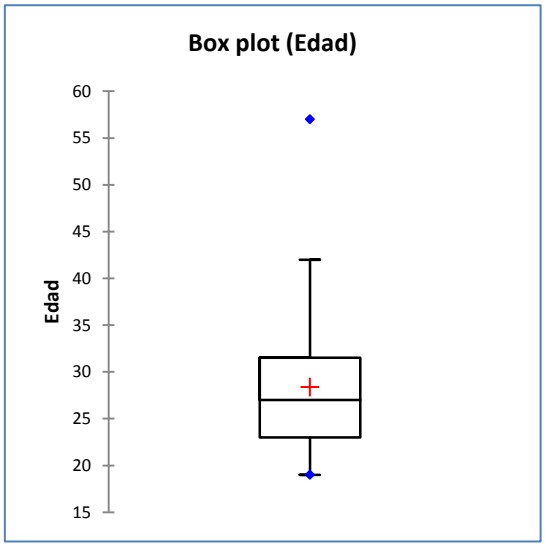


Ilustración 1. Frecuencias para cada software utilizado

A continuación se presentan datos que refieren al perfil de los alumnos que participaron de las actividades.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2. Perfil de alumno por edad



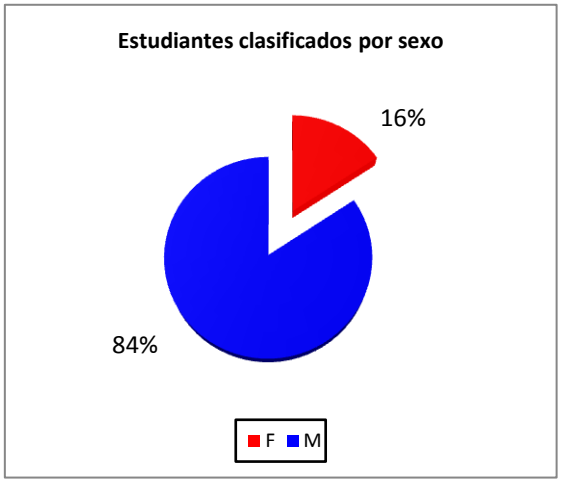


Ilustración 2. Perfil de alumno por sexo

Se advierte que se trata de una población de alumnos mayoritariamente masculina y una edad media acorde a la ubicación de la asignatura en la carrera. Es decir se trata de alumnos jóvenes, fuertemente adaptados y expectantes de incorporar tecnología a sus actividades.
La encuesta que se administra, evalúa la opinión de los alumnos en tres momentos de la implementación de la actividad práctica: Instancia Previa a la clase, Desarrollo de la Actividad y Desarrollo de la Actividad Práctica

3.1.- Instancia Previa a la Clase

ISBN: 978-987-1676-63-7

Dimensión	observaciones	Categoría	Frecuencia por categoría	Porcentaje)
El tema tuvo tratamiento teórico previo	51	NO	1,000	1,961
		SI	50,000	98,039
La guía de trabajos prácticos fue explicada y enviada con antelación	51	NO	3,000	5,882
		SI	48,000	94,118

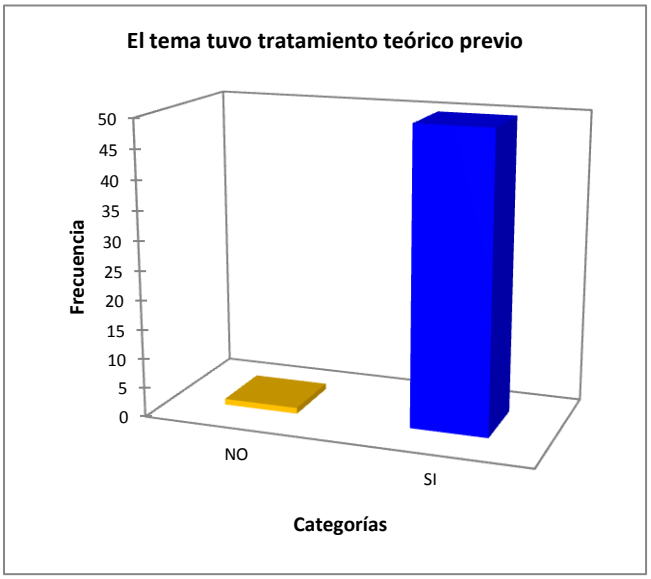


Ilustración 3. Tratamiento previo del tema

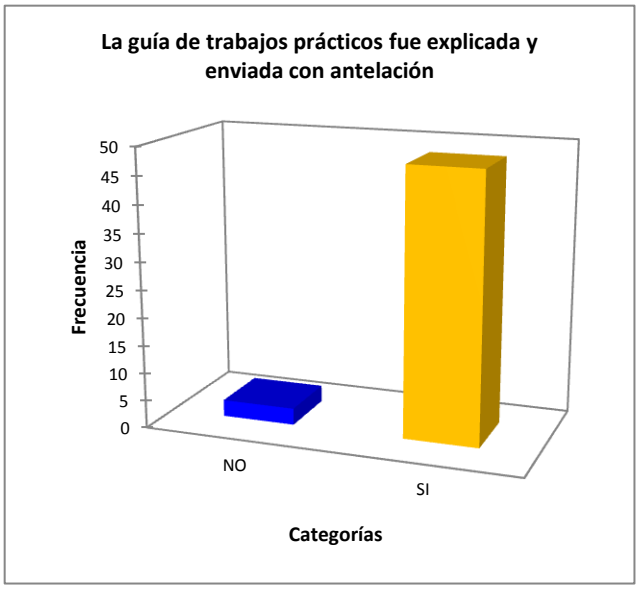


Ilustración 4. Explicación y envío previo de la Guía de Trabajos Prácticos

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.2.- Desarrollo de la actividad

Tabla 3. Variables analizadas correspondientes al desarrollo de la actividad

Muestra	observaciones	Categoría	Frecuencia por categoría	Porcentaje
Disponía de la guía del trabajo práctico	51	NO	2,000	4,082
		SI	47,000	95,918
Se explicaron los objetivos del trabajo	51	S	1,000	2,041
		SI	48,000	97,959
Instancia de formación en el uso y alcance del software utilizado	51	NO	2,000	4,082
		SI	47,000	95,918
Se consultó si existían dudas acerca de la utilización del software	51	NO	3,000	6,122
		SI	46,000	93,878
Para desarrollar el práctico tuvo que organizarse en equipo	51	NO	22,000	44,898
		SI	27,000	55,102
Tuvo que identificar y organizar datos relacionados con un problema	51	NO	3,000	6,122
		SI	46,000	93,878
Tuvo tiempo suficiente para desarrollar la práctica	51	NO	3,000	6,122
		SI	46,000	93,878

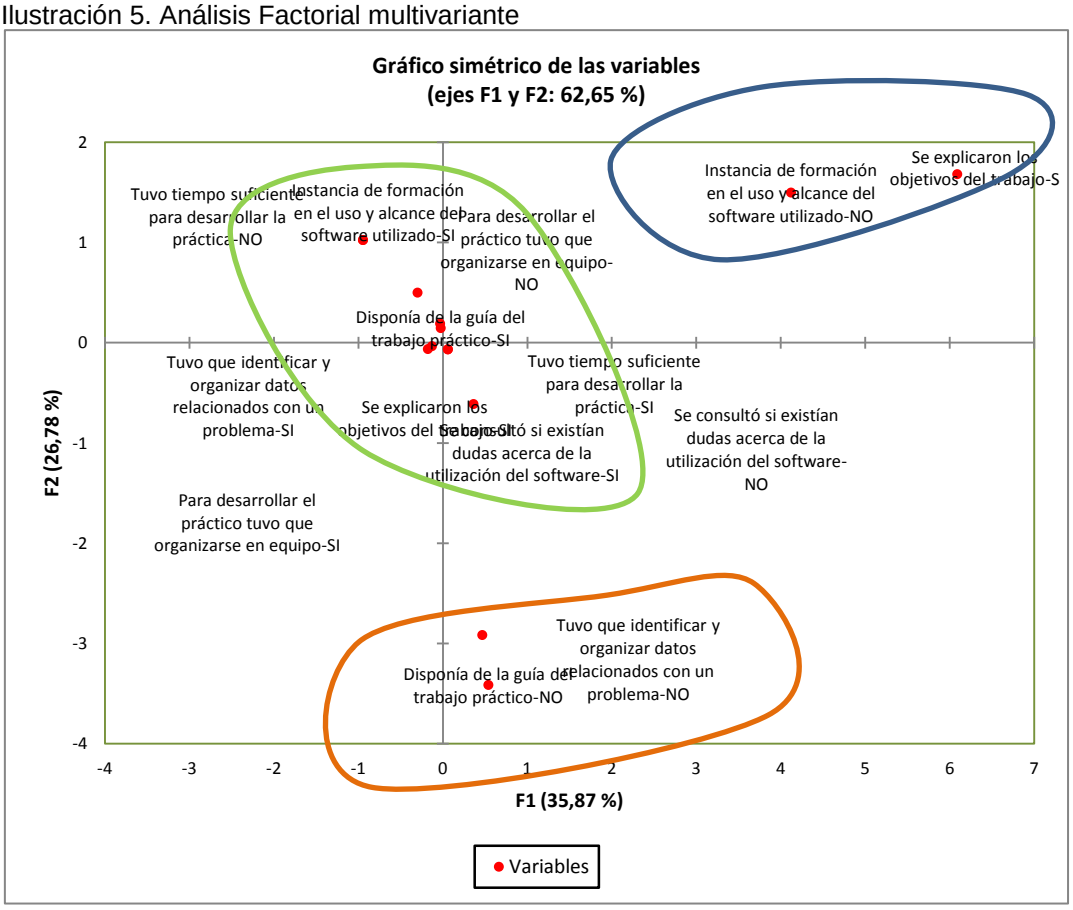
Tabla 4. Tipología de alumnos según opinión durante la actividad

Tipologías	Características
Tipo 1	No todos tuvieron tiempo de desarrollar el práctico Tuvieron que identificar y organizar datos en relación con el problema Disponían de la guía en forma previa Se explicaron los objetivos del trabajo Algunos se organizaron en equipo Algunos fueron consultados en forma previa a la realización de la actividad sobre la existencia de dudas
Tipo 2	No tuvo ni que organizar datos en relación al problema ni disponía de la guía en forma anticipada
Tipo 3	Se explicaron adecuadamente los objetivos del trabajo y no hubo instancia previa de formación en el uso y alcance del software

En la ilustración 5 se pueden observar las tipologías descriptas, de donde surge que la práctica implicó tanto instancias de trabajo en equipo como autónomo, orientado a la resolución de problemas de ingeniería aplicando herramientas específicas, en este caso tecnología de simulación. Sin embargo también se observa que en algunos casos, existieron alumnos que optaron por trabajar individualmente y otros que por no disponer de la guía en forma previa, no tuvieron la oportunidad de identificar y disponer de datos en forma anticipada, por lo que no se concretó a nuestro criterio el objetivo de contribuir al desarrollo de la competencia de trabajo autónomo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Ilustración 5. Análisis Factorial multivariante



3.3.- Desarrollo del Trabajo Práctico

Tabla 5. Variables analizadas correspondientes al desarrollo del trabajo práctico

Variable	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Nivel de comprensión de la clase	51	1,000	5,000	4,388	0,820
Grado de satisfacción con el software utilizado	51	2,000	5,000	4,388	0,770
Atención recibida por parte de los tutores	51	1,000	5,000	4,694	0,727
Nivel de comprensión de la guía de trabajo práctico	51	1,000	5,000	4,531	0,777
Grado de satisfacción general con la actividad desarrollada en laboratorio	51	1,000	5,000	4,531	0,777

ISBN: 978-987-1676-63-7

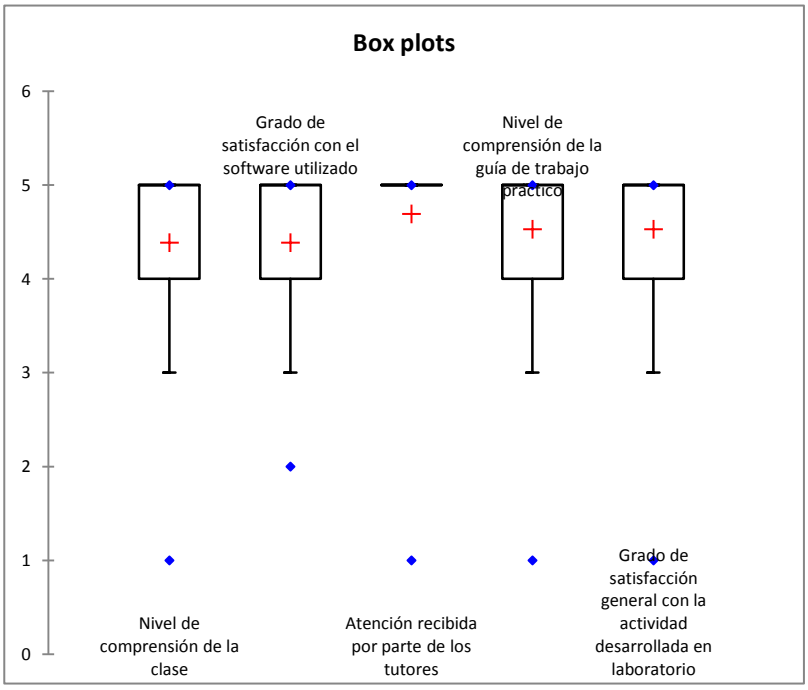


Ilustración 6. Gráfico de Caja correspondiente a las variables del desarrollo del trabajo práctico

La ilustración 6, permite observa que las respuestas de los alumnos participantes en la experiencia se ubican en casi todos los casos en la máxima puntuación. En particular existe una significativa coincidencia entre los valores de la media y la mediana para la variable atención recibida por parte de los tutores.

Tabla 6. Matriz de correlación Pearson para las variables del Desarrollo del Trabajo Práctico

Variables	Nivel de comprensión de la clase	Grado de satisfacción con el software utilizado	Atención recibida por parte de los tutores	Nivel de comprensión de la guía de trabajo práctico	Grado de satisfacción general con la actividad desarrollada en laboratorio
Nivel de comprensión de la clase	**1**	0,717	0,698	0,845	0,750
Grado de satisfacción con el software utilizado	**0,717**	**1**	0,601	0,699	0,733
Atención recibida por parte de los tutores	**0,698**	**0,601**	**1**	0,778	0,848
Nivel de comprensión de la guía de trabajo práctico	**0,845**	**0,699**	**0,778**	**1**	0,768
Grado de satisfacción general con la actividad desarrollada en laboratorio	**0,750**	**0,733**	**0,848**	0,768	**1**

ISBN: 978-987-1676-63-7

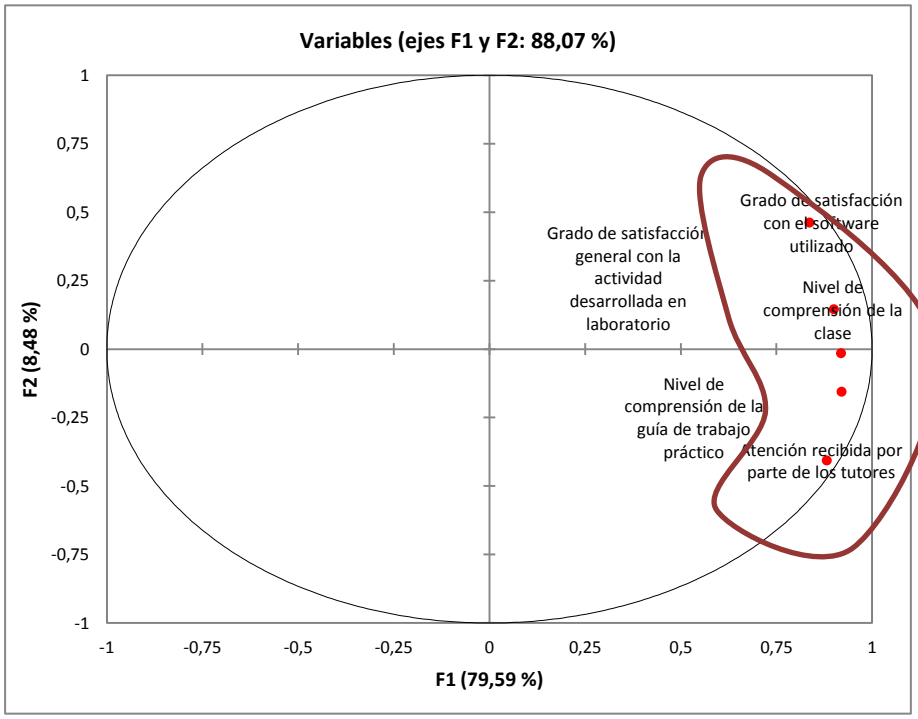


Ilustración 7. Tipología de alumnos en relación al desarrollo del trabajo práctico

Los datos de la Tabla 6, nos permite concluir que todas las variables indagadas, muestran un índice de correlación muy significativa. Esta correlación por lo tanto queda reflejada en la ilustración 7. Si bien al proyectar en el plano las respuestas, se advierte que las mismas se ubican en diferentes cuadrantes, se considera que por su nivel de agrupamiento se pueden considerar como conformando una única categoría de alumno: altamente satisfecho con la actividad desarrollada, tanto por la incorporación de software para la resolución de problemas de ingeniería, por la atención brindada por los tutores, como así también por la comprensión de la clase y la guía de trabajo práctico implementada.

4.- CONCLUSIONES

Este tipo de metodologías de enseñanza, además de simplificar la tarea de los docentes para abordar los temas teóricos de sus cátedras, enriquecen el aprendizaje de los temas por parte de los alumnos, los cuales se sienten atraídos por este tipo de nuevas experiencias. Se pasan a detallar algunos de los comentarios realizados por ellos.

- Es un software muy interesante y sería bueno que se dicten clases para especializarse en el uso de todas sus herramientas.
- Excelente clase.
- Excelente software de simulación de procesos con fines de mejora continua y reducción de costos.
- Excelente la explicación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Mucha información junta en poco tiempo. El software es muy interesante. Un ejemplo más corto sería mejor.
- 10 puntos.

En base a estos primeros insumos, el Instituto de Investigaciones en Tecnología e Investigaciones (IIT&E), continuará trabajando e investigando en colaboración con el Laboratorio de Simulación y los responsables de los equipos de cátedra de nuevas asignaturas, en seguir analizando posibilidades y necesidades para mejorar la calidad y cantidad de este tipo de experiencias.

5.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Consejo Federal de Decanos de Ingeniería (CONFEDI) “3er. Taller sobre Desarrollo de Competencias en la Enseñanza de la Ingeniería Argentina” – Experiencia Piloto en las Terminales de Ingeniería, Civil, Electrónica, Industrial, Mecánica y Química. Villa Carlos Paz, 14 y 15 de agosto 2006 3er. Informe Agosto 2006

[2] Romero López, Mª y Crisol Moya E. Las guías de aprendizaje autónomo como herramienta didáctica de apoyo a la docencia. En Escuela Abierta: Revista de Investigación Educativa del CES Cardenal Spínola CEU. 2012, 15, 9-31

[3] García, A. y Rodríguez, A. (2008). Las guías de trabajo autónomo en la universidad. En A. Rodríguez, A. Fuentes, M. J. Caurcel Cara y A. Ramos García (Coords.), Didáctica en el Espacio Europeo de Educación Superior. Guías de trabajo autónomo (pp. 95-116). Madrid: EOS Universitaria

[4] Declaración de Bolonia Declaración conjunta de los Ministros Europeos de Educación Bolonia, 19 de Junio de 1999

[5] Salamanca Convention “The Bologna Process and the European Higher Education” Area European University Association EUA Genève, 2001

[6] Asociación Iberoamericana de Instituciones de Enseñanza de la Ingeniería (ASIBEI). Declaración de Valparaíso sobre competencias genéricas de egreso del Ingeniero Iberoamericano. Asamblea General de ASIBEI, Valparaíso, Chile, 12 de noviembre de 2013,

[7] Perrenoud , P. Construire des compétences dès l'école. Paris, ESF. (1998)

[8] Le Boterf , G. De la compétence : essai sur un attacteur étrange. Paris, Les Editions d'Organisation (1994)

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ADQUISIDOR DE DATOS Y DATALOGGER AVANZADO APLICADO A BANCO DE ENSAYO DE FATIGA EN CORREAS.

Miguel Ojeda[1], Alejandro Simoncelli[1], Ricardo Ame[1]

[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora
RUTA 4 (ex-Camino de cintura) – KM. 2 Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina.
correo-e: simoncelli.a@gmail.com

RESUMEN

En la mayoría de los procesos industriales, así como en la investigación y desarrollo, es necesario y de gran importancia, medir fenómenos físicos para controlar, inspeccionar, predecir y estudiar causas-efectos. En ocasiones estas magnitudes son imperceptibles o no pueden cuantificarse por los sentidos, requiriendo el uso de transductores, que conviertan el fenómeno físico de interés en una magnitud analógica o digital medible e interpretable. El dispositivo que efectúa la interpretación conforma el adquisidor de datos y la capacidad de registrar estos datos en el tiempo lo constituyen como *datalogger*.

En ocasiones es el ingeniero quien requerirá diseñar y emplear dispositivos de adquisición. Por este motivo, acompañando la investigación sobre el estudio del rendimiento de una transmisión flexible por correas, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora, y con el objetivo de generar mayores capacidades profesionales en los alumnos de la carrera de Ingeniería Mecánica orientación Mecatrónica, se diseñó, construyó, programó y está en uso una placa de desarrollo, basada en un microcontrolador de la línea ATxmega, con numerosas interfaces de comunicación cableadas e inalámbricas. Con ella se relevan datos del ensayo, se procesan y almacenan en una tarjeta de memoria SD, adicionalmente a su uso por parte de las cátedras, para el desarrollo de prácticas.

El diseño del circuito impreso fue realizado por las cátedras de Electrónica analógica y digital y de Procesamiento de señales, incorporando un equipamiento útil para el dictado de clases del cual se ha obteniendo un alto índice de respuesta y evidencia de interés práctico, permitiendo el desarrollo de prácticas de muy alto nivel académico y tecnológico

Palabras Claves: *microcontrolador, electrónica, datalogger.*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han popularizado masivamente una serie de placas y software de desarrollo libres basadas en microcontroladores, dentro de las de mayor penetración en el mercado se encuentran las denominadas placas Arduino. Éstas reúnen numerosas comunidades de desarrolladores, brindando solución a distintos tipos de proyectos, desde pequeños automatismos y controles sencillos hasta, incluso, Impresoras 3D, PLC, Equipos CNC, entre otros. Gran parte de estos proyectos se encuentran disponibles en foros y comunidades, prácticamente listos para usar o a través de librerías, que son bloques de código que generalmente incluyen funciones y subrutinas para distintas aplicaciones. Si bien esto acerca la tecnología a numerosos usuarios, en un ámbito académico, se pierden o pasan desapercibidos conceptos relacionados al diseño y las características de la electrónica empleada, que son importantes a los fines didácticos y prácticos. Es por esto que resulta importante, en la labor de formación de profesionales de la Ingeniería, brindar herramientas actualizadas y flexibles que aseguren una correcta comprensión de los conceptos y fundamentos que podrán brindar mayor valor y seriedad a sus proyectos y soluciones. Sumado a esto se pretende mantener cierto grado de compatibilidad con el material disponible en el mercado para que el alumno no se vea limitado a adquirir el producto desarrollado, para elaborar proyectos propios. Es con este objetivo que en conjunto con alumnos de las cátedras de Procesamiento de señales y Electrónica analógica y digital se diseñó, construyo y programó un una placa de circuito impreso (PCB) basado en una versión más moderna y completa de la línea de los microcontroladores presentes en las placas de desarrollo citadas previamente, en primera instancia para ser usada como datalogger para hacer un registro de datos de un banco de ensayos construido para el estudio del rendimiento de una transmisión flexible por correas y a futuro para la realización de prácticas diversas, en materias de electrónica y de procesamiento de señales.

1.1 Microcontroladores:

Los microcontroladores son circuitos integrados programables que incorporan unidad de procesamiento, memoría RAM y ROM y periféricos de entrada y salida en un único encapsulado, esto les brinda una gran flexibilidad para generar proyectos de diversa complejidad con bajo costo y una gran simplificación del diseño del impreso. Los microcontroladores conforman el núcleo principal de procesamiento en un gran números de placas de desarrollo como las mencionadas previamente, e incorporan funcionalidades muy útiles, a la hora de diseñar sistemas de control, monitoreo o automatismos con esquemas de programación de diversa complejidad y profundidad.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Dentro de las funcionalidades se pueden destacar, conversores analógico-digitales (ADC) junto con referencias internas de tensión, esenciales a la hora de realizar mediciones, en celdas de carga, termistores, foto-resistores y básicamente cualquier salida analógica adaptada a los niveles de tensión admitidos por el integrado. Contadores y temporizadores, requeridos para generar sincronismos, medición de tiempos, controles de modulación de ancho de pulsos (PWM), bucles de control independientes entre muchas otras aplicaciones. Interfaces de comunicación digitales, permitiendo conectar y administrar gran numero de sensores, como acelerómetros, termómetros digitales o barómetros, escribir o leer contenido en tarjetas SD, comunicarse con otros integrados a través de UART (trasmisor-receptor asincróno universal) entre otras.

En el caso a tratar, el desarrollo de un datalogger, se decidió emplear una gama más moderna de microcontroladores, comparado con las placas Arduino, la línea ATxmega que incorpora un oscilador principal trabajando al doble de frecuencia y resulta incluso más versátil al disponerse en un PCB para desarrollo, ya que características como las interrupciones externas o ADC se pueden redireccionar a otros pines, algo que se encuentra fijo y predeterminado en líneas previas de microcontroladores. En la tabla 1 se detalla una comparativa de las características más importantes de los microcontroladores presentes en las placas más populares y el empleado en el desarrollo elaborado, el ATxmega 128 A1U.

Tabla 1. Comparativa de microcontroladores

	ARDUINO® UNO ATmega328P	**ARDUINO® 2560 ATmega 2560**	**ATxmega 128 A1U** [1]
Número de pines	32	100	100
Máximo numero de pines I/O	23	86	78
Frecuencia de Operación	16MHz	16MHz	32MHz
CPU	8-bit AVR	8-bit AVR	8-bit AVR
SRAM	2 Kbytes	8 Kbytes	8 Kbytes
Flash	32 Kbytes	256 Kbytes	128 Kbytes
EEPROM	1024 bytes	4096 bytes	2048 bytes
Interrupciones externas	2	6	2 por puerto (A B C D E F H J K Q R)
ADC	10 bits (15ksps)	10 bits (15ksps)	12 bits (2000 ksps)
DAC	No	No	4 canales (12bits)
Timers	3	6	8
Canales PWM	6	15	24
I2C	1	1	4
UART	1	4	8

El empleo de esta línea de microcontroladores se fundamenta no sólo en las mayores prestaciones para la placa, sino en postergar la obsolescencia en un momento en donde constantemente aparece nuevo y mejor material, a su vez aprovechar una arquitectura interna relativamente

ISBN: 978-987-1676-63-7

sencilla y poderosa que puede ser abordada en la profundidad requerida para un perfil mecatrónico. Desde el punto de vista de la programación, las herramientas y las características básicas del integrado no difieren significativamente a las que pueden emplearse en las placas Arduino, por lo que el alumno podrá emplear los conocimientos incorporados para el desarrollo de aplicaciones o proyectos propios más eficientes con material que conseguirá en el mercado.

1.2 Banco de ensayo de fatiga en correas:

Como puede observarse en la figura 1, el banco de pruebas que se quiere monitorear consiste en un motor asincrónico de 1,5 kW en donde su eje se encuentra vinculado al bastidor mediante rodamientos en alojamientos, la carcasa del mismo dispone de un brazo en cuyo extremo se dispuso una celda de carga también vinculada al bastidor, esta disposición permite medir indirectamente la cupla motora. En el extremo del eje se encuentra la polea conductora para una correa de perfil trapecial, paralelo al eje del motor se ubica un árbol de trasmisión con la polea conducida, dispuesto en una base que puede desplazarse para variar la distancia entre poleas y por consecuencia la tensión de la correa, en el extremo opuesto del árbol se encuentra una bomba de recirculación de aceite hidráulico que conforma la carga en la polea conducida durante el funcionamiento. Adicionalmente el banco dispone de un tanque de aceite hidráulico para recirculación, dicho circuito posee una válvula esférica para estrangular el paso de aceite y así regular la cupla resistente. La celda de carga es medida por una balanza clase III con salida de datos por medio de RS-232.

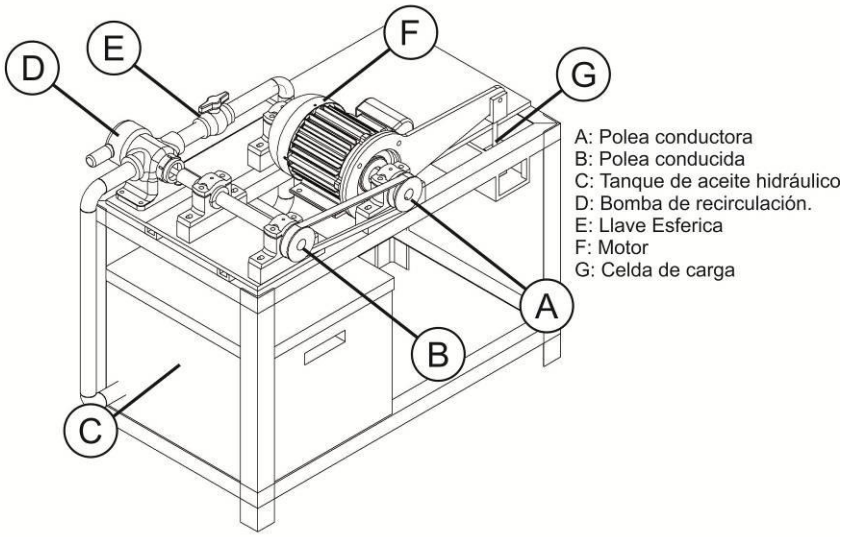


Figura 1: Banco de ensayo de transmisiones flexibles por correas

Para este equipo se solicitó realizar la medición de temperatura ambiente y de correa, velocidad en polea conductora y conducida y registrar estos datos en conjunto con la medición efectuada por la balanza presente en el banco de pruebas, en un archivo para que pueda ser posteriormente procesado.

2. DISEÑO DEL PCB:

Establecidos los requisitos, se diseño un PCB de doble capa, con componentes de montaje superficial. El microcontrolador empleado un ATXmega128A1U, dispone adicionalmente a las características detalladas previamente comunicación USB, lo que permite, mediante una programación particular, incorporar por única vez un gestor de arranque para reprogramar el microcontrolador por USB, sin emplear un programador AVR, esto habilita a los alumnos a cargar sus programas sin la necesidad de adquirir herramienta o incurrir en costos adicionales.

Fue necesario contemplar la instalación de una unidad almacenamiento para el registro de datos del banco de ensayo, constituida por un zócalo para tarjeta de memoria micro SD e incorporar un conector DB-9 y el Integrado MAX3232 para adaptar los niveles de tensión de la conexión RS-232 presente en la balanza. Para la medición de temperatura en correa y la velocidad de giro de las poleas se dispuso un conector DB-15, que puede configurarse para entradas o salidas o comunicación de protocolo I^2C. La temperatura ambiente será tomada por un integrado dispuesto en placa, el LM75, que es un termómetro digital de comunicación I^2C. Se incorporó un zócalo previsto para una interfaz HMI (Interfaz hombre maquina), de dos líneas por veinte caracteres, con el que pueda monitorearse el estado sin ningún equipo adicional. Un reloj de tiempo real (RTC) con batería de respaldo mantiene la hora y fecha en los casos de pérdida de alimentación.

Con elementos citados previamente se completan los requisitos mínimos para su uso como datalogger sin embargo se añadió para efectuar otras prácticas o ampliar las prestaciones del datalogger: comunicaciones inalámbricas, bluetooth 2.0 permitiendo interacción con otros equipos como teléfonos inteligentes, o computadoras portátiles. Comunicación por radiofrecuencia a 433 MHz con un alcance de hasta doscientos metros y comunicación cableada RS422/485. Para generar controles y automatismos se incorporaron doce salidas manejadas por transistores mosfet de hasta 25 A, dos salidas de relé con conexión normal abierto y normal cerrado y cuatro entradas de lazo de corriente 4-20mA. La placa incorpora una fuente de tipo "buck" para el uso de los relés considerando una alimentación de 24 V, por ser un estándar en un ambiente industrial y reguladores de tensión de 3.3V y 5V para emplear todos los demás componentes de nivel lógico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

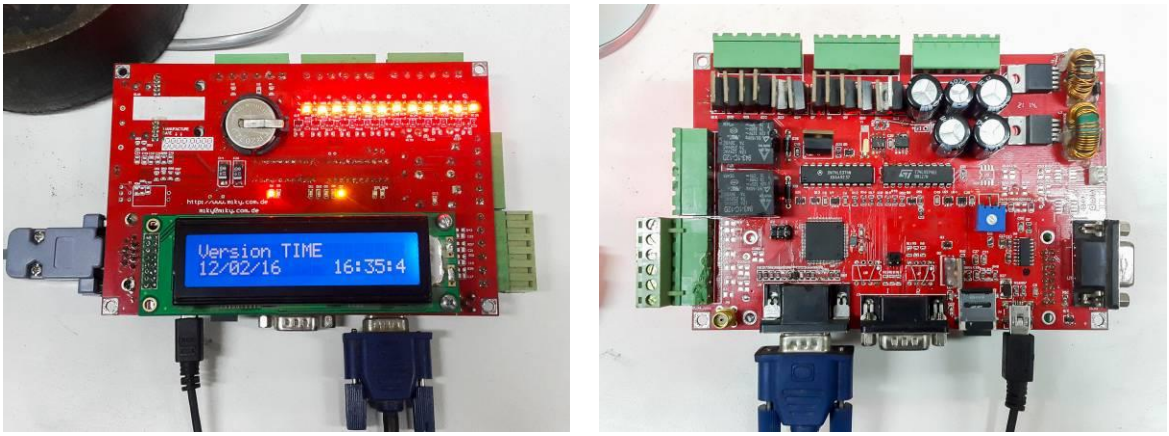


Figura 2: anverso y reverso del PCB desarrollado con la mayoría de los componentes instalados

2.1 Dispositivos adicionales:

Para efectuar las mediciones de velocidad de giro se requirió elaborar un par de dispositivos "encoder" que consistió en un disco opaco con 32 ranuras, dispuestos en cada polea, (figura 4). A medida que la correa circula estos discos giran permitiendo el contacto óptico de un foto interruptor constituido por un foto diodo IR y un foto transistor, al no existir un elemento que interfiera los fotones emitidos por el diodo IR excitan la base del fototransistor permitiendo la conducción colector emisor generando una señal de cambio de estado que será captado por el microcontrolador.

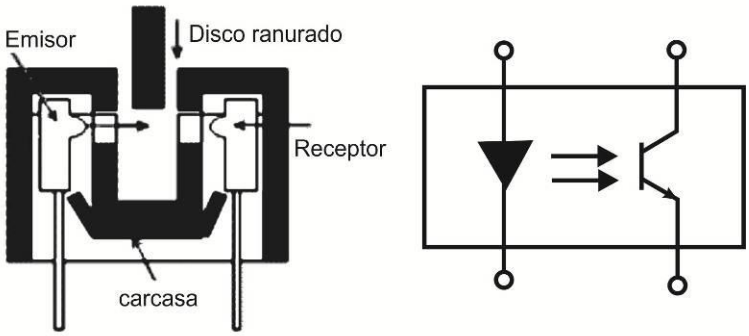


Figura 3: Componentes de un foto interruptor y su dibujo esquemático.

La medición de la temperatura de la correa se proyectó para ser efectuada sin contacto mediante un termómetro IR digital con interfaz I^2C, que al momento de realizar las primeras pruebas no pudo

ser adquirido, en su reemplazo se empleo un integrado con la misma interfaz de comunicación un LM75, el cual se dispuso en las proximidades de la correa.

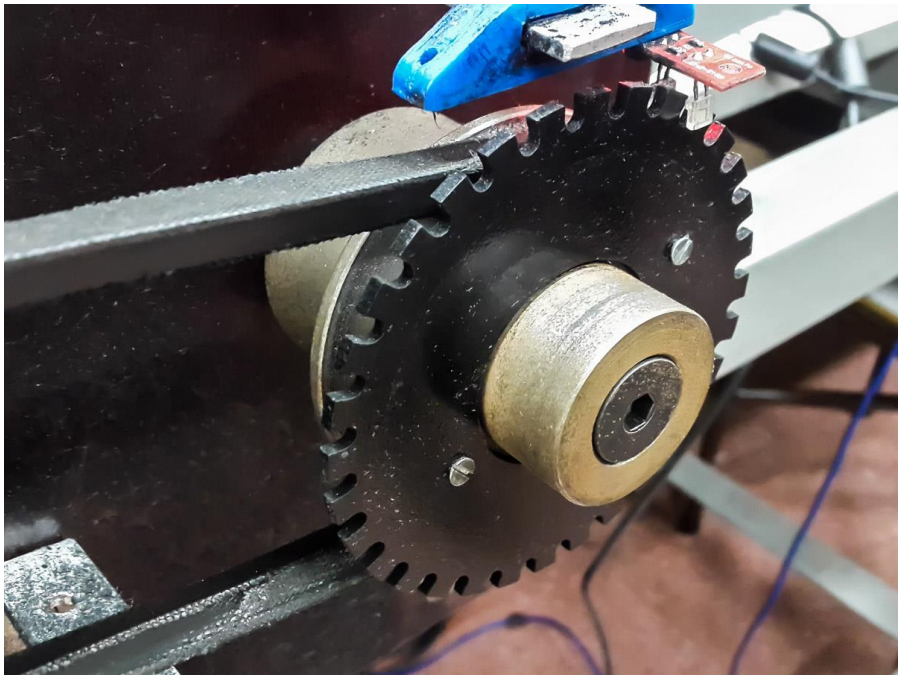


Figura 4: Disco ranurado y foto interruptor montado en banco de ensayo.

2.2. Mediciones de prueba:

En conjunto con alumnos se establecieron las bases del programa para la medición y registración de datos a modo probar los dispositivos adicionales y la placa en general. Se programaron dos rutinas de interrupción para contar los flancos descendentes provenientes de la señal digital entregadas por cada encoder, y un temporizador RTC que a intervalos de un segundo, guarda el numero de pulsos en variables de salida, volviendo a cero los contadores.

El ciclo principal es de aproximadamente sesenta segundos contiene las rutinas de obtención de las mediciones de temperatura, fecha y hora de los sensores I^2C y captura una medición de la balanza por ciclo, a estas mediciones se les da formato en conjunto con el contador de pulsos por segundo obtenidos en el ciclo del RTC y se inserta en un archivo de texto almacenado en la tarjeta SD. En la figura 5 se esquematiza el contenido principal en forma de bloques en pseudocódigo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

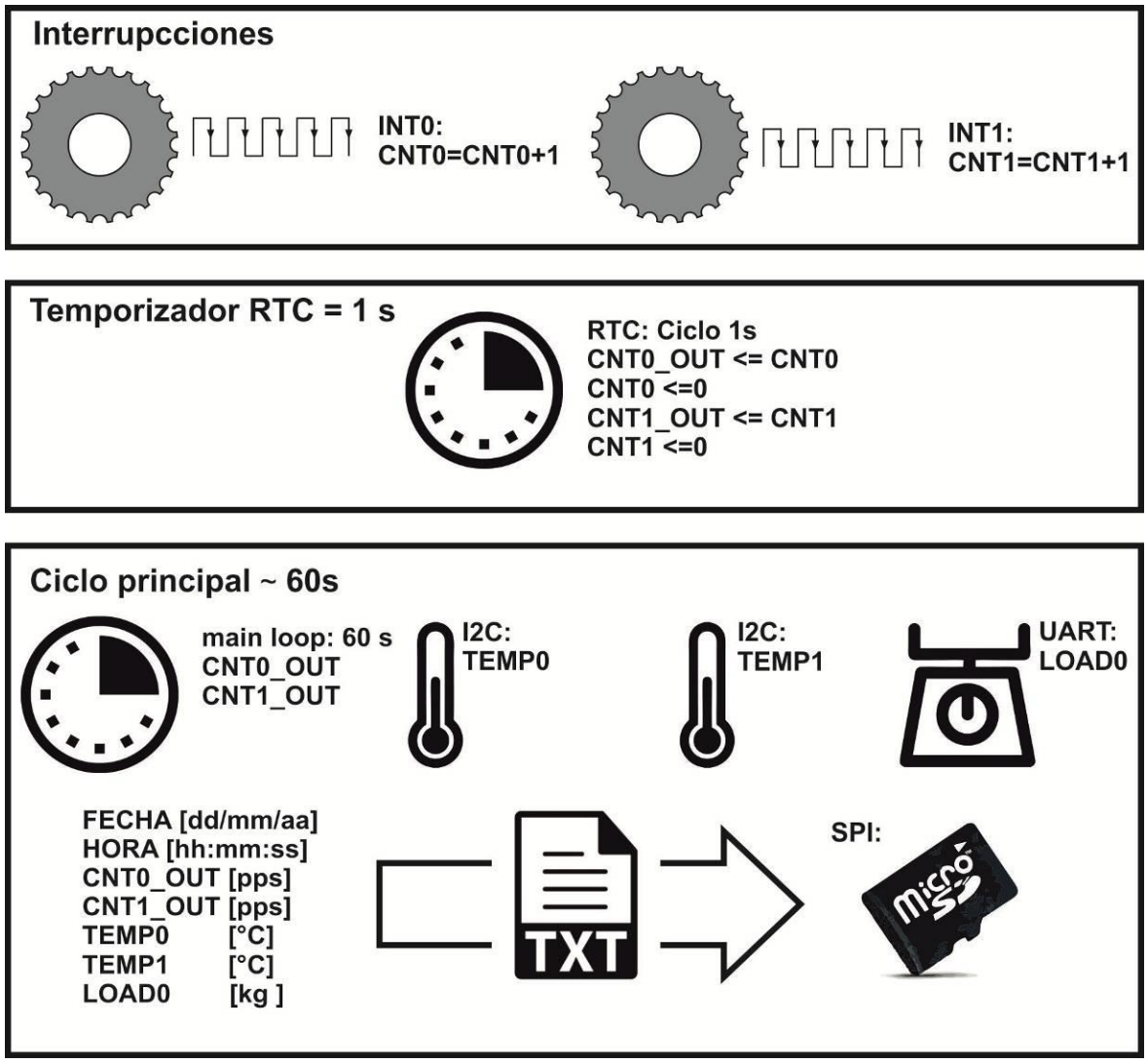


Figura 5: Diagrama simplificado del contenido del programa de medición.

El archivo obtenido de esta manera se procesó en un software de manejo de hojas de cálculo para la obtención de gráficos de temperaturas, velocidad de giro de las poleas y medición de la balanza. Los registros obtenidos de aproximadamente 65 horas de uso pueden observarse en la figura 6.

ISBN: 978-987-1676-63-7

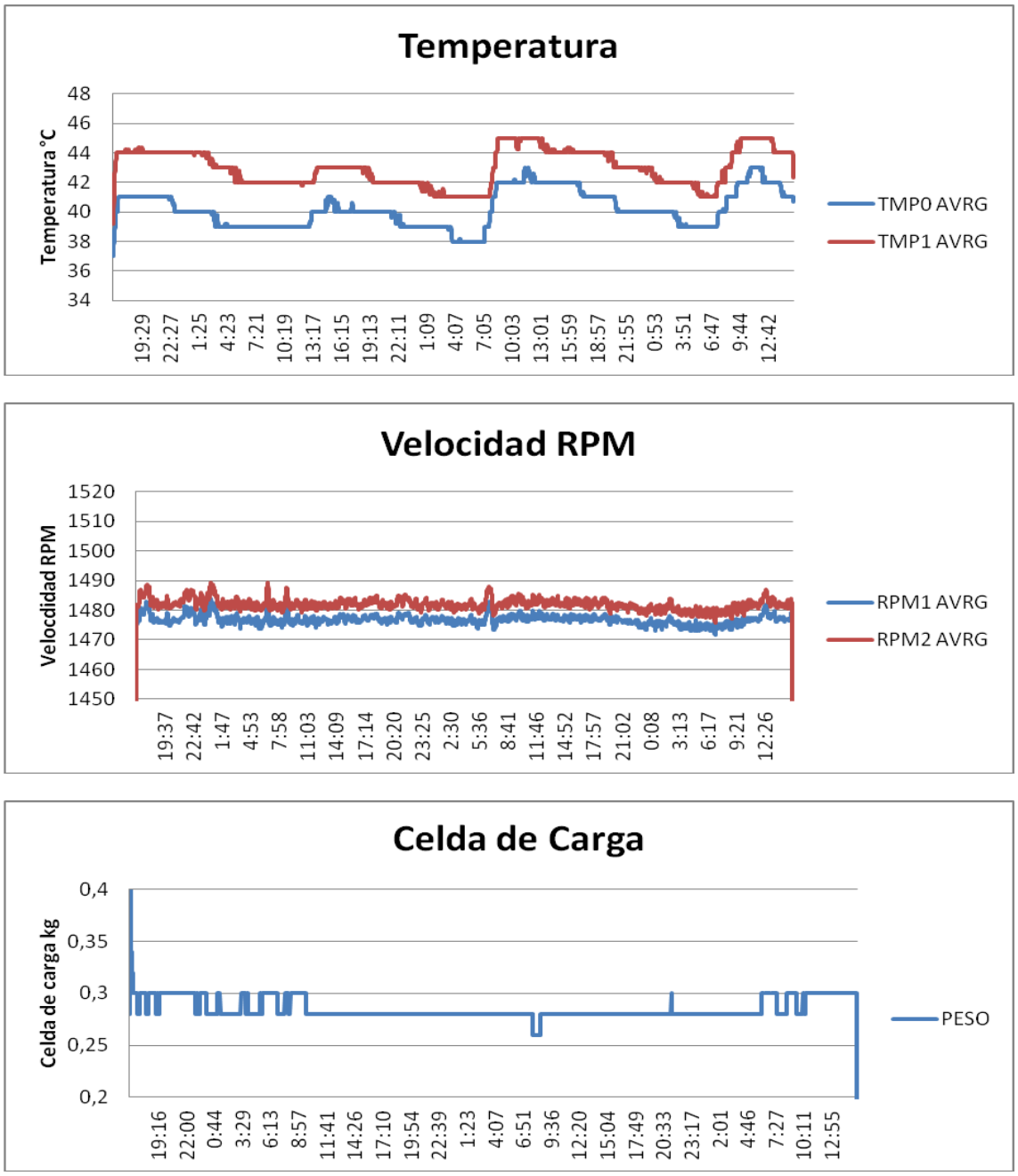


Figura 6: Gráficos generados del archivo registro del datalogger.

3. CONCLUSIONES:

La placa de desarrollo diseñada y fabricada mostró gran potencialidad para efectuar las mediciones solicitadas y para otras prácticas. Gran parte de los alumnos que trabajaron en proyectos que incluyeron la programación de microcontroladores mostraron entusiasmo y

ISBN: 978-987-1676-63-7

motivación a la hora de generar nuevos proyectos, ya sea en el ambiente académico como personales, para los cuales se les brinda asesoramiento en las cátedras relacionadas.

En relación al uso como datalogger el análisis de las primeras mediciones de temperatura se observa una muy marcada correlación de la temperatura ambiente con la temperatura en correa, esto probablemente se deba a que la temperatura tomada en la correa se realiza en la proximidad siendo afectado por efectos de convección sobre el encapsulado del termómetro, se espera obtener una medición real de la temperatura en correa al emplear un termómetro infrarrojo. La medición de la balanza, está limitada a la resolución del instrumento, lo que genera un gráfico muy escalonado, a futuro se evaluará realizar una medición directa de la celda de carga obteniendo una resolución mayor, así como también emplear las comunicaciones inalámbricas presentes en el diseño del PCB.

4. REFERENCIAS

[1] http://www.atmel.com/devices/ATXMEGA128A1U.aspx, marzo 2016.

[2] W.Bolton. *Mecatrónica*. Alfaomega, Mexico, 2011.

APLICACIÓN DEL SOFTWARE CATIA A LA SIMULACIÓN DE UNA OPERACIÓN DE TORNEADO SOBRE UN EJE

Pablo Moret [1,2], Martín Torres [2] y Oscar Lacanna [2]

[1] Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación (IIT&E)
[2] Laboratorio de Simulación
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Ruta 4 y Juan XXIII, Llavallol - Provincia de Buenos Aires, Argentina
correo-e: pablomoret@yahoo.com.ar

RESUMEN

Uno de los inconvenientes por los que atraviesan los alumnos de las carreras técnicas y de la ingeniería en particular es poder visualizar e imaginarse aquellos aspectos que involucren movimientos y traslados en 3D. Debido a esta situación, el Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación (IIT&E), a través del laboratorio de simulación de la Facultad de Ingeniería, se ha propuesto poder facilitar de manera progresiva a los alumnos, acercar herramientas de simulación para la resolución de casos prácticos de sus materias.

El objetivo de este trabajo, es poder transformar la tradicional actividad de cálculo manual a través de fórmulas y tablas de las diversas variables de la operación de torneado sobre un eje, que vienen realizando los alumnos de la cátedra de Tecnología Mecánica, a una metodología visual de simulación 3D, aplicando el software de modelado y diseño Catia V5 [1] [2].

La metodología a utilizar consistirá en poder desarrollar de manera detallada una guía de trabajo práctico de los pasos a seguir por los alumnos, insertando las correspondientes imágenes de pantalla con las funciones del software a utilizar.

Con este nuevo proceso de aprendizaje, esperamos obtener de parte de los alumnos, una respuesta favorable en la cual sus sensaciones, reflejen que se les ha facilitado la comprensión del tema y que además les ha resultado útil para comenzar a familiarizarse con la herramienta, y que por parte de los docentes de la cátedra, pueda surgir la necesidad de comenzar a incluirla para sus actividades prácticas de otras operaciones de manufactura, tales como fresado o el plegado de chapa, por ejemplo [3].

La conclusión a la que aspiramos, es que como consecuencia del resultado de este tipo de experiencias, podamos ir replicando esta actividad en otras materias de la carrera, ya que debido al potencial con que cuenta esta herramienta, será sumamente importante seguir utilizándola en la investigación y desarrollo de numerosas aplicaciones.

Palabras Claves: *Simulación-Catia-Torneado.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Tradicionalmente el enfoque del estudio de las temáticas de análisis de los procesos de manufactura de arranque de viruta ha sido expuesto hacia los alumnos de una manera convencional, es decir mediante la utilización de tablas, gráficos, libros [3], , manuales y otros tipos de fuente de información impresa publicada. Esta situación genera sobre todo en aquellos alumnos que no poseen una base técnica ya sea por su formación o titulación, o por propia experiencia laboral, que les resulte muy complicado poder imaginarse por ejemplo un proceso de manufactura por arranque de viruta como el de torneado, analizado en el presente trabajo. Es de esta manera que surge la necesidad que desde nuestra Facultad, a través del laboratorio de Simulación y el Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación (IIT&E), que podamos acercar a los alumnos de la cátedra de Tecnología Mecánica, situada en el 4º año, octavo cuatrimestre, del ciclo superior de las carreras de ingeniería mecánica y mecatrónica, las herramientas de modelado y simulación con las que contamos desde comienzos de 2014, a fin de introducirlos con este tipo de aprendizaje.

1.1. Objetivos

Diseñar un trabajo práctico o caso de estudio de simulación de la operación de torneado de un eje para la cátedra de Tecnología Mecánica, utilizando el software Catia V5.

2. METODOLOGÍA

Como paso previo al diseño del caso, el equipo de trabajo estuvo dedicado e investigando durante gran cantidad de tiempo, al estudio y conocimiento del módulo del software que está relacionado específicamente con este proceso de manufactura, denominado “machining”. Debido a que este software es muy amplio y complejo, resultó necesario indagar profundamente sobre el mismo, a fin de conocer sus potencialidades. A partir de aquí, se procedió al modelado de un eje existente, el cual es objeto de estudio para diversas temáticas dentro de la cátedra [1].

A medida que avanzaba la investigación, el equipo transitó y se encontró con varias dificultades , tales como la interpretación de algunos de los textos incluidos en los tutoriales, los cuales no resultaban muy claros de comprender [2].

Constantemente se ha recurrido a fuente de información sobre manufactura, para conocer datos referidos a los parámetros de velocidad y profundidad de corte,velocidad de avance o profundidad de corte recomendados [3].

Seguidamente se muestra la Tabla 1 y el Gráfico 1, consultados para el presente trabajo.

Tabla 1. Recomendaciones generales para operaciones de torneado [3]

Recomendaciones generales para operaciones de torneado

		Condiciones iniciales de propósito general			Intervalo para rectificado y acabado		
Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/ rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)	Profundidad de corte, mm (pulg)	Avance, mm/rev (pulgadas/ rev)	Velocidad de corte, m/min (pies/min)
Aceros de bajo carbono y de libre maquinado	Carburo sin recubrimiento	1.5–6.3 (0.06–0.25)	0.35 (0.014)	90 (300)	0.5–7.6 (0.02–0.30)	0.15–1.1 (0.006–0.045)	60–135 (200–450)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	245–275 (800–900)	"	"	120–425 (400–1400)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	185–200 (600–650)	"	"	90–245 (300–800)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	105–150 (350–500)	"	"	60–230 (200–750)
	Cerámico de Al_2O_3	"	0.25 (0.010)	395–440 (1300–1450)	"	"	365–550 (1200–1800)
	Cermet	"	0.30 (0.012)	215–290 (700–950)	"	"	105–455 (350–1500)
Aceros de medio y alto carbono	Carburo sin recubrimiento	1.2–4.0 (0.05–0.20)	0.30 (0.012)	75 (250)	2.5–7.6 (0.10–0.30)	0.15–0.75 (0.006–0.03)	45–120 (150–400)
	Carburo con recubrimiento de cerámico	"	"	185–230 (600–750)	"	"	120–410 (400–1350)
	Carburo con triple recubrimiento	"	"	120–150 (400–500)	"	"	75–215 (250–700)
	Carburo con recubrimiento de TiN	"	"	90–200 (300–650)	"	"	45–215 (150–700)
	Cerámico de Al_2O_3	"	0.25 (0.010)	335 (1100)	"	"	245–455 (800–1500)
	Cermet	"	0.25 (0.010)	170–245 (550–800)	"	"	105–305 (350–1000)

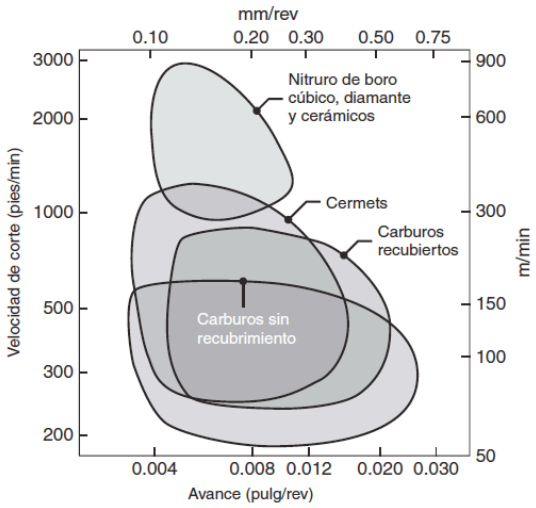


Figura 1: Velocidades y avances de corte aplicables a unavariedad de materiales para herramientas [3]

3. RESULTADOS

A continuación y a través de las capturas de pantallas del software, se van a ir presentando los pasos más representativos del estudio realizado.

El alumno parte desde el eje previamente modelado con Catia por parte del equipo del laboratorio pudiendo visualizar el modelado del material de partida o “stock”, y las trayectorias finales que debería realizar la herramienta (Figura 2).

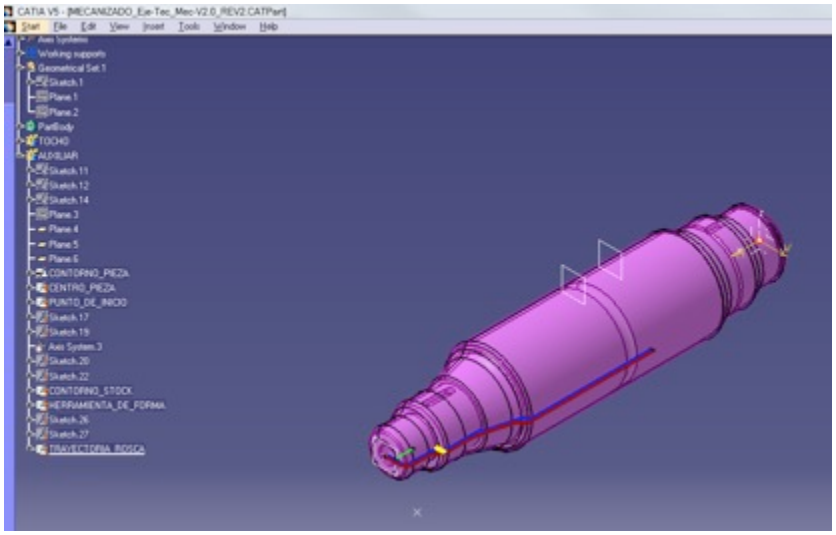


Figura 2: Eje modelado

Posteriormente, se procede a seleccionar la máquina herramienta a utilizar, definir ejes, centros y direcciones de giro (Figura 3).

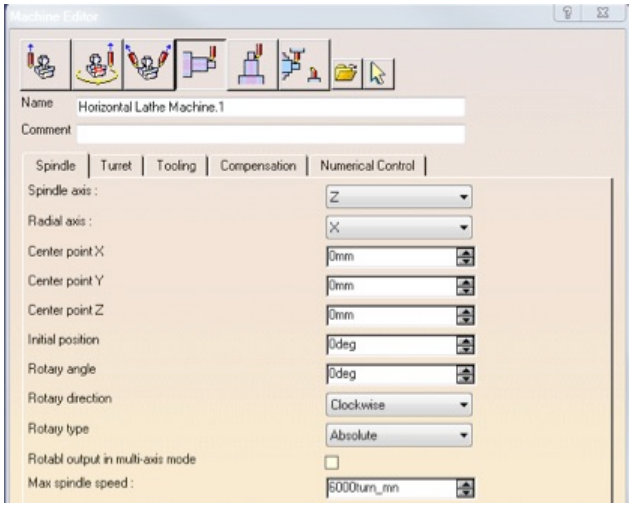


Figura 3: Seteo de parámetros de máquina (1)

ISBN: 978-987-1676-63-7

Luego se debe definir la dirección de la torreta y el punto inicial del recorrido (Figura 4).

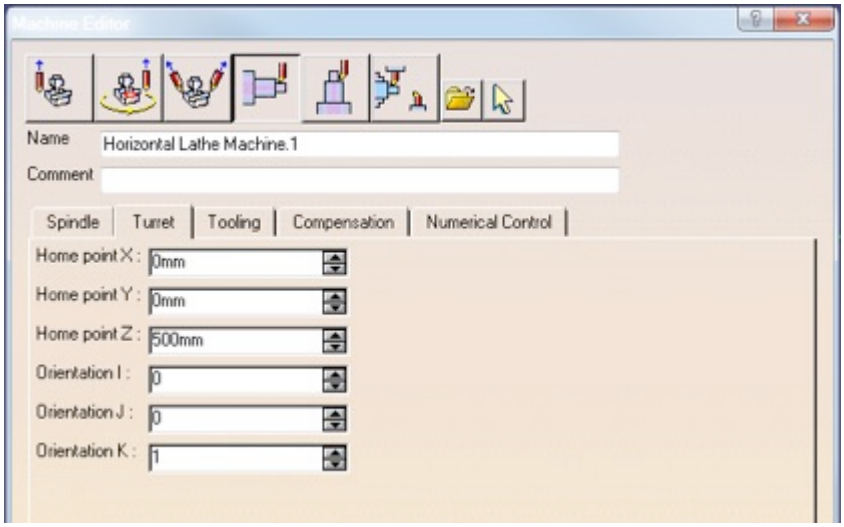


Figura 4: Seteo de parámetros de máquina (2)

El último de los pasos para la configuración o seteo, consiste en la definición del post procesador el cual generará el código G, una vez finalizada la simulación (Figura 5).

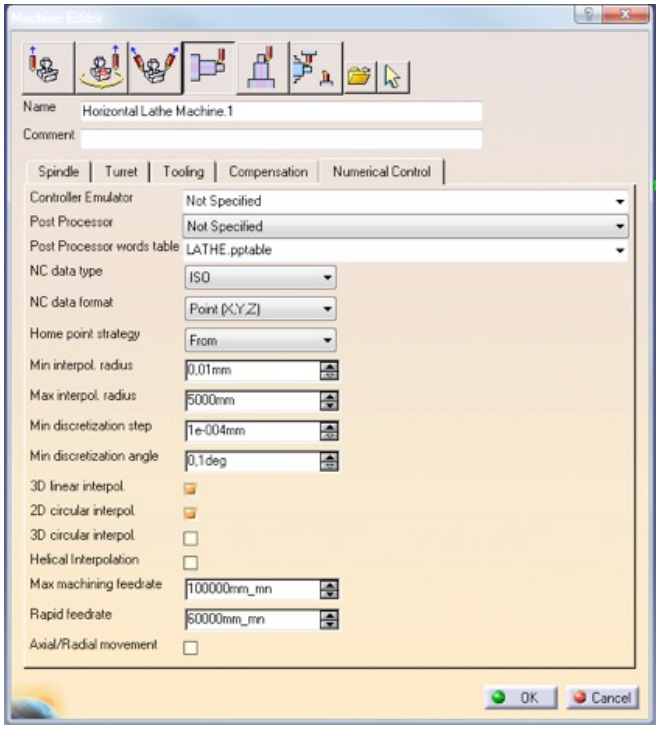


Figura 5: Definición del post procesador

ISBN: 978-987-1676-63-7

Finalizada esta etapa de configuración, la siguiente corresponde a las etapas de operaciones de mecanizado del eje, comenzando por un frenteado de la pieza, seteando la profundidad de corte, que en este caso se lo seleccionó en 0,5 mm. La operación utilizada en este caso, se denomina “Rough Turning”, y es utilizada para realizar pasadas de desbaste, ya sea en frenteado, o en cilindrado de la pieza. (Figura 6).

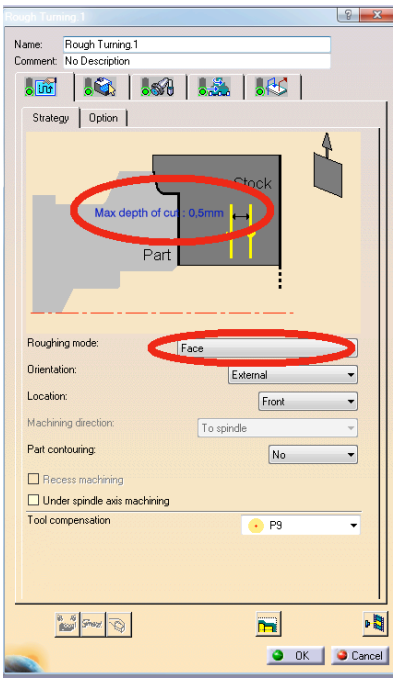


Figura 6: Configuración parámetros de corte

Luego se define el denominado “stock” o material en bruto, desde donde se va a partir para la realización del mecanizado, definiendo dejar un exceso de material o “sobrematerial”, en este caso de 0,2 mm (Figura 6, Figura 7).

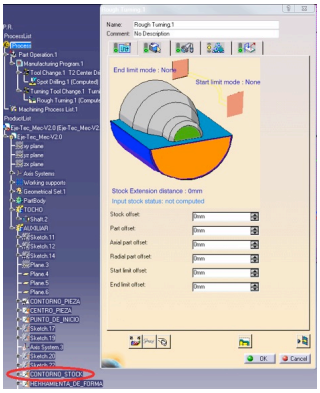


Figura 6: Definición de stock (1)



Figura 7: Definición de stock (2)

ISBN: 978-987-1676-63-7

El siguiente paso consiste en la configuración de la herramienta a utilizar (Figura 8,Figura 9).

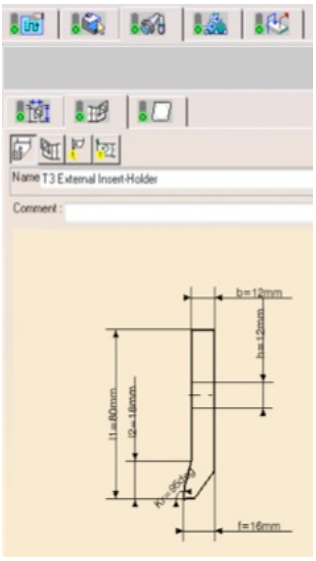


Figura 8: Configuración herramienta (1)

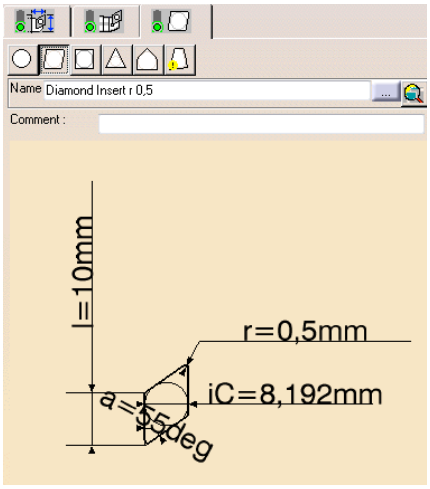


Figura 9: Configuración herramienta (2)

A partir de este momento, se puede comenzar a realizar una simulación preliminar (Figura 10).

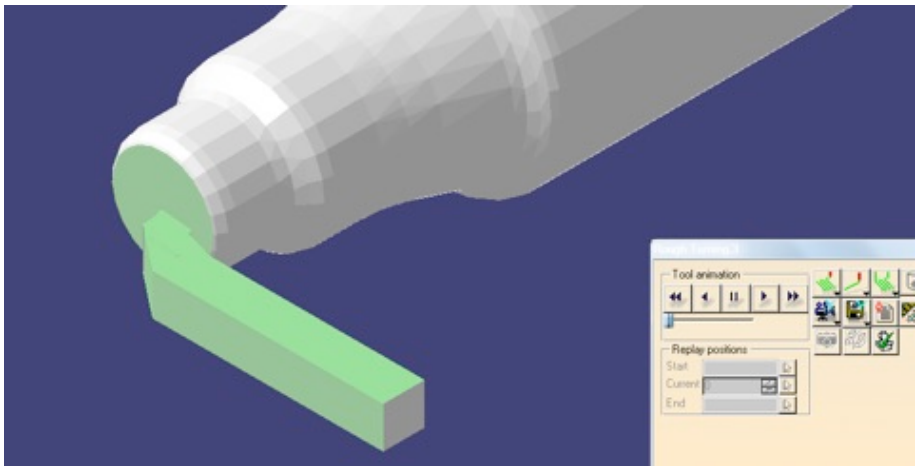


Figura 10: Simulación preliminar

El siguiente paso, consiste en la realización del agujero situado sobre el frente del eje (Figura 11).

En esta operación también se define la herramienta, pieza, cara de trabajo, distancia de salto

(retiro de mecha para extraer viruta), etc. En este caso se utilizará la herramienta “Spot Drilling”, para generar el cono de la contrapunta.

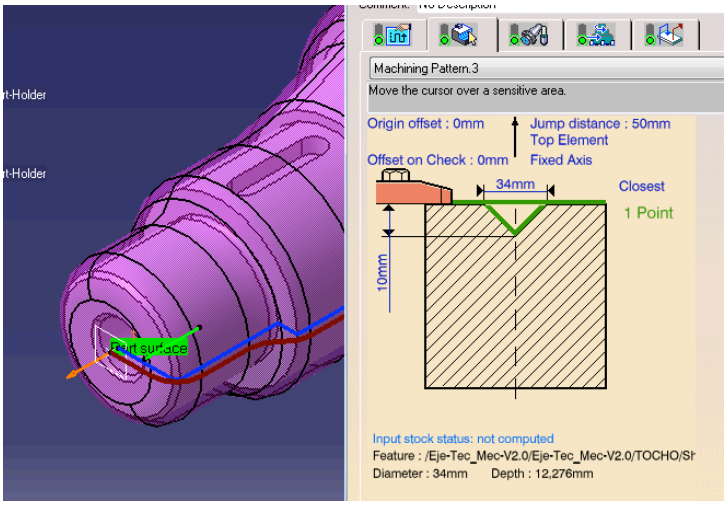


Figura 11: Perforado

El siguiente paso es definir la estrategia de mecanizado, nuevamente mediante la función “Rough Turning”, utilizándola en este caso para realizar el cilindrado de la pieza (Figura 12).

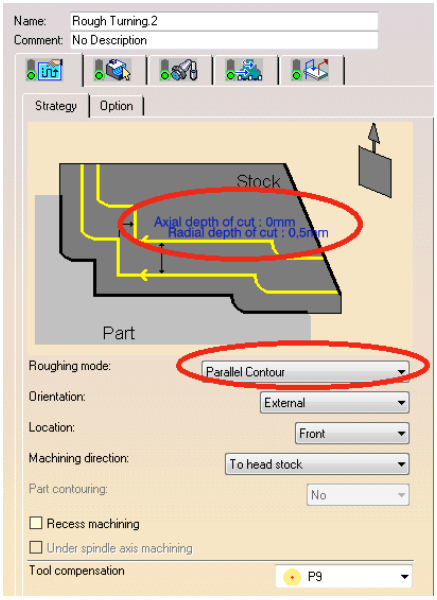


Figura 12: Estrategia mecanizado

ISBN: 978-987-1676-63-7

Posteriormente se simula con la herramienta, desde el punto de inicio, el acercamiento hacia la pieza (Figura 13).

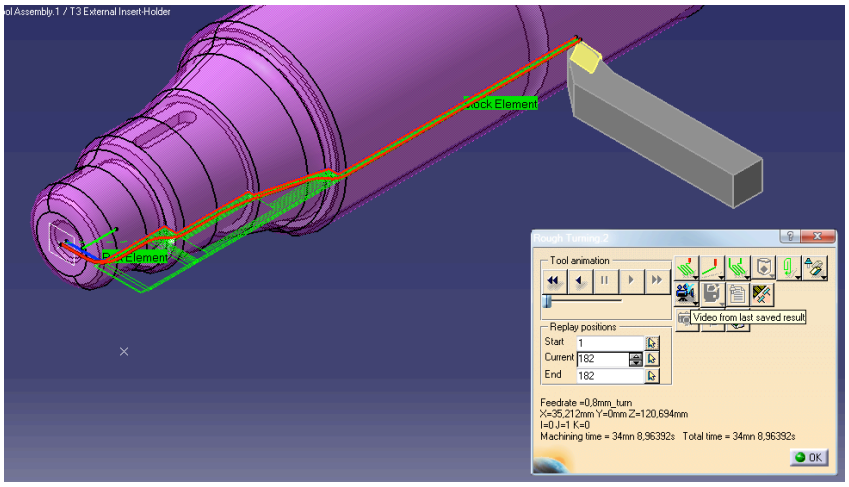


Figura 13: Simulación acercamiento de herramienta

Luego se define la herramienta y el inserto a utilizar (Figura 14,Figura 15).

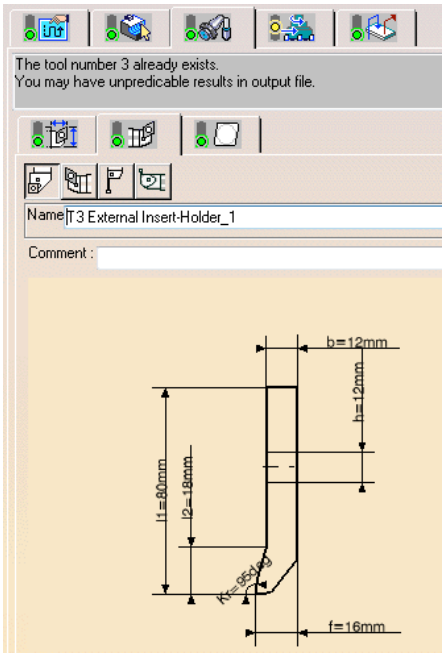


Figura 14: Selección de herramienta

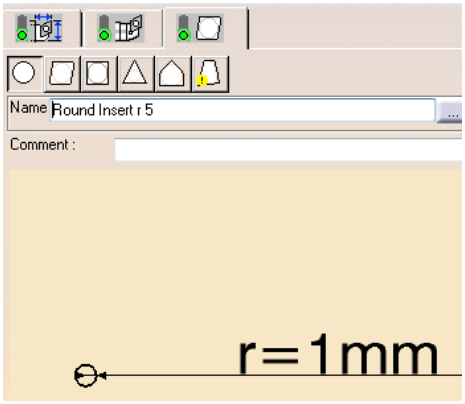


Figura 15: Selección de inserto

Una vez finalizado el mecanizado exterior, se procede al mecanizado de los interiores (Figura 16).

ISBN: 978-987-1676-63-7

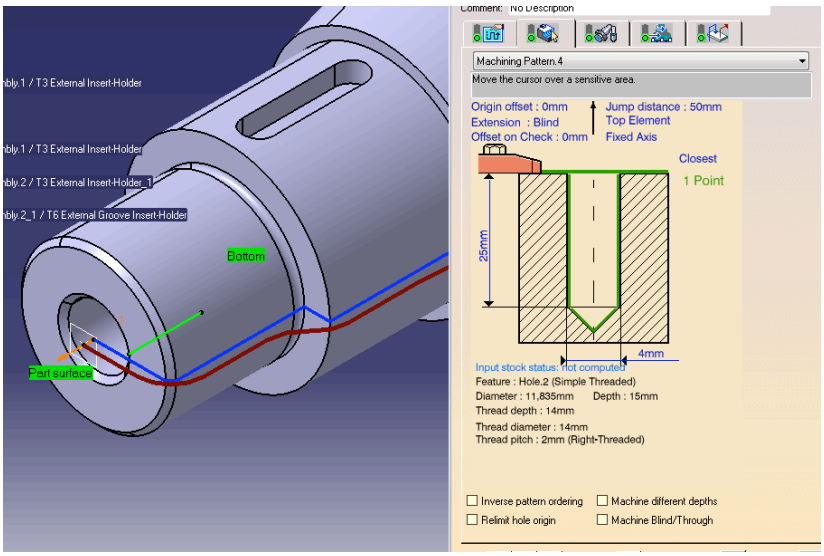


Figura 16: Mecanizado de interiores

La última operación de mecanizado será el roscado del agujero (Figura 17,Figura 18)

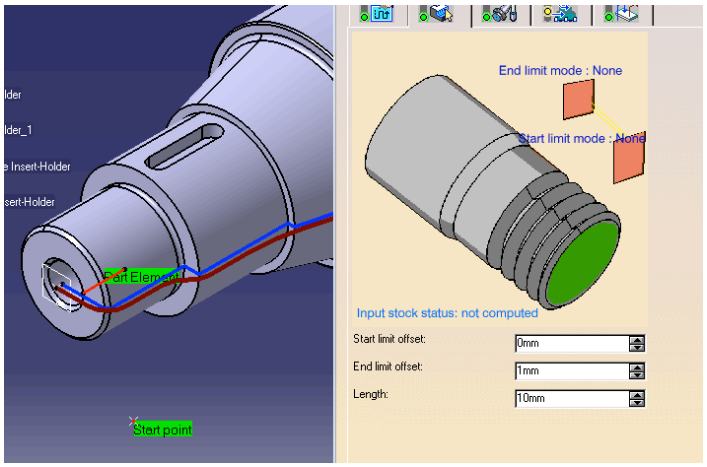


Figura 17: Roscado de agujero (1)

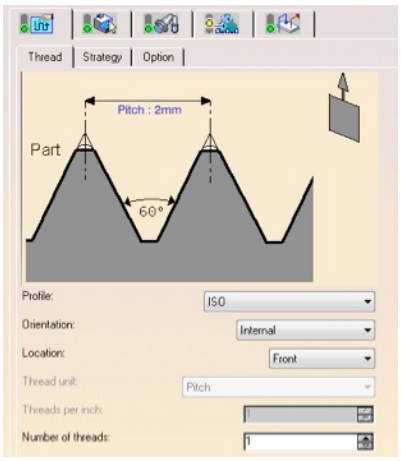


Figura 18: Roscado de agujero (2)

Posteriormente se procede a la simulación del roscado (Figura 19)

ISBN: 978-987-1676-63-7

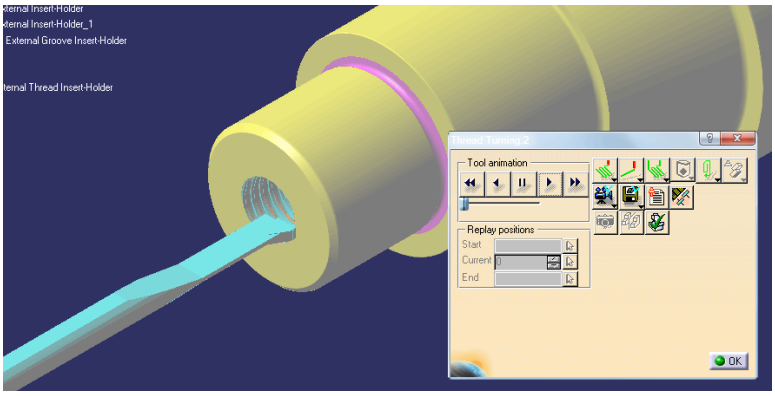


Figura 19: Simulación de roscado

El último paso es la generación del código G (Figura 20,Figura 21)

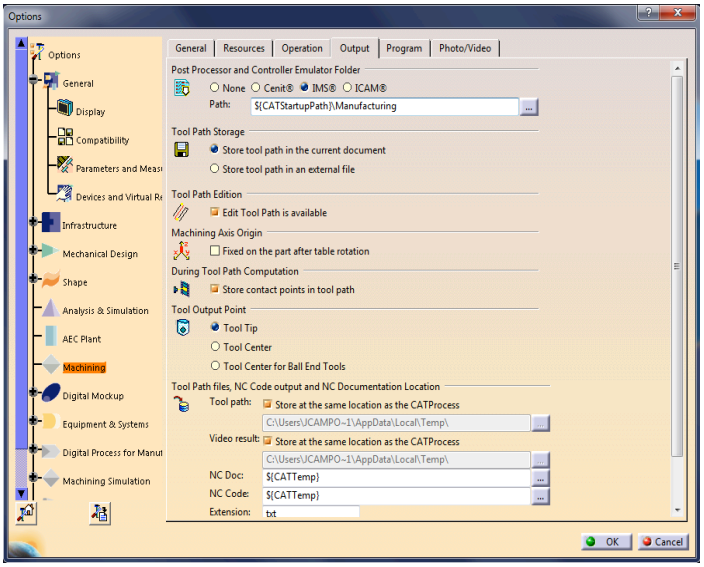


Figura 20: Generación de código G (1)

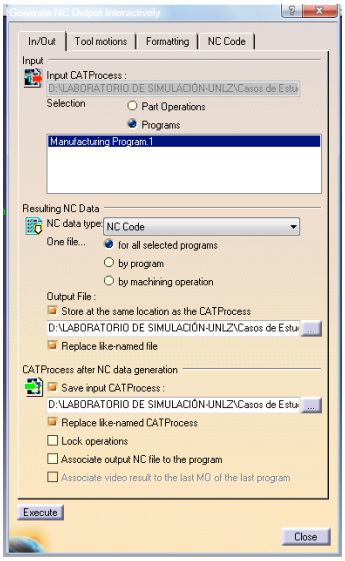


Figura 21: Generación de código G (2)

4. CONCLUSIONES

A través de esta investigación, el equipo de trabajo ha podido descubrir la gran potencialidad con la que cuenta la herramienta de Catia, quedando todavía gran cantidad de funcionalidades por analizar, la cuales seguramente serán objeto de estudio y aplicación en futuras investigaciones.

El diseño del caso no solo fue aceptado y aprobado por la cátedra de Tecnología Mecánica, sino también ya fue expuesto y explicado a los alumnos, teniendo una muy buena aceptación por parte

de ellos y de los docentes.La duración del trabajo práctico nos ha tomado una clase completa de 4 hs reloj aproximadamente.

La creación de esta práctica no solo permite explicar y visualizar la operación de torneado, sino también optimizar del proceso productivo, ya que luego de generadas las operaciones, es posible modificar las estrategias de mecanizado y las herramientas a utilizar,con el objeto de mejorar los tiempos de producción.

Desde el punto de vista del proceso de enseñanza, este tipo de herramientas de simulación facilta en gran medida el proceso de aprendizaje de los alumnos y como ha sido mencionado en la introducción de este trabajo, se acentúa sobre aquellos que no han sido formados en carreras técnicas, o no han tenido la oportunidad de desempeñarse laboralmente en este tipo de ámbito.

Visto estos tan buenos resultados, el equipo de trabajo seguirá investigando sobre otros modulos de este software, de modo de poder incursionar en otras temáticas de la carrera de ingeniería mecánica, a fin de mejorar la enseñanza sobre nuestros alumnos.

5. REFERENCIAS

[1] Gomez Garijo E., "*Diseño y fabricación con CATIA v5: módulos CAM. Mecanizado por arranque de viruta"*, Visión Libros, Madrid, España,2012.

[2] Dassault Systemes.Tutorial CATIA V5,2015.

[3] Kalpakjian S.y Schmid R., "*Manufactura, Ingeniería y Tecnología"*, 7ª Ed., Pearson, Mexico, 2014.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA ANTE LAS TRANSFORMACIONES CIENTÍFICO-TECNOLÓGICAS: DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DIDÁCTICAS.

Luis González[1]; René J. Rodríguez[1;] María de los Milagros Yacuk1; Luis A. Aguilar[1]; René A. Rodríguez[1]; & Sandra L. Martínez[2]

(1) Departamento de Mecánica, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina.
gonzalez539@yahoo.com.ar;; renejr@unse.edu.ar; mmym7.3710@gmail.com;
***laguilar@unse.edu.ar**; rene@unse.edu.ar*

(2) Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTA), Facultad de Agronomía y Agroindustrias, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina*. sandram@unse.edu.ar*

RESUMEN

El progreso siempre estuvo íntimamente asociado a la ingeniería, reconociéndose a esta disciplina como fundamental para consolidar el desarrollo industrial, relacionar el conocimiento con la innovación productiva, y disminuir los niveles de dependencia tecnológica. En concordancia, Argentina implementó el Plan estratégico de Formación de ingenieros.

Actualmente, gracias a los avances de la ciencia y la tecnología, existen numerosas "nuevas" herramientas susceptibles de ser usadas en el ambiente educativo para complementar los procesos de enseñanza–aprendizaje tendientes a formar profesionales comprometidos con lo social, capaces de promover su auto aprendizaje. En este contexto resulta insuficiente la mera transmisión de conocimientos sobre todo para las ingenierías, constituyéndose en todo un reto docente el desarrollar e implementar metodologías y herramientas tendientes a imprimir estas orientaciones, al nuevo perfil del ingeniero, que utilizando los recientes desarrollos, motiven al estudiante a adquirir e internalizar conocimientos.

En este trabajo se presenta experiencias realizadas con alumnos de Ingeniería electromecánica de la UNSE, a quienes se propuso desarrollar dispositivos, que pueda ser usado como herramienta formativa para la enseñanza de la ingeniería, aplicable a múltiples experiencias concernientes a la mecánica, en las que se pueda contrastar el aspecto real práctico de los fenómenos dinámicos y cinemáticas enseñados en las cátedras de mecánica, con su marco teórico, a través de la simulación de los mismos en tiempo real, valiéndose de tecnología económica, versátil y sencilla de asimilar, desarrollado, mantenido y actualizado por estudiantes, bajo la supervisión de docentes asesores.

Palabras claves: *Enseñanza de la ingeniería – Nuevas tecnologías – Herramientas didácticas*

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Estado de situación de la Ingeniería

Mundialmente se reconoce a la ingeniería como el motor de desarrollo de los pueblos, por eso recientemente la UNSECO, a través de un informe advertía a los encargados de la elaboración de las políticas y la planificación del desarrollo de las naciones, sobre la escasez de ingenieros, y la disminución de su matrícula. Atribuyendo el fenómeno en parte, a que los jóvenes los consideran estudios aburridos, difíciles y una profesión no muy bien remunerada. El informe sugiere además, adoptar nuevos enfoques en la enseñanza y la formación, especialmente en lo que se refiere a la instrucción práctica y al aprendizaje basado en el planteamiento de problemas.

También Argentina, reconoce a la ingeniería como pilar del desarrollo, a tal punto que El Ministerio de Educación impulsó el Plan Estratégico de Formación de Ingenieros 2012-2016, con el objeto de formar los recursos humanos, necesarios para apuntalar otros planes de desarrollo: el Plan Estratégico Industrial y el Plan Estratégico Agroalimentario y Agroindustrial. Destacando, que la ingeniería es una disciplina fundamental para consolidar el desarrollo industrial, relacionar el conocimiento con la innovación productiva, y disminuir los niveles de dependencia tecnológica. Pero advirtiendo, que es necesario cambiar los paradigmas de formación para lograr un profesional de alta capacitación técnica, con compromiso social, conciencia ambiental y capacidad de liderazgo. [1]

1.2 Las transformaciones tecnológicas en educación.

Las tecnologías han transformado a la humanidad desde sus instituciones hasta el paisaje. Retrocediendo en el tiempo se observa que nuestros antepasados construyeron los primeros utensilios en forma empírica y las fueron mejorando mediante un proceso de reflexión y crítica. El empirismo ha denominado gran parte del desarrollo humano, las cosas se construían sin saber exactamente porque funcionaban y esos conocimientos los transmitieron a sus descendientes a través de una relación maestro-aprendiz.

El maestro transmitía sus conocimientos a sus aprendices y por medio de fallas y reintentos (prueba- error) así se construyó y fabricó todo hasta fines de lo que se conoce como edad moderna.

Este conjunto de conocimiento-proceso, forma de hacer las cosas, es lo que se denomina “tecnología” y aplicada en determinada área del quehacer productivo humano produce un bien tecnológico.

Aceptado este concepto de tecnología se puede afirmar que ella existe mucho antes que la ciencia y que cuando ella apareció siguió divorciada de los desarrollos tecnológicos.

La ciencia moderna, que se caracteriza por el pensamiento racional y por métodos experimentales que han conducido a una comprensión cada vez más precisa de los fenómenos naturales, es

ISBN: 978-987-1676-63-7

relativamente reciente y tiene su origen es en el siglo XVI, pero recién a fines del siglo XVIII se sientan los cimientos de la mayoría de las ciencias físicas. Sin embargo a mediados del siglo XIX se produce un acontecimiento importante esto es se aplica por primera vez un principio teórico (la primera ley de la termodinámica), y desde ese momento ciencia y tecnología avanzan de la mano proveyendo aquella los principios teóricos sobre los que se basan los desarrollos tecnológicos.

Este binomio ciencia primero tecnología después es la pareja que lidera el desarrollo de nuestra sociedad hasta bien entrada la primera mitad del siglo XX.

Pero la carrera espacial cambia el orden de esta pareja, o en otros términos cambia las prioridades. Ya no es la tecnología la que espera a los descubrimientos de la ciencia para sus desarrollos.

Ahora la tecnología le indica el camino a la ciencia que debe investigar para poder desarrollar nuevos productos y procesos.

La ciencia está al servicio de la tecnología, las grandes corporaciones montan sofisticados laboratorio y centros de investigación decididos a desarrollar el binomio ciencia-tecnología exclusivamente en áreas de su interés.

Este nuevo ordenamiento trae aparejada notables repercusiones en el campo social, económico, político y en la universidad al requerirle el mundo del trabajo nuevas demandas en la formación de sus egresados. [2,3]

1.3 Un nuevo contexto para la universidad.

El volumen y la velocidad alcanzados por la información se han convertido en un típico hecho favorecido por el desarrollo de la computación. Esto permite afirmar que en el próximo siglo el poder de la inteligencia y la imaginación, la invención y la organización de las nuevas tecnologías serán los ingredientes estratégicos del desarrollo.

El contexto al que ha de responder la educación universitaria está cambiando, y es necesario que también se modifique el modelo de formación si se quiere dar respuesta a las necesidades de este nuevo contexto. Las características más sobresalientes de este nuevo contexto en relación con la educación superior, nos conduce a una nuevo modelo de universidad. Para ello se debe realizar un análisis desde los siguientes puntos de vista:

- El conocimiento

  La aparición de la llamada sociedad del conocimiento es uno de los cambios en el contexto de la educación superior que ejerce una gran influencia sobre el funcionamiento de las universidades.

  Para la sociedad del conocimiento, a diferencia de la sociedad industrial, el conocimiento y la tecnología son los elementos de mayor impacto para el desarrollo económico y social de las comunidades, en lugar de la mera producción industrial. Ese desarrollo sólo es posible si se dispone de recursos humanos muy calificados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El entorno de las universidades está cambiando con marcadas características que se reflejan en la acelerada innovación científica y tecnológica y en la rapidez del manejo de la información.

Las universidades adquieren relevancia en esta sociedad, siempre que responda con flexibilidad a las nuevas demandas. Es decir la universidad no solo se comportará como una generadora de conocimiento, sino que deberá satisfacer las necesidades de formación y de desarrollo tecnológico.

- La universalidad

  En las últimas décadas, las universidades han experimentado el cambio más importante de su historia al convertirse en el lugar de formación que satisface la demanda cultural creciente de la población facilitando el acceso a la educación superior.

- La globalización

  Esta ha afectado el mercado laboral, sobre todo el de los graduados universitarios los que trabajan con creciente frecuencia en otros países y además lo hacen en compañías internacionales cuyas metodologías de trabajo tienen un carácter global.

  Esa globalización, y sus requerimientos formativos, afectan de manera muy directa al funcionamiento de las instituciones universitarias, que deberán dar respuesta a unas necesidades de formación que ya no son las específicas de un entorno inmediato. Esto se debe a la velocidad con la que se mueve el conocimiento, así la relativa estabilidad de las profesiones, típica de la era industrial, ligada a unos conocimientos constantes y a un entorno específico, ya no es la situación real imperante. [2,3]

1.4 El avance tecnológico en las carreras de ingenierías.

El rasgo más característico de nuestros tiempos es la marcha acelerada del desarrollo tecnológico. Particularmente la ingeniería como mediadora entre la ciencia y la tecnología ha tenido un gran desarrollo a lo largo del siglo XX, tal afirmación se puede justificar por los avances en el campo de la ciencia y luego la aplicación de esos conocimientos en la solución de los problemas de tipo tecnológico que preocupan a la sociedad.

La aparición de la electrónica en la primera mitad del siglo XX, ha revolucionado al mundo de la comunicación, estableciendo medios de contactos al instante en donde se encuentre la persona. Esta tecnología ha cambiado sustancialmente nuestro comportamiento social a través de la radio, la televisión y la telefonía.

En la última década del siglo anterior comenzó la era de la información, con Internet y la Web se disemina la información, se formaliza el comercio electrónico, la educación virtual y los entretenimientos en red. Estas nuevas configuraciones de interacción global están cambiando nuestra forma de vida, generando un nuevo fenómeno social cuyas consecuencias aún no han sido precisadas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La incorporación del automatismo, el control de procesos por computador, los robots industriales, la actualización de los sistemas de gestión, han posibilitado optimizar los sistemas de producción reduciendo costos y mejorando la calidad y la productividad, lo que permite satisfacer a una masa cada vez más numerosa de consumidores a nivel mundial.

Estos logros de la ciencia y de la tecnología han repercutido grandemente en los aspectos sociales, económicos, políticos y educacionales. La universidad como institución enclavada en el espacio socioeconómico de la comunidad, en la que sus egresados se insertan, no puede quedar exenta de las demandas que esos nuevos ordenamientos le requieren.

Como ya apuntamos, la universidad aún mantiene estructuras académicas donde se prioriza el conocimiento y la profesionalidad. Ese modelo con muy pocas variantes aún persiste y se lo cuestiona por la gran carga de conocimiento especializado que contiene; cuestionamiento que se sustenta en que el acelerado avance de la ciencia y la tecnología hace que el ciclo de vida útil del conocimiento sea cada vez más corto.

Siguiendo este razonamiento no sería necesario recargar al estudiante de conocimientos especializados, más bien sería conveniente dotarlo de un sólido conocimiento básico que le permita encontrar y seleccionar la información que necesita dentro del gran volumen de información, hoy disponible.

Si bien el continuo cambio de las tecnologías genera cambios en el conocimiento, también es cierto, que lo que se mantiene en gran parte inmutable son las ciencias básicas del mundo tecnológico, constituidas por dos ciencias madres, la física y la matemática. Por ello es necesario decidir que parte de la física debe darse con mayor profundidad para que resulte ser el soporte científico del futuro ingeniero.

Además, de los conocimientos y habilidades que tradicionalmente son inculcadas en los planes vigentes, hay otras que deberían incluirse para comprender los nuevos requerimientos del mundo social y laboral, tales como la capacidad de trabajar en grupo, el diseño conceptual, la capacidad de comunicación y el dominio del idioma inglés.

Asimismo, cobra relevancia la formación humanística. Ya que el ingeniero no solo debe dedicarse a los aspectos técnicos, sino que debe ser intérprete de la sociedad por ser parte de ella y porque muchos de los problemas que deberá resolver tienen implicancias sociales, ambientales y culturales.

El ingeniero debe ser una persona con cultura, capaz de intercambiar ideas con personas de otras disciplinas, por ello en los planes de estudio se deben incluir contenidos que le permitan ampliar su

ISBN: 978-987-1676-63-7

visión del mundo, trascender los límites de la tecnología para comprender los aspectos sociales de los problemas de la ingeniería. [3-5]

2 CONTEXTO DEL DESARROLLO

2.1 Proyectos de investigación

Las experiencias que se presentan se desarrollan en un proyecto de investigación interdisciplinario conformado por ingenieros electromecánicos (IEM), electrónicos (IE) y en alimentos (IA), pertenecientes a las Facultades de Ciencias Exactas y Tecnologías (FCEyT) y de Agronomía y Agroindustrias (FAyA), de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE). Con estudiantes de las carreras Ingeniería Electromecánica, con quienes se busca desarrollar y utilizar herramientas didácticas y/o equipamientos que contribuyan a la enseñanza de la ingeniería.
Situación que conforma un espacio propicio para la generación de procesos de articulación de saberes, que favorece a los estudiantes, concluir con éxito la realización de prácticas en tiempo real.

2.2 Origen de la iniciativa

En el marco del proyecto de investigación, se estudia incorporación al ámbito educativo de nuevas tecnologías que promuevan la creación de nuevos entornos didácticos que afectan de manera directa tanto a los actores del proceso de enseñanza-aprendizaje como al escenario donde se lleva a cabo el mismo.
Estas aportan un nuevo reto al sistema educativo que consiste en pasar de un modelo unidireccional de formación, donde por lo general los saberes recaen en el profesor o en su sustituto el libro de texto, a modelos más abiertos y flexibles, donde la información situada en grandes bases de datos, tiende a ser compartida entre diversos alumnos.
El presente trabajo se realizó en el seno de la Cátedra de Mecánica Teórica de la Carrera de Ingeniería de Electromecánica de la UNSE, ante la necesidad de cumplir con el objetivo se formaron dos grupos. Por un lado para desarrollar un dispositivo, aplicable a múltiples experiencias concernientes a la mecánica, en las que se pueda contrastar el aspecto real práctico de los fenómenos dinámicos y cinemáticos con su marco teórico, a través de la simulación de los mismos en tiempo real (Grupo 1) y por otro la de disponer de un dispositivo que permita el análisis práctico del fenómeno dinámico de las vibraciones mecánicas (Grupo 2). Ambos valiéndose de tecnología económica, versátil y sencilla de asimilar, que pueda ser desarrollado, mantenido y actualizado por estudiantes, bajo la supervisión de docentes asesores.

3 DESARROLLO

3.1 Objetivo General

Utilizar nuevas herramientas didácticas como metodología que facilite a los estudiantes de ingeniería, internalizar los mecanismos de producción del saber, a través del uso, diseño y/o

construcción de dispositivos, que permita estudiar y analizar, el aspecto real práctico, de los fenómenos físicos.

3.2 Una experiencia con alumnos de Ingeniería Electromecánica

Integrantes del equipo de investigación acordaron con los estudiantes de ingeniería electromecánica de la UNSE, para que desarrollaran en el ámbito del espacio curricular de Mecánica Teórica el objetivo planteado.

El principio rector de la metodología empelada fue el garantir la accesibilidad a los dispositivos. Las alternativas escogidas, resultaron del cotejo de la factibilidad técnico/económica de cada material y sistema empleado.

4 RESULTADOS

La estrategia de enseñanza aprendizaje con nuevas herramientas didácticas en estudiantes de ingeniería, a través del uso, diseño y/o construcción de dispositivos, ha permitido establecer una metodología que conforma un circuito de tres fases, en las cuales los estudiantes experimentaron actividades que contribuyeron a la construcción de su conocimiento.

Fases de estudio y análisis

Los estudiantes se interiorizan sobre las problemáticas, debiendo introducirse en diversas áreas de la ingeniería. Luego se definió el modelo general, para determinar los componentes requeridos, aplicando criterios técnicos. Con ayuda de los Ingenieros se definieron los parámetros tecnológicos y los requerimientos de los equipamientos para cada grupo. Fundamentalmente en lo que respecta a los sensores y las interfaces. Los grupos analizaron el modo de operación e indagaron sobre los límites de los sensores seleccionados.[6,7]

En esta fase, pudo observarse en ambos grupos de estudiantes, integrar conocimiento, incorporar nuevos conocimiento, investigar, trabajar en equipo, asumir responsabilidades, tomar decisiones.

Fase de construcción del dispositivo

Por un lado una estudiante avanzada de Ingeniería Electromecánica mediante el empleo de la plataforma Arduino con un sensor ultrasónico HC-SR04, la aplicación de un software de adquisición de datos PLX-DAQ, y una planilla de cálculo, genero un archivo en el que se puede graficar la posición de un cuerpo en función del tiempo x=f(t) y obtener también los coeficientes de la ecuación de su movimiento (rectilíneo). Esto permite al alumno comparar valores y expresiones matemáticas de las magnitudes cinemáticas del movimiento obtenidas teóricamente con las obtenidas prácticamente, tanto analíticamente como en forma gráfica.

La plataforma Arduino consiste en un entorno de programación y una placa electrónica simple, dotada con un micro At-Mega 328, ambos de código de abierto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El sensor ultrasónico es un HC-SR04 de Cytron Technologies, emisor-receptor, con un pulso de disparo de entrada de 10 μs de ancho.

La herramienta adquisidora de datos, PLX-DAQ, pertenece a la compañía Parallax, es un complemento para la planilla de cálculo que permite la captación de datos emitidos por el sensor en la misma planilla.

Por otro lado otro estudiante avanzado, actualmente ing. Electromecánico; buscó un dispositivo que contuviera un acelerómetro y una conexión para transmisión de datos. Para ello, utilizó tecnología móvil (teléfono celular). Mediante el software de procesamiento matemático se desarrolló un pequeño programa como interfaz, que capta los datos enviados, los depura, almacena y logra representar gráficamente amplitudes en función de la frecuencia, denominados espectros, lo cual se logra aplicando el algoritmo FFT “Transformada Rápida de Fourier”. [6,7]

El dispositivo móvil cuenta con un sistema operativo Android v.4.1.2, en el cual se instaló la aplicación denominada “Sensor UDP” que permite al usuario enviar datos de los sensores de forma inalámbrica a través de paquetes UDP (User Datagram Protocol), hacia una dirección IP especifica por WiFi.

Incluye soporte para la aceleración lineal, gravedad, rotación, orientación, sensores de luz ambiente y de proximidad; muestra valores de los sensores en la pantalla durante la transmisión inalámbrica; chequea el dispositivo para la disponibilidad del sensor. Los valores se almacenan en un array flotante, con un orden consistente a la interfaz de usuario. Es importante tener en cuenta que no todos los dispositivos son compatibles con todos los sensores.

A continuación se muestra el formato en el que son registrados los datos:

[X Aceleración, Y Aceleración, Z Aceleración, X Gravedad, Y Gravedad, Z Gravedad, X Velocidad de rotación, Y Velocidad de rotación, Z Velocidad de rotación, X Orientación (Acimut), Y Orientación (Elevación), Z Orientación (Angulo de alabeo), Ambiente Luz, Proximidad, Botones del teclado 1 - 8]

Fase de utilización y evaluación de los dispositivos

En cuanto al primer equipo, se realizaron diferentes ensayos de medición de posiciones, velocidades y aceleraciones en función del tiempo. Entre los que se destacan:
Análisis de la caída libre de un objeto [Fig-1]; Estudio del movimiento de bloques de diversos materiales y pesos a lo largo de un plano inclinado [Fig-2], de altura regulable; y el Análisis de vibraciones y resonancia obtenidas en un visualizador de vibraciones mecánicas de frecuencia variable [Fig-3].

ISBN: 978-987-1676-63-7

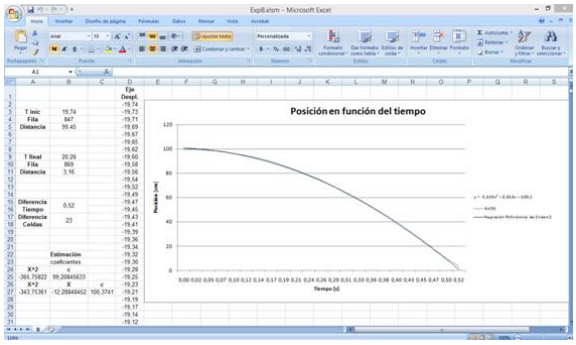


Figura 1: Caída libre: $X(t) = -365{,}76\,t^2 + 99{,}21$ [cm]

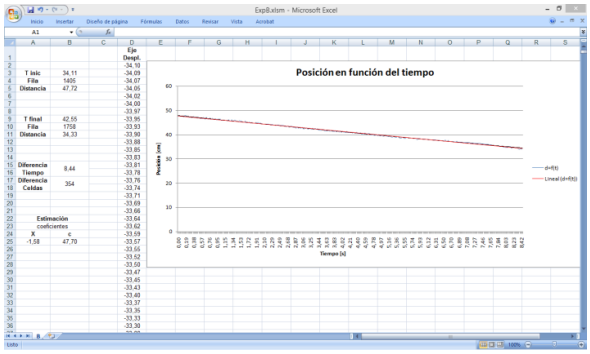


Figura 2: Plano inclinado

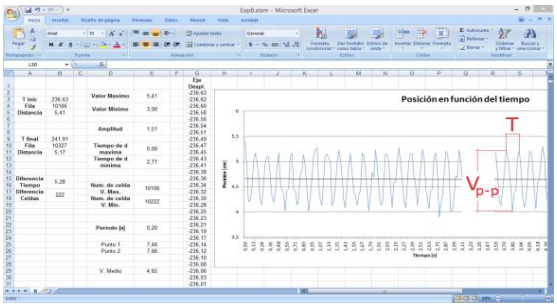


Figura 3: Vibraciones mecánicas

Una vez estudiados los fenómenos físicos, de manera teórica (ideal), pudieron realizar los ensayos y obtener curvas que representen dichos movimientos y ecuaciones de líneas de tendencia que se refieran a dichas curvas con sus respectivos coeficientes. Permitiendo observar las semejanzas y diferencias entre los fenómenos teóricos y los reales prácticos, examinando las causas de estas, y experimentando con las posibles variaciones de los parámetros intervinientes.

En cuanto al segundo equipo, se analizaron prácticas del fenómeno dinámico de las vibraciones mecánicas.

Mediante el software de procesamiento matemático, que no solo captura y almacena los datos, sino que posteriormente calcula la Transformada Rápida de Fourier (FFT), con lo que se logra representar gráficamente y visualizar el espectro de amplitud-frecuencia, en tiempo real. De esta manera se puede observar en un gráfico [Fig-4] la frecuencia con que vibra el sistema. [6,7]

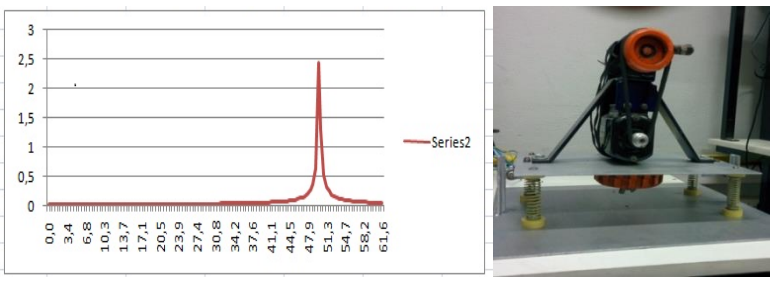


Figura 4: Gráfica Amplitud-Frecuencia mecánicas. (Visualizador de vibraciones)

ISBN: 978-987-1676-63-7

En esta fase en ambos grupos se observó que los estudiantes disfrutan de las experiencias, experimenta la realidad, juega con las variables, registran sus logros, argumentan.

5- CONCLUSIONES

El trabajo realizado pretende rescatar la metodología desarrollada para la enseñanza-aprendizaje de las ingenierías con nuevas herramientas didácticas, a través del uso, diseño y/o construcción de dispositivos simples.

La misma, nos permitió identificar y valorizar algunas fortalezas experimentadas por docentes y estudiantes a lo largo de su desarrollo.

La metodología implementada propició:

- El pensamiento crítico y la reflexión mediante la integración de saberes, de los adquiridos a lo largo de su formación como ingenieros y de los nuevos conocimientos incorporados.
- Espacios de formación para los estudiantes de ingeniería que contribuyeron a internalizar procedimientos que les permita acceder a conocimientos que demanden un nuevo abordaje de las problemáticas clásicas de su desempeño profesional.
- Generar propuestas didácticas y pedagógicas innovadoras, surgidas del trabajo de docentes investigadores de distintos campos del conocimiento.

6. REFERENCIAS

[1] T. Marjoram, Primer informe mundial sobre la ingeniería. UNESCOPRESS- 29.10.2010. UNESCO. 2010.

[2] Ibáñez, Jesús Salinas, Julio Cabero-Almenara, and José Ignacio Aguaded Gómez. *Tecnologías para la educación: Diseño, producción y evaluación de medios para la formación docente*. Alianza Editorial, SBN**:** 84-206-4188-X, 2004. España.

[3] PÉREZ, Daniel Gil, El papel de la Educación ante las transformaciones científico-tecnológicas, *Revista Iberoamericana de Educación Número 18*, 1998, no 18, p. 69-90.

[4] Martínez; González; Rodríguez; Aguilar (2014), *Proyectos de investigación: un escenario propicio para valorizar y fortalecer competencias*. IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (IV CAIM), Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Ingeniería. Resistencia, Chaco. Octubre 2014.

[5] E. Agazzi, El desafío de la interdisciplinaridad: dificultades y logros. Seminario para profesores. Departamento de Filosofía de la Universidad de Navarra. 2001. http://www.arvo.net/pdf/El%20desafio%20de%20la%20interdisciplinaridad%20dificultades%20y%20logros.htm. Obtenido el 28/10/2007.

[6] Yacuk Muñoz M.; Rodríguez R.J.;; Aguilar L.; González; Rodríguez; Martínez (2015); *Equips didácticos aplicados al estudio de la mecánica en ingeniería*. X Jornadas Universitarias de Ciencias Exactas y Naturales, Educación en la Ciencia y en la Tecnología. Universidad Nacional de Catamarca. Diciembre 2015.

[7] Rodríguez R. J.; Yacuk Muñoz M.; Aguilar L.; González L.; Rodríguez R. A.; Martínez S. (2015). *Desarrollo de un sistema para medir vibraciones de un sistema didáctico, utilizando dispositivos android y procesamiento de datos en tiempo real*. X Jornadas Universitarias de Ciencias Exactas y Naturales, Educación en la Ciencia y en la Tecnología. Universidad Nacional de Catamarca. Diciembre 2015.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MODELIZACIÓN DE UN MECANISMO DE PLACAS EN EQUILIBRIO, ANTE UN AGENTE PERTURBADOR EXTERNO

Mogliani, Agustin Gonzalo

Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1249, Neuquén, Argentina
correo-e: moglianiagustin@gmail.com

RESUMEN

En el marco del cursado de la materia Física II correspondiente al ciclo básico de las carreras de Ingeniería que se dictan en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, se diseñó y analizo, como trabajo de promoción, un mecanismo de compuertas en equilibrio.

En el proceso de modelización y resolución de la problemática se utilizan conceptos de equilibrio de un cuerpo rígido, deformaciones mecánicas, estática de los fluidos y la noción de caudal.

El sistema mecánico en estudio consiste en dos compuertas articuladas y vinculadas a través de un cuerpo elástico. Estas compuertas mantienen cerrados dos receptáculos con fluido. La problemática consiste en analizar la perturbación del mecanismo mediante la incorporación de un caudal de fluido a uno de los receptáculos y el objetivo principal se centra en determinar el caudal de fluido a retirar del otro receptáculo a fin de garantizar el equilibrio a lo largo de todo este proceso.

Los algoritmos físico matemáticos, fueron programados (Software computacional Maple 17) para estudiar su comportamiento, por ejemplo, frente a variaciones en los valores de las densidades de los fluidos, definiendo un coeficiente que los relaciona.

Como resultado se obtuvieron expresiones genéricas que describen el funcionamiento del sistema y permiten analizar, con cierto detalle, casos particulares del mismo así como también visualizar las limitaciones que se presentan.

Palabras Claves: *Modelización, Equilibrio, Fluidos, Deformación*

REFERENCIAS

[1] Programa de contenidos mínimos de Física II, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

[3] Beer, Johnston, Mazurek, Eisenberg. Mecánica Vectorial para Ingenieros. Novena edición, 2010.

[2] Maple 17, de Maplesoft.

Área Temática: A-Enseñanza

1. INTRODUCCIÓN

Como actividad de cierre de la materia Fisica II, dictada en la Universidad Nacional del Comahue, se propuso como desafío a un conjunto de alumnos el diseño de sistemas que tengan en cuenta los conocimientos desarrollados durante el cursado, para así modelizarlos y resolverlos a través de los mismos. En mi caso particular presente un trabajo que utiliza los conceptos de equilibrio de un cuerpo rígido, deformaciones mecánicas, estática de los fluidos y la noción de caudal.

La idea del sistema sobre el cual presente el trabajo al igual que las problemáticas a analizar surgió de manera personal debido a que en gran parte del cursado de la materia trabaje con compuertas y fluidos, ya sea en reposo o en movimiento. Este sistema trata principalmente de una estructura de placas sometidas a fuerzas provocadas por fluidos con un grado de libertad que fue pensada como un isostático, donde ambas placas están vinculadas mediante un tensor.

Conjuntamente con el surgimiento de la idea, realice una maqueta sencilla a escala de las componentes mecánicas del sistema sin considerar los fluidos de ingreso y egreso, a fin de comprender aún mejor el comportamiento del sistema y los esfuerzos a los que se ve sometido.

El sistema parte de un estado de equilibrio del que conozco solo algunos datos y se lo somete a un proceso que es el ingreso de un caudal y el egreso de otro distinto de manera simultánea donde ambos caudales se vuelcan en dos receptáculos particulares. A medida que se produce este ingreso y egreso de sustancias que pueden o no ser iguales, busco mantener en todo momento el equilibrio del sistema, es decir busco que sea cuasiestático.

A la hora de abordar la problemática, debido a la cantidad de herramientas con la que cuento, en primera instancia procedí a realizar una serie de suposiciones para acotar el comportamiento del sistema y sus elementos en estudio. Con respecto a cómo afronte la resolución del mismo, la estrategia principal fue analizar las distintas componentes del sistema a fin de comprender los esfuerzos e interacciones a los que se ven sometidas, para luego realizar un armado de las partes y comprender el funcionamiento total del sistema.

Finalmente, logre describir el funcionamiento de la estructura durante todo el proceso al que se la somete, con cierto grado de detalle y encontrando limitaciones en el proceso.

2. PROCESO DE MODELIZACION

2.1. Concepción del mecanismo

La idea surge de juntar contenidos de fuerzas en placas con la noción de caudal y la estructura elegida es la que muestra en la Figura 1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

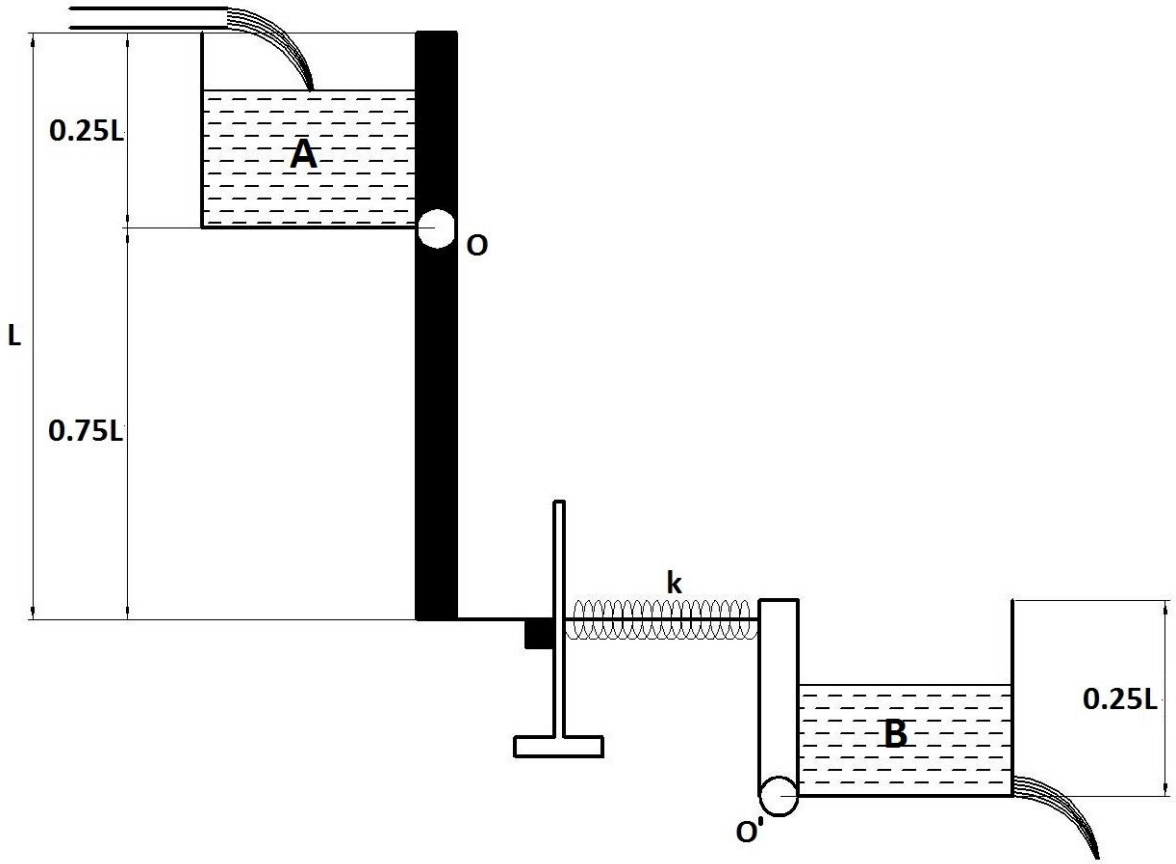


Figura 1: Sistema en estudio.

El sistema se compone básicamente de dos recipientes, el superior con una base cuadrada de longitud ℓ y el inferior con una base rectangular de longitudes variables. El primer tanque cuenta con una compuerta en uno de sus laterales, la cual forma parte de una barra B de longitud L. En el extremo inferior de la barra B, se halla un cable de acero que se vincula horizontalmente al extremo superior de la compuerta del segundo estanque. En medio de esta conexión se encuentra un resorte con una compresión inicial x_0 y una de constante k conocida.

Al comenzar a incorporar un caudal constante a través de la cañería superior dentro del tanque A se produce un desequilibrio en el sistema si únicamente nos manejamos con A, para lograr que no se perturbe el equilibrio el objetivo a lograr es accionar sobre el tanque B de tal manera de que el sistema no colapse. Este proceso deberá ser equilibrado en todo momento, el interés no recae únicamente en el estado inicial y final de equilibrio, pues un estado intermedio de desequilibrio no permitirá finalizar el proceso con éxito.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2. Descripción del proceso

Estamos ante un proceso netamente hidráulico, ya que únicamente considero variaciones en la cantidad de volumen dentro de cada tanque y en el caudal de salida. En ningún caso analice ni tuve en cuenta variaciones de temperatura o intercambios de calor.

2.2.1 Características del proceso

La cañería que se encuentra por encima del tanque superior A, vierte líquido dentro de el con un caudal $Q_{entrada}$ constante. Esta situación aumenta progresivamente la fuerza que el contenido del tanque A ejerce sobre la compuerta, haciendo que en consecuencia el torque que se produce con respecto al punto O sea cada vez mayor. Para compensar eso, en el otro extremo de la barra B donde se halla el cable de acero y el resorte, el tanque inferior B libera parte de su contenido al exterior del sistema haciendo que la resultante entre las fuerzas del resorte y el fluido se compensen de manera tal que el sistema permanezca en equilibrio. Todo este proceso de incorporación y liberación de líquido a través de los tanques A y B respectivamente, se realiza de manera SIMULTÁNEA.

2.2.2 Estado inicial

El tanque superior contiene un volumen inicial (v_{0A}) de líquido de densidad ρ_A y el inferior un volumen v_{Bo}. Además ambas compuertas están en forma vertical al igual que la barra B, lo que hace que el torque de sus respectivos pesos no tenga efecto alguno sobre el sistema. Para el caso del resorte, el mismo presenta una compresión inicial x_0 y una constante de elasticidad k.

2.2.3 Estado final

El tanque superior se llena hasta una determinada altura ($< h_A$) y el inferior pierde parte de su contenido para mantener la configuración inicial de la barra B, compuertas y el resorte.

2.2.4 Objetivos

Como objetivos, me propuse los siguientes:

- Teniendo como dato el $Q_{entrada}$ al tanque superior, que las densidades son distintas ($\rho_A \neq \rho_B$) y que el tamaño de ambos tanques y compuertas también lo son hallar h_{0B} y v_{0B} para que el sistema permanezca en equilibrio en el instante anterior a la apertura de la cañería

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Hallar el caudal de salida en función de los datos dados y calculados del sistema, durante todo el transcurso del proceso.

2.3. Modelización

2.3.1 Simplificaciones

Antes de comenzar a trabajar sobre las problemáticas propuestas, me vi obligado a realizar simplificaciones para acotar el comportamiento del sistema en estudio, debido a que mis conocimientos en general, están bastante limitados. Esto conlleva a que la solución que obtuve para el problema planteado tenga un campo de validez limitado, ya que no resolví la estructura planteada, sino que resolví una idealización de la misma.

Dentro de las Hipótesis Simplificativas, menciono aquellas de mayor importancia que son las siguientes:

- Asumo despreciable la deformación del cable, de otro forma, variaría el ángulo de ambas compuertas produciendo que el peso de estas comience a ejercer un torque y colapse el sistema. Desde el punto de vista práctico, quedaría definir de acuerdo al tipo de material elegido la sección transversal necesaria para que las deformaciones sean compatibles con lo que yo en mi problemática mida como mi cero.
- Considero las articulaciones lisas, por lo que no existe un torque por fricción.
- A la hora de pensar y trabajar sobre el sistema, lo pienso como plano ya que no hay nada que lo limite en cuanto a la profundidad del mismo.

No todas las hipótesis simplificativas las lleve a lo largo del trabajo, al final del mismo, algunas como por ejemplo la rigidez del tensor que mantiene vinculada ambas compuertas, las analice desde el punto de vista de que podría ocurrir si no las considero y de qué manera podría controlar los efectos que acarrean los nuevos comportamientos que presentara el sistema.

2.3.2 Abordaje de la problemática

Una vez que limite y establecí el comportamiento del sistema, procedí a abordar la problemática dividiendo la estructura y el proceso en partes, es decir, en vez de tomar un todo, analice cada una de las partes y procesos que componen y afectan a mi sistema para luego comprender en detalle el funcionamiento del mismo.

3. RESOLUCION

Como mencione en el apartado 2.3.2, dividí en partes tanto las componentes que conforman la estructura como así también los efectos que producen la entrada y salida de fluidos sobre el sistema. Todo esto me condujo a la elaboración de distintos diagramas de cuerpo libre (DCL) para ambas compuertas/barras en equilibrio, los cuales pueden observarse conjuntamente en la figura (2).

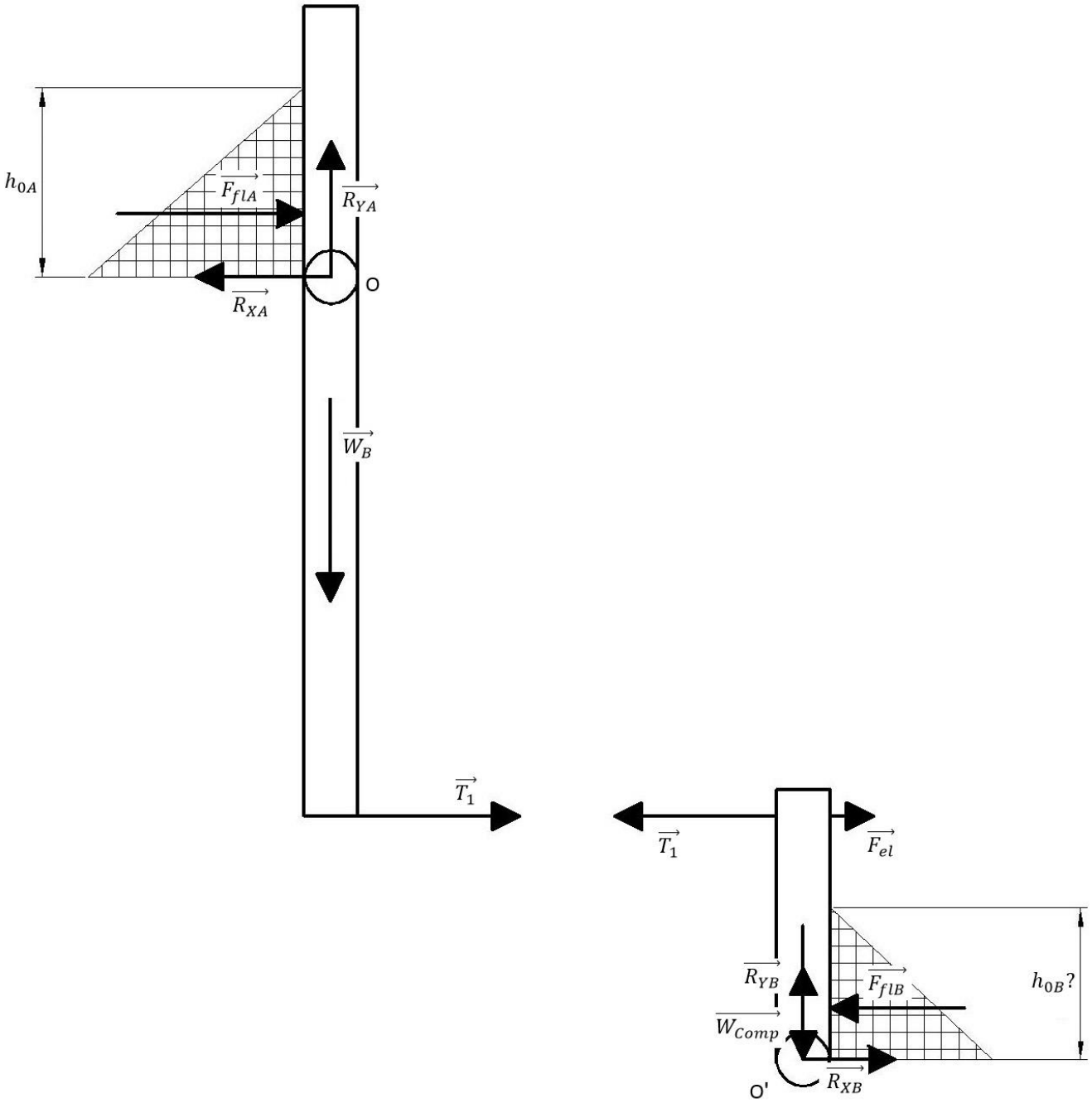


Figura 2: DCL de las componentes que conforman el sistema en estudio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Una vez realizado cada uno de los DCL de los elementos que conforman el sistema, procedí a buscar fuerzas y alturas en función de los datos propuestos, obteniendo a través de las relaciones existentes entre las mismas, las expresiones para la altura y el volumen inicial de fluido que contiene el tanque B. Las mismas se presentan a continuación:

$$h_{0B} = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{2}\frac{L}{\rho_B g n}kx_0 - \frac{1}{3}\frac{\rho_A (h_{0A})^3 \ell}{\rho_B n}\right)} \qquad (1)$$

$$v_{0B} = m\,n\sqrt[3]{\left(\frac{3}{2}\frac{L}{\rho_B g n}kx_0 - \frac{1}{3}\frac{\rho_A (h_{0A})^3 \ell}{\rho_B n}\right)} \qquad (2)$$

Cabe destacar que además de un balance de fuerzas sobre ambas compuertas, me valí también de equilibrios de torques sobre puntos estratégicos como los ejes de giro de ambas. Además, las vinculaciones entre las relaciones obtenidas las realice a partir de la tercera Ley de Newton.

Una vez que obtuve las expresiones (1) y (2) para estas dos variables, pude determinar todas las condiciones iniciales del sistema. Con todas ellas, procedí a analizar como la entrada y salida de los caudales afectaban las alturas de los fluidos en los tanques y los módulos y puntos de aplicación de cada una de las fuerzas del sistema. En la presentación del trabajo se utilizaron colores para marcar estas fuerzas y alturas que varían durante el proceso. Con todo este análisis llegue a una expresión totalmente genérica en función de las condiciones iniciales dadas y calculadas que se presenta a continuación:

$$\boldsymbol{Q_{salida}} = \frac{\left\{\sqrt[3]{\left(\frac{3\,kx_0 L}{2\rho_B g n} - \frac{\rho_A \ell\left(h_{0A} + \frac{\Delta v_A}{\ell^2}\right)^3}{\rho_B n \quad 3}\right)} - \sqrt[3]{\left(\frac{3}{2\rho_B g n}\frac{L}{kx_0} - \frac{1}{3}\frac{\rho_A (h_{0A})^3 \ell}{\rho_B n}\right)}\right\} m\,n}{\frac{Liquido\ vertido}{\boldsymbol{Q_{entrada}}}} \qquad (3)$$

A partir de esta expresión y trabajando sobre un caso particular, halle una expresión que vincula el Q_{salida} y la Δv_A; cuya grafica se presenta a continuación:

ISBN: 978-987-1676-63-7

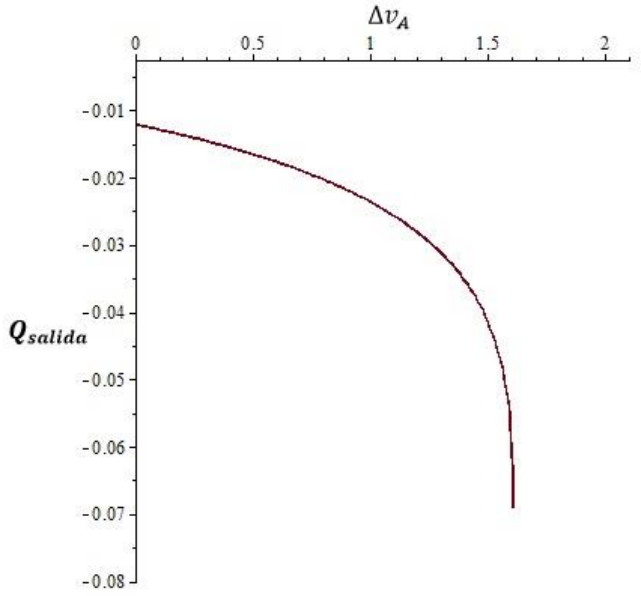


Figura 3: $Q_{salida} = f(\Delta v_A)$

Visualmente se puede apreciar que el modulo del Q_{salida} va aumentando exponencialmente a medida que se genera una mayor variación de volumen en el tanque superior. Sin embargo, al observar con mayor detenimiento la gráfica, podemos notar que la misma deja de presentar valores reales para las $\Delta v_A > 1{,}6m^3$ aproximadamente, lo cual se debe a que el v_{0A} contenido en el tanque superior no hace posible seguir agregando fluido dentro del mismo.

También realice un análisis de como la relación entre las densidades de ambos fluidos afectan al Q_{salida} y a la Δv_A, dejando los demás datos con valores particulares. Donde los infinitos casos que se pueden dar al relacionar la ρ_A y ρ_B se pueden agrupar en 3 grupos diferentes que son los siguientes:

- $\frac{\rho_A}{\rho_B} < 1, \rightarrow \rho_A < \rho_B$
- $\frac{\rho_A}{\rho_B} = 1, \rightarrow \rho_A = \rho_B$
- $\frac{\rho_A}{\rho_B} > 1, \rightarrow \rho_A > \rho_B$

La grafica de este análisis se encuentra en el trabajo presentado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSIONES

- Para la resolución de esta problemática que diseñe y presente, pude con herramientas sencillas elaborar una solución que no solo responde a un caso particular, sino que está abierta a responder ante cambios de densidades de los fluidos, cambio de dimensiones de los tanques y otras situaciones que se puedan presentar.
- A su vez, a través del software computacional Maple 17, realice un análisis de la solución obtenida para un caso particular y me mostro las limitaciones que presentaba el sistema.
- Tanto la estructura como el proceso al que se la somete tienen una peculiaridad; si bien el fluido que ingresa y egresa está en movimiento, la estructura permanece en reposo a lo largo de todo el proceso.

  Por otra parte, si consideramos una especie de "caja negra" sobre el sistema que nos permita ver únicamente el caudal de ingreso y egreso que lo perturba, sin conocer su funcionamiento, se podrá evidenciar que:

  - ✓ El sistema en su totalidad no es estacionario y dependiendo de la relación entre las densidades de ambos fluidos de ingreso y egreso, el sistema puede ganar o perder masa.
  - ✓ Ingresa un caudal constante y sale otro variable en el tiempo, lo que indica que no hay una continuidad entre el fluido de ingreso y egreso, es más, estos fluidos pueden no ser iguales; pero a su vez si existe una relación entre ambos caudales. Por lo tanto se puede concluir que no hay una cañería que une el punto de entrada con el de salida, sino que existe alguna estructura más compleja que una simple tubería.

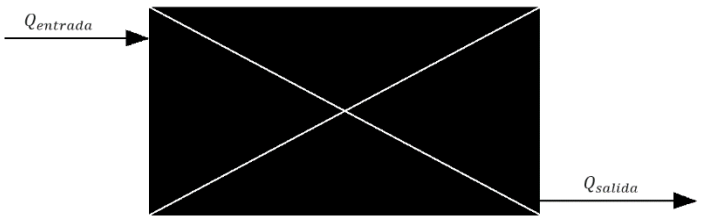


Figura 4: Caja negra que oculta el sistema en estudio.

- Por último, si se quitaran una o más de las hipótesis simplificativas propuestas en un inicio, se podrían analizar otras problemáticas dejando el camino abierto para que otros estudiantes puedan retomar el trabajo o incluso yo mismo en un futuro cuando me interiorice con materias ingenieriles más específicas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. REFERENCIAS

[1] Programa de contenidos mínimos de Física II, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.

[2] Beer, Johnston, Mazurek, Eisenberg. Mecánica Vectorial para Ingenieros. Novena edición, 2010.

[3] Maple 17, de Maplesoft.

Agradecimientos

Deseo agradecer principalmente al profesor Mario de la Canal de la asignatura Fisica II, por proponerme esta posibilidad de presentar mi trabajo en el VCAIM 2016 y por dedicar parte de su tiempo en asesorarme de manera incondicional.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LAS MODALIDADES SEMIPRESENCIAL, CON UTILIZACIÓN DE TIC`S Y PRESENCIAL EXCLUSIVA EN EL ÁREA DE MATEMÁTICA DE LA FI-UNLZ

Claudia L. Iravedra [1], Adriana M. Graña[1] y Lilia M. Schaposchnikoff [1]

[1] Departamento de Ciencias Básicas – Universidad Nacional de Lomas de Zamora – Facultad de Ingeniería – Instituto de Investigaciones de Tecnología y Educación IIT&E Camino de Cintura y Juan XXIII – Lomas de Zamora – Pcia. De Buenos Aires

correo-e mail: omaclaudia@hotmail.com, agrana16@yahoo.com.ar, marianaschapo@hotmail.com, institutoiite@gmail.com

RESUMEN

En el marco del programa de investigación “Las TIC y su contribución al Proceso de enseñanza y aprendizaje en carreras de ingeniería: evaluación de experiencias en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora”, radicado en el Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación (IITE), desde el que se promueve la planificación y desarrollo de experiencias educativas con el uso de TIC con el objeto de mejorar la enseñanza de la ingeniería, se presenta el siguiente trabajo basado en una experiencia en la cátedra de MATEMÁTICA I de las carreras de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ). En él se describen las actividades realizadas en la modalidad semi-presencial que desarrolla una de las comisiones de dicha cátedra, para la cual se utiliza como soporte informático el Aula Virtual de la plataforma que dispone la Facultad. Esta modalidad de cursada les brinda a los alumnos la posibilidad de lograr un grado de autonomía en el aprendizaje, que los lleva a tomar decisiones respecto de tiempos, espacios, manejo de tecnología, comunicación con docentes y pares, todas variables que implican una responsabilidad diferente y que llevan a lograr una maduración óptima en la primera etapa de su vida universitaria [1].
Se describen las componentes de dicha experiencia de integración de TIC a la enseñanza de Ciencias Básicas en las carreras de Ingeniería que nos permiten identificar, analizar y comparar resultados del proceso de enseñanza y aprendizaje con especial atención en los indicadores de deserción y aprobación, caracterizando la participación de los alumnos en el entorno virtual con el objeto de determinar si existen evidencias que permitan inferir asociación entre el uso de TIC como complemento a la enseñanza presencial y los resultados del proceso [2].

Palabras Claves: *enseñanza, semi presencial, TIC*

Área Temática: Enseñanza

1- INTRODUCCIÓN: Fundamentación de la Propuesta

Desde el Instituto de Investigaciones en Tecnología y Educación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (FI-UNLZ), se promueve la planificación y desarrollo de experiencias educativas con el uso de TIC's con el objeto de mejorar la enseñanza de la Ingeniería en ese marco. Como docentes del área de matemática de la Facultad y comprometidos con dicho objetivo, es que planteamos este trabajo en la Cátedra de Matemática de las carreras de Ingeniería de la FI-UNLZ.
Fundamentamos nuestra propuesta en tres importantes ítems en los cuales trabajamos desde las cátedras del área en general:

- *Aprendizajes significativos*
- *Procedimientos en el aprendizaje*
- *Articulación nivel medio y superior*

Como primer elemento a considerar, creemos que es muy importante, en la educación universitaria de hoy, lograr en los estudiantes **aprendizajes significativos** que permitan establecer relaciones entre los conocimientos, actitudes y valores que el alumno posee con las nuevas informaciones y experiencias. Para que el aprendizaje significativo se realice, es necesario que el contenido sea potencialmente significativo para el estudiante y que éste tenga la voluntad de aprender significativamente, relacionando el nuevo contenido con el conocimiento almacenado en sus esquemas mentales. Así, las actividades deben mantener la curiosidad y el interés de los alumnos y ser atractivas para los profesores. Todo esto permite concebir los procesos de enseñar y aprender como una actividad interactiva de la construcción de significados y en esta tarea es el profesor quien representa los conocimientos compartidos por la comunidad científica.
La intención del proceso de enseñanza es que estas formas culturales referidas al "saber hacer", sean adquiridas por los alumnos de forma manifiesta y contribuyan así a la formación de personas pensantes, reflexivas y críticas.
El proceso de aprendizaje deberá ser un proceso de reflexión sobre la acción, y para ello es importantísima la selección de actividades a desarrollar por el alumno.
Las actividades, contextualizadas a través de los conocimientos previos e intereses de los estudiantes, deben facilitar aprendizajes transferibles a otras situaciones. El empleo de la computadora es el ejemplo más claro de las nuevas relaciones que es posible establecer entre el sujeto que aprende y los objetos matemáticos, lo que supone una nueva forma de abordar los procesos curriculares, pues no solamente incorpora una nueva herramienta, sino también nuevos lenguajes y formas desconocidas de acceder a la representación de objetos matemáticos. A través de la visualización gráfica que proporciona la computadora, se dinamiza el trabajo educativo y se logra que el alumno manipule los objetos matemáticos y active su capacidad creativa.
La correcta dirección de la actividad cognitiva de los estudiantes es esencial para la elevación de la calidad en la formación de los ingenieros. Es necesario saber que para lograrlo no basta con cambios en los planes de estudio y programas de las asignaturas que incluyan un alto nivel científico, si se mantienen los métodos de enseñanza que no están en correspondencia con las exigencias del mercado laboral de hoy y que el país necesita para lograr insertase en el mundo globalizado que vivimos.
Es preciso entonces que los docentes conozcamos los procesos cognitivos, afectivos y metacognitivos de los alumnos implicados en el aprendizaje significativo y la forma de intervenir en ellos, ya sea en su desarrollo o su trasmisión.
Creemos importantísimo para la formación de los futuros ingenieros hacer mucho hincapié en **"los procedimientos".** Trabajarlos implica revelar la capacidad de "saber hacer", de saber actuar de manera eficaz. En este punto es muy importante la tarea del docente quien, consciente o inconscientemente, modela las actuaciones de los alumnos e induce a la solución de los problemas y logro de los objetivos que se plantean. En las materias de los ciclos intermedios y superior de la carrera, los alumnos de ingeniería trabajan muchísimo en el aprendizaje de los "procedimientos": es un contenido que implica la adquisición y generalización de la acción, y desde este concepto es que la matemática puede hacer su aporte en el inicio de la carrera ya que muchos de sus métodos o

ISBN: 978-987-1676-63-7

procedimientos inducen a la generalización de propiedades. La matemática es esencialmente una actividad vinculada con el HACER y poner en práctica conocimientos adquiridos.
El **tránsito del paso del nivel medio al nivel universitario** ha planteado históricamente dificultades severas, en especial en el área de la matemática. Los diagnósticos que muchas instituciones han realizado respecto del andamiaje intelectual con el cual los alumnos llegan al nivel universitario han sido, año a año, desalentadores. Pese a ello, desde las universidades se han realizado acciones en distintas direcciones que permitan mejorar la situación, logrando con resultados optimistas que los alumnos que muestran responsabilidad en la toma de conciencia del cambio que significa el estudio universitario, en especial en las carreras de ingeniería, lleguen a transitarlas exitosamente.

2- OBJETIVOS

Objetivo General: determinar si existen evidencias que permitan inferir asociación entre el uso de TIC como complemento a la enseñanza presencial y los resultados del proceso.

Objetivos específicos:

- Identificar los hábitos de participación, compromiso con el proceso de aprendizaje en entornos virtuales y responsabilidad en la entrega en tiempo y forma de los trabajos solicitados como elementos fundamentales para la aprobación de las materias de la carrera de Ingeniería.
- Incrementar considerablemente las competencias de los alumnos en el uso de tecnologías con funciones educativas.
- Alcanzar un perfil de ingresante adecuado a las necesidades de formación tecnológica e ingenieril, utilizando las herramientas tecnológicas que la FI-UNLZ dispone para el proceso académico.
- Promover en el estudiante una mayor autonomía en su trabajo y autoevaluación de los resultados obtenidos.

3- DESARROLLO

La irrupción de las TIC en la vida del hombre y en su campo social, político, económico y cultural ha promovido cambios en la forma de realizar ciertas tareas. Esto ha generado un conjunto de necesidades, sobre todo en el ámbito educativo, y especialmente en la formación de las personas. Hoy se plantea un cambio en la concepción y alcance de la constitución del recurso humano, educándolo a lo largo de su vida con herramientas que le permitan aprender a aprender, que generó un impulso sin precedentes en la educación a distancia, en sus distintos niveles, formatos y modalidades [1,2].
La presencia de las TIC en las ofertas de educación a distancia ha provocado una mayor diversificación de las modalidades en las que ésta se presenta: de manera exclusiva o combinada con la educación presencial, de forma sincrónica, asincrónica o utilizando ambas posibilidades; integrando las TIC con las otras tecnologías ya existentes, adoptando sistemas enteramente virtuales... Ello da lugar, en cualquier caso, a una variada gama de formatos caracterizados por un potencial interactivo mucho mayor que los de las generaciones anteriores de este tipo de educación.
Las características más relevantes que han puesto en evidencia diversos estudios con relación al proceso de aprendizaje con aulas virtuales son [3,4]:

- Una relación menos definida del espacio y del tiempo educativo.
- Un uso más amplio e intensivo de las TIC.
- Una planificación y organización del aprendizaje más guiados en sus aspectos globales.
- Unos contenidos de aprendizaje apoyados en una mayor base tecnológica.
- Una forma telemática de llevar a cabo la interacción social.
- Un desarrollo de las actividades de aprendizaje más centrado en el alumnado.

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho es que trabajamos en la propuesta que queremos compartir.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La comisión Semi presencial de la cátedra de Matemática I funciona de la siguiente manera: debido a que la cátedra tiene una carga horaria de 128 hs. cuatrimestrales, los alumnos que eligen la modalidad presencial cursan dos veces por semana 4 horas cada día; los alumnos que VOLUNTARIAMENTE optan por la opción semipresencial van a clases presenciales sólo una vez por semana (los días jueves) y la segunda clase semanal la desarrollan en forma virtual utilizando como soporte la plataforma en la que se encuentran todas las Aulas virtuales de nuestra Facultad.

3.1. ESTRUCTURA DE LAS CLASES

Los contenidos del programa de la asignatura se organizan de modo que cada uno tenga:

INICIO PRESENCIAL, en el que se explican los conceptos fundamentales (Clase Presencial).

DESARROLLO VIRTUAL, donde se resuelven actividades guiadas para elaborar conclusiones, enunciar definiciones y propiedades. También se realizan actividades prácticas, con ejemplos resueltos y ejercicios propuestos. Al final de cada Clase Virtual se dan los resultados de los ejercicios, Actividades Integradoras resueltas y una Actividad de Devolución Escrita (disponible en el aula virtual a partir de la siguiente clase.

CIERRE PRESENCIAL para controlar las actividades y hacer una puesta en común. Los alumnos deberán entregar la "Actividad de Devolución Escrita" correspondiente (Siguiente Clase Presencial).

3.2. ACTIVIDADES ESPECIALES DE LA MODALIDAD

3.2.1. Actividades De Devolución Escrita (ADE'S)

Los alumnos deberán entregar cada jueves una "ACTIVIDAD DE DEVOLUCIÓN ESCRITA" (ADE) que será preparada por el profesor a cargo y subida al Aula Virtual en el momento que éste crea más oportuno. Dicha actividad constará de ejercicios y/o problemas (no más de tres) referidos a los temas tratados en la clase virtual correspondiente.

3.2.1.1- Condiciones de entrega de cada ADE

Se entregan de forma manuscrita al inicio de la clase presencial inmediata posterior.
En caso de ausentarse deben enviarlo digitalizado al aula virtual y luego entregar el original para facilitar su corrección.
Deben estar resueltas un mínimo del 70% de las actividades indicadas.
Dichas actividades no necesariamente deben estar totalmente correctas en su resolución.

3.2.1.2- Objetivos y Fundamentos de las ADE's

El seguimiento semanal del trabajo de cada alumno redunda en su propio beneficio.
El estudiante se contacta y relaciona con los contenidos desarrollados en cada clase.
Se estimula el trabajo autónomo del estudiante.
Le da al estudiante la posibilidad de adquirir y reafirmar su confianza con respecto a la materia ya que, en muchas oportunidades, la falta de seguridad y temores pre-existentes impiden su progreso.
La devolución de las actividades corregidas y la posibilidad de realizar las consultas necesarias le otorga, a quien se compromete con la metodología, la oportunidad de una cursada exitosa.
Posteriormente se suben al aula virtual las resoluciones de las ADE's hechas por los docentes a cargo, con lo cual, el alumno tiene la oportunidad de observar y salvar cualquier duda que hubiese subsistido.
Se incentiva el intercambio y la colaboración grupal de los estudiantes ya sea de manera presencial o a través del foro correspondiente en el Aula Virtual.

3.2.2- Entregas Calificadas (EC)

Se llevarán a cabo 4(cuatro) "**ACTIVIDADES DE ENTREGA CALIFICADA", (EC)** que se entregan en forma virtual, en los días estipulados o acordados entre los alumnos y el docente en un lapso de 12 hs. Las EC también se presentarán en papel en la clase siguiente a la estipulada en forma virtual, para ser corregida y calificada por el docente a cargo. Los alumnos que hayan entregado y aprobado las 4 EC, podrán tener, de ser necesario, una oportunidad más de recuperación de los parciales o

ISBN: 978-987-1676-63-7

podrán ser tenidos en cuenta, en caso de regularizar, para ponderar las notas de los parciales y lograr la promoción.
Puede recuperarse 1 (una) entrega calificada para obtener el crédito correspondiente.
No aprobarlas o no entregarlas todas no implica ninguna consecuencia para el alumno.

3.2.3- SEGUIMIENTO

Este tipo de modalidad de cursada también existe en nuestra Facultad en el curso de Nivelación RAMPA de Matemática, que los alumnos deben aprobar para poder cursar la materia Matemática I. Durante dicho curso se les anuncia a los alumnos que podrán elegir esta modalidad también en esa materia. La mayoría de los alumnos del Rampa que han cursado en forma Semipresencial repiten la experiencia en Matemática I.
Es de suma importancia el seguimiento casi personalizado de los alumnos en esta modalidad, por lo tanto, el docente a cargo lleva un control de entregas de ADE, y EC que deben estar todas debidamente entregadas y corregidas antes de cada parcial. Dicha planilla de control será entregada al titular de la cátedra antes del cierre de regularidad de cada cuatrimestre.

3.3- MATERIAL DE TRABAJO

Las instituciones de nivel superior forman graduados preparados para actuar en entornos cambiantes, donde las competencias profesionales son factores distintivos de la calidad de su formación. Teniendo en cuenta ello es que creemos que el material didáctico con el que trabajan los alumnos, sea presencial/tangible o virtual, debe adecuarse a esta realidad.
En este aspecto diseñamos el material de la cátedra de Matemática I de forma tal que pueda adaptarse a las dos modalidades que ofrece la asignatura con los cambios y ajustes necesarios respecto de cada una. El material que se utiliza en la Comisión semipresencial es básicamente el mismo que usan las comisiones presenciales, la diferencia es que está reordenado y reorganizado en “CLASES PRESENCIALES” y “CLASES VIRTUALES”.
Tenemos muy claro que la lectura de contenido matemático no es habitual en los alumnos que recién salen del nivel medio y que necesitamos incentivarlos de la mejor manera posible para que se habitúen a ello, ya que en el resto de la carrera deberán hacerlo.
El material tiene ciertos tips que son absolutamente necesarios para favorecer la lectura de contenidos matemáticos, los procedimientos que se adaptan a cada uno y las significaciones respectivas. Un ejemplo clave son las advertencias, íconos que indican que son cuestiones muy importantes y que deben tenerse muy en cuenta para el desarrollo del tema o bien para el desarrollo de temas posteriores.
Otra cuestión refiere a la estética del material donde se utilizan colores, referencias y gráficos que favorezcan y amenicen la lectura.
También en este material hay ejemplos de ejercicios y problemas “resueltos” que obedecen a la necesidad de mostrar el uso correcto del lenguaje matemático y el orden en cada ejercicio o problema que seguramente favorecerá el entendimiento del contenido aplicado.
Como ya dijimos, el material está organizado en Clases Presenciales y Clases Virtuales:

Clases Presenciales: son las trabajadas en clase presencial. En ellas están considerados los conceptos y desarrollos que requieren una mayor comprensión y fijación por parte de los estudiantes, el inicio de conceptos nuevos que se deben aprehender para el desarrollo de temas subsiguientes, las nociones básicas, la incorporación de estrategias de resolución que exigen el análisis y discusión de los estudiantes acompañados por el docente.

Clases Virtuales: son las que los estudiantes leen y trabajan en el transcurso de la semana individual o grupalmente, según ellos mismos dispongan. En estas se hace mayor hincapié en deducciones que el alumno puede y debe comprender por sí mismo o, por lo menos, empezar a intentarlo, resolución de ejemplos, problemas y ejercicios iguales a los de las otras comisiones. Se agregan en estas clases Actividades Integradoras Resueltas que intentan reforzar la comprensión del tema tratado y que pueden usar para resolver y autocorregir lo hecho por ellos mismos de manera de estimular una de las finalidades más importantes de esta modalidad que es lograr la autonomía y autoanálisis de sus propios conocimientos y capacidades.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4- RESULTADOS

Si iniciamos analizando los datos de todas las comisiones de la materia Matemática I, o sea ambas modalidades conformadas, obtenemos los siguientes datos (Tabla Nº 1):

Tabla N°1: Evolución de la cantidad de alumnos

Año	Inscriptos	Cursantes	Aprobados	%Deserción	% Aprobación
2013 2º	168	109	39	35,12%	35,78%
2014 1º	287	200	106	30,31%	53,00%
2014 2º	232	159	59	31,47%	37,11%
2015 1º	292	164	96	43,84%	58,54%
2015 2º	302	197	78	34,77%	39,59%

Estamos comparando los últimos 5 cuatrimestres. Con un promedio general, de tendencia creciente, de 256 alumnos inscriptos, por cuatrimestre (Figura Nº 1). Observando picos de inscriptos en el primer cuatrimestre del 2014, aumentando al punto máximo en el primero del 2015. Se debe tener en cuenta que, en el primer cuatrimestre, se incorporan los ingresantes a las carreras, contando los alumnos aprobados por el curso de nivelación RAMPA, los Eximidos por ingreso de otras universidades y algunos recursantes; cuando en el segundo cuatrimestre, sólo se inscriben los ingresantes que aprobaron el curso de nivelación RAMPA del segundo cuatrimestre y todos los recursantes. Los ingresantes del segundo cuatrimestre, siempre son menos en comparación a los ingresantes del primer cuatrimestre.

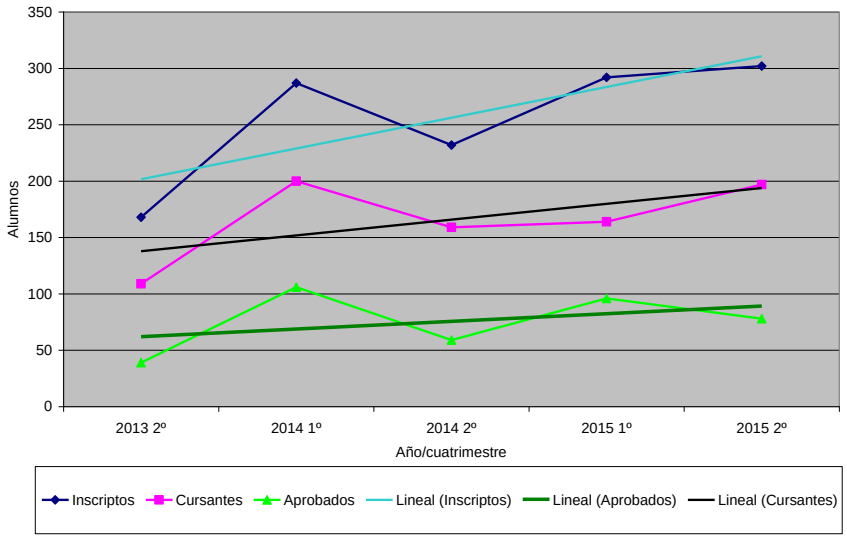


Figura N° 1: Evolución de la cantidad de Inscriptos a Matemática I

ISBN: 978-987-1676-63-7

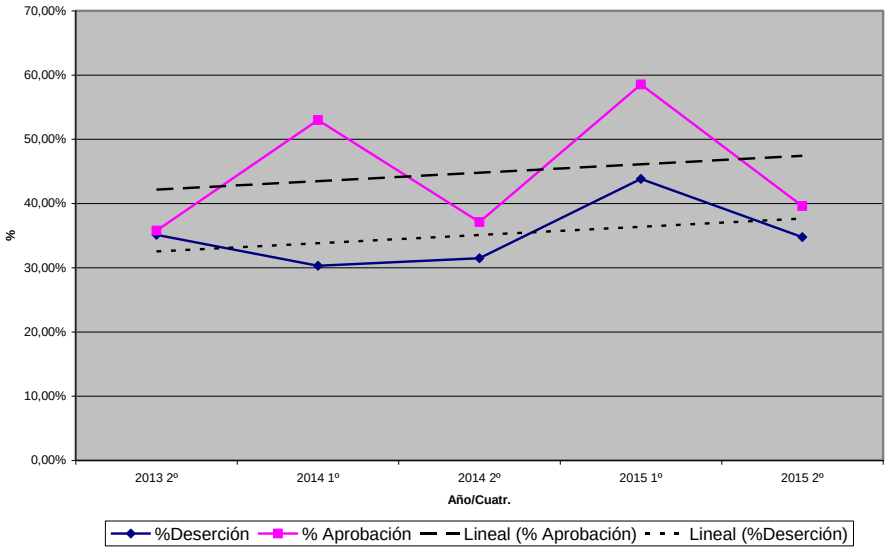


Figura N° 2: Aprobación Vs. Deserción

Aunque podemos observar directamente de la Figura N°2 la tendencia positiva de ambas curvas, podemos destacar que la positividad de la tendencia de aprobación es mayor que la de deserción. Ahora bien, pasamos a ver los datos discriminados de la comisión semipresencial, la cual estamos analizando y comparando con la presencial.

Tabla N° 2: *Comisión SEMIPRESENCIAL*

Año/Cuatr	Inscriptos	Cursantes	Aprobados	% Deserción	% Aprobación
2° 2013	35	23	10	34,29%	43,48%
1° 2014	43	28	8	34,88%	28,57%
2° 2014	21	16	8	23,81%	50,00%
1° 2015	49	26	16	46,94%	61,54%
2° 2015	34	25	13	26,47%	52,00%

Tabla N° 3: *Comisión SEMIPRESENCIAL Análisis de las ADES y Entregas calificadas*

CUATRIMESTRE	% APROBADOS/ADES Y EC ENTREGADAS	RECUPERARON EC	OBTUVIERON CRÉDITOS DE EC
2° 2013	80%	2	2
1° 2014	87,50%	0	0
2° 2014	75%	2	0
1° 2015	87,50%	4	2
2° 2015	77%	2	2

ISBN: 978-987-1676-63-7

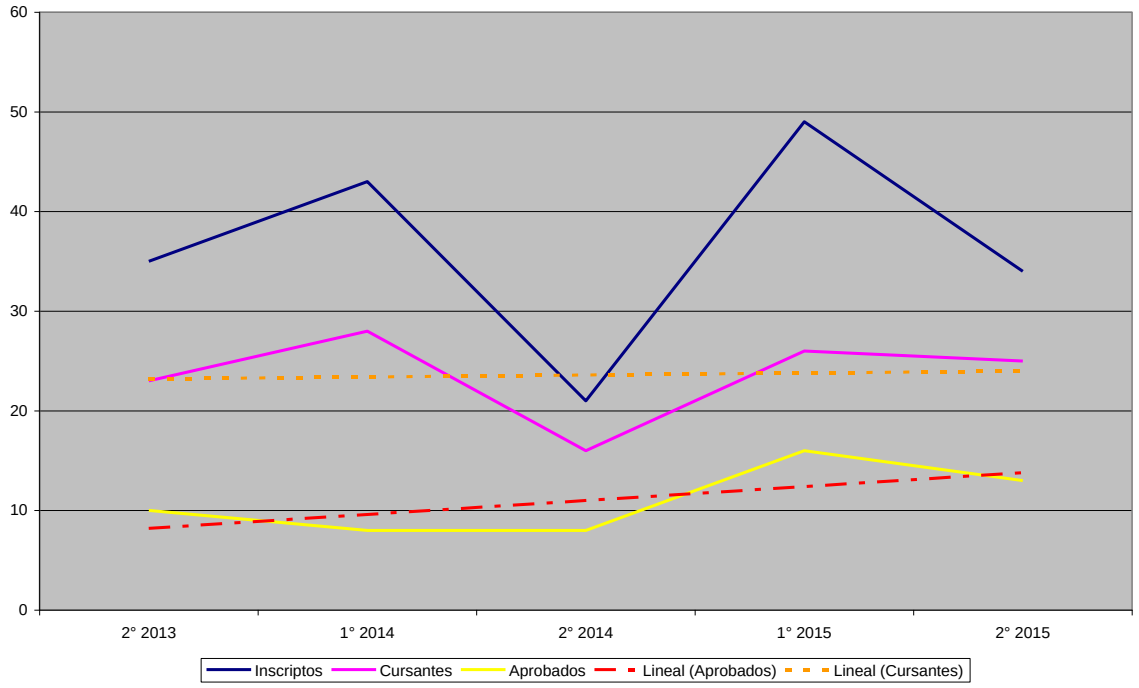


Figura Nº 3: *Cursantes/Aprobación SEMIPRESENCIAL*

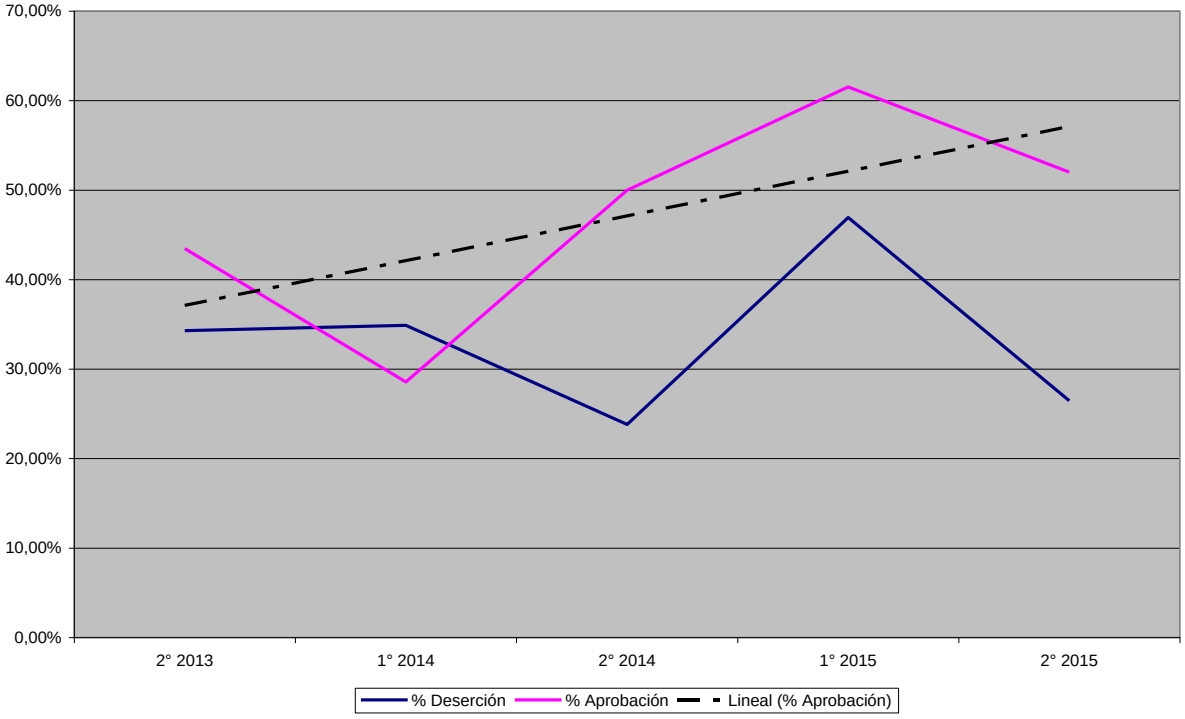


Figura Nº 4: *Aprobación/Deserción SEMIPRESENCIAL*

ISBN: 978-987-1676-63-7

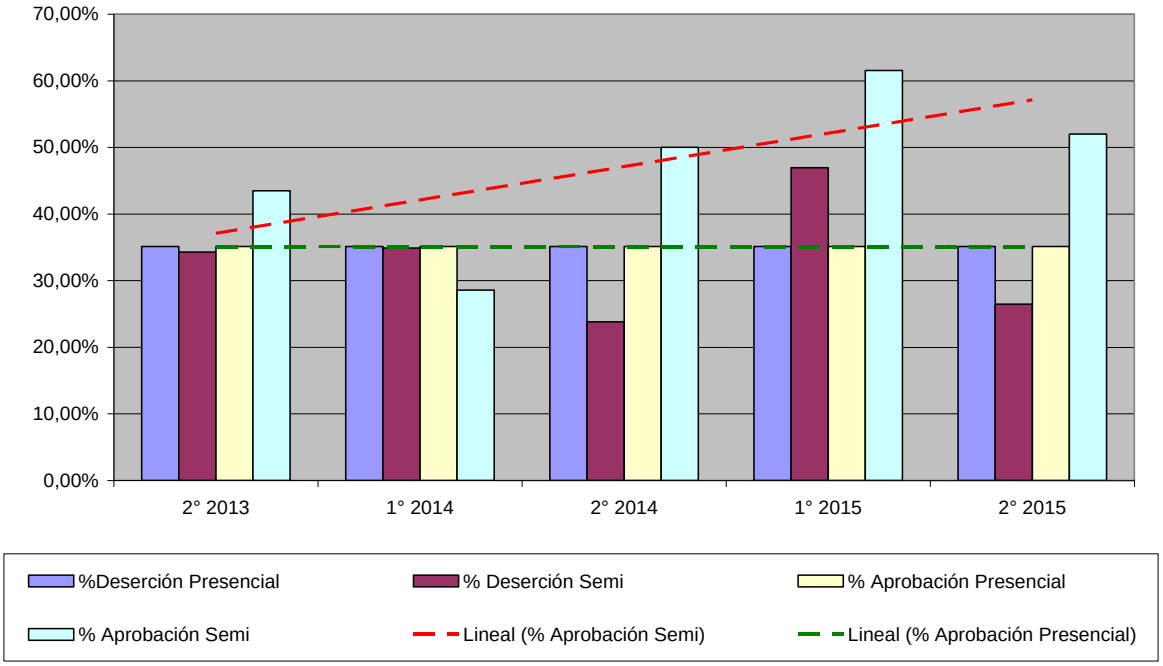


Figura Nº 5: *Análisis Comparativo Presencial/Semipresencial*

Si observamos los datos desglosados de la comisión semipresencial, podemos destacar que la tendencia de inscripción y aprobación en esta modalidad es positiva. Teniendo un punto mínimo de ingreso el 2° cuatrimestre del año 2014, visualizando fácilmente en la figura Nº 5, (que resume los datos de las figuras Nº 3 y 4), la escasa brecha entre inscriptos y cursantes en ese mismo cuatrimestre. Estas figuras son resultados de la trasposición de datos de las tablas Nº 2 y 3.
Visualizando el gráfico de la figura Nº 5, destacamos que las brechas entre inscriptos y cursantes, y la de cursantes vs. Aprobados, se mantienen, aunque hace una disminución casi imperceptible en el 2° cuatrimestre del 2014, y a partir de esa base toma tendencia positiva nuevamente hasta obtener en el 2° cuatrimestre del 2015 una brecha de ausentes de 9 alumnos lo que da un total del 26,5% del total.
La diferencia entre aprobados y cursantes observada tanto en la Tabla Nº 1, como en la gráfica de la Figura Nº 1 y 2 (donde se contempla la totalidad de los alumnos de la materia); denota la cantidad de alumnos que han tenido que recursar la materia es del 48%, debemos tener en cuenta en este punto que estamos hablando del 2° cuatrimestre, lo que indica que el mayor porcentaje de alumnos son recursantes compulsivos.
Para comparar los resultados obtenidos entre las dos modalidades (Figura Nº 5) hay que considerar que la diferencia fundamental es que en la semipresencial el profesor a cargo debe realizar un seguimiento muy cercano de todos los alumnos, por lo tanto, la cantidad de estudiantes debe ser considerablemente menor a la de las comisiones presenciales.
Al inicio de la cursada los alumnos eligen voluntariamente la modalidad pero muchos deciden experimentar la semipresencial y ver si se adaptan a la forma de trabajo, a las exigencias y al compromiso que es imprescindible para que la cursada semipresencial sea exitosa. Por ello el porcentaje de deserción suele ser mayor que en las otras y es hasta necesario que lo sea para nivelar el grupo que debe lograr un ritmo de trabajo parejo. Esto implica también la interrelación e intercomunicación entre los estudiantes y los docentes, se evidencia en el cuadro anterior (figura Nº 4) es que una vez estabilizado el grupo el porcentaje de aprobados es notablemente ascendente y lo destacado es que es muy alto el porcentaje de promocionados entre los estudiantes que aprobaron.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4- CONCLUSIONES

Después del análisis de los datos de los cinco cuatrimestres, del seguimiento que se realizó de la comisión semipresencial de la Cátedra de Matemática I, y de las conclusiones que surgen de las distintas reuniones de cátedra referidas al análisis del proceso, concluimos que los aspectos que observamos mas relevantes en los alumnos que aceptaron el desafío de esta forma de cursada son:

- Utilización intensiva de todos los contenidos de aprendizaje apoyados con mayor base tecnológica.
- Aumento progresivo de la responsabilidad en el trabajo organizado en tiempo y forma y valoración de los resultados de dicho cambio.
- Planificación y organización del aprendizaje en forma autónoma, guiado solo en aspectos globales y estrictamente necesarios
- Relación menos definida del espacio y tiempo educativos.
- Una forma telemática de llevar a cabo la interacción social.

Haciendo un análisis cualitativo de la información, vemos que aquellos alumnos que interpretan correctamente los alcances de la modalidad y la responsabilidad que deben asumir en la elección, tienen resultados favorables. Nos referimos a los alumnos que utilizan con habilidad y habitualidad las herramientas que les propone el Aula Virtual y realizan todos los trabajos propuestos.
Creemos que es muy importante para los futuros ingenieros que desde el comienzo de su formación se los instale en el mundo de las Tecnologías de la Comunicación y de la Información ya que les permitirá entender en qué ámbitos se desempeñarán como futuros profesionales y les brindará una herramienta más para desempeñarse en el mundo del trabajo y para afianzar su vocación.

5- REFERENCIAS

[1] BARBERÁ, E. (2006) "*Los fundamentos teóricos de la tutoría presencial y en línea: una perspectiva socio-constructivista*" en JERÓNIMO, J.A. y AGUILAR, R. E. (2006) Educación en Red y Tutoría en Línea UNAM México 2006

[2] LIBEDINSKY, M. (2007) "*Diseño, Producción y actualización de materiales didácticos para aulas virtuales".* RUEDA nº 6. Mar del Plata, Buenos Aires.

[3] BADIA, ANTONI. "*Ayuda al aprendizaje con tecnología en la educación superior RU&SC. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento*" [en línea] 2006, 3 (octubre) : [fecha de consulta: 26 de abril de 2012] Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=78030208> ISSN

[4] BADIA, A. y BARBERA, E. (2005) "*El uso educativo de las aulas virtuales emergentes en la educación superior*" RU&SC. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento [en línea] 2005. Disponible en: http://www.uoc.edu/rusc/2/2/dt/esp/barbera.pdf

Agradecimientos: A todos los integrantes de IITE de la FI –UNLZ por su inestimable apoyo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE TRABAJOS PRÁCTICOS DE METALOGRAFIA y TRATAMIENTOS TERMICOS- VINCULACION DE LA ASIGNATURA CON EL MEDIO INDUSTRIAL LOCAL

Hugo Martires[1], Ezequiel Avellaneda[2], Leurino Rodrigo César[3]

[1, 2]Laboratorio Metalográfico Químico – Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe
Lavaisse 610, Santa Fe (S 3004 EWB), Argentina
E-mail: lameq@frsf.utn.edu.ar
[3]Laboratorio Industrial Metalúrgico - Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe

RESUMEN

Dadas las altas exigencias de la industria actual es necesario que el alumno vivencie y trabaje sobre problemáticas puntuales y tome contacto con la realidad de los procesos de fabricación de la zona de influencia de la universidad. En base a esto se desarrolla un trabajo práctico con el siguiente objetivo: analizar las estructuras de distintos elementos de máquinas para definir los diferentes tratamientos térmicos a las que fueron sometidos y la transformación de fase para que los alumnos puedan comprender adecuadamente la relación entre el tratamiento térmico y la microestructura correspondiente.

El trabajo práctico mencionado en el párrafo anterior propone tres experiencias para crear criterio en la determinación de motivos de fallas como así también en la correcta selección de materiales para la construcción de elementos de máquinas y productos de la industria metalmecánica.

La primer experiencia consiste en analizar distintos elementos de maquina o productos con fallas en el funcionamiento.

La segunda consiste en determinar la severidad de temple de distintos medios y su relación con la selección del material.

Por último, el tercer ítem está asociado a la selección de materiales alternativos que cumplan las mismas condiciones de trabajo que el material de diseño original.

De todo esto surge como conclusión la necesidad de involucrar más al alumno en el proceso de enseñanza.

Palabras Claves: *selección de aceros, análisis de fallas, severidad de temple.*

REFERENCIAS

[1] ASM Metals Handbook Volume 04 - Heat Treating.

[2] ASM Metals Handbook Volume 09 - Metallography and Microstructures.

[3] ASM Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention.

[4] NormasAISI D2, IRAM IAS 1045, IRAM IAS 8620, IRAM IAS 4140.

[5] Tratamiento Térmico de los aceros- José Apraiz Barreiro

Área Temática: Enseñanza.

1. INTRODUCCIÓN.

En el presente trabajo se expone la planificación y el desarrollo de tres trabajos prácticos de la cátedra Metalografía y Tratamientos Térmicos. La finalidad es que el alumno vivencie la resolución de casos que se le presentaran en la vida profesional en temáticas asociadas a la cátedra. Como eje central tenemos el análisis de distintos tratamientos térmicos y las estructuras metalográficas asociadas así como la influencia de los medios de temple en éstas.

En base a la experiencia tomada en el laboratorio a través de los años de servicios a la industria local se cuenta con el conocimiento del tipo de problemática que tienen los establecimientos respecto de materiales y su comportamiento. La siguiente gráfica lo resume claramente.

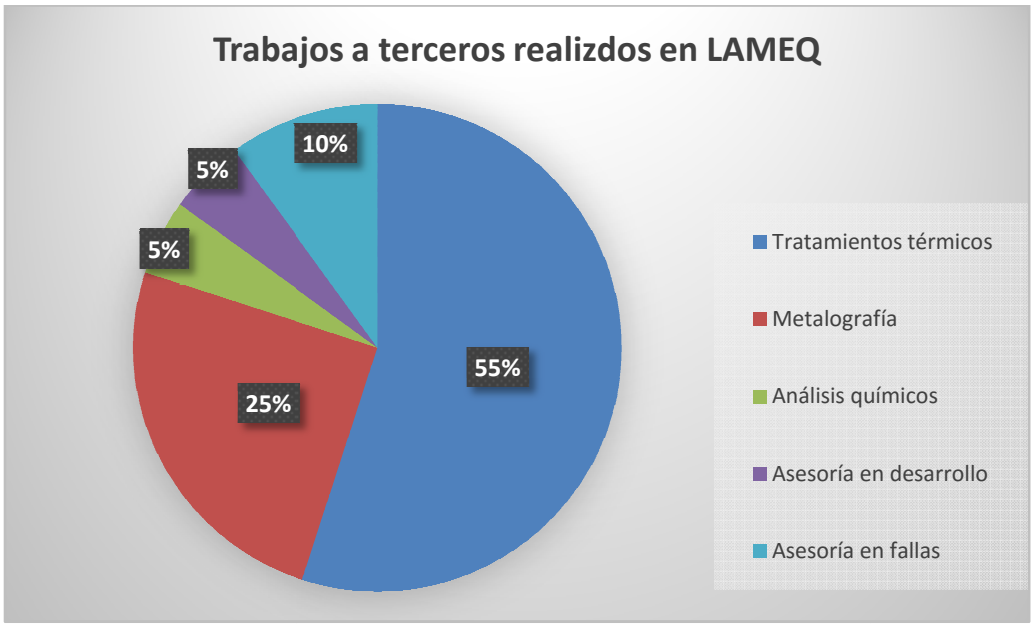


Fig.1. “Tipos de trabajos realizados por el Laboratorio metalográfico Químico”.

Los trabajos prácticos ideados en consecuencia son:

- Análisis de elementos de máquina.
- Severidad de temple
- Materiales alternativos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. OBJETIVOS.

2.1 Objetivo general.

Que el alumno logre adquirir criterio en la determinación de motivos de fallas como así también en la correcta selección de materiales para la construcción de elementos de máquinas y productos de la industria metalmecánica, como así también para el mantenimiento de equipos de cualquier industria.

2.2 Objetivos específicos.

- Analizar las estructuras metalográficas, tanto micro como macroscópicamente, de distintos elementos de máquinas para definir los diferentes tratamientos térmicos a las que fueron sometidos,la transformación de fase o la posible falla que lo afectó.
- Comprender adecuadamente la relación entre el tratamiento térmico o método de fabricación y la microestructura correspondiente.
- Valorar la severidad de temple de un medio de enfriamiento para conocer las limitaciones de fabricación del mismo.
- Definir materiales alternativos para la fabricación de elementos de máquinas consiguiendo las mismas propiedades mecánicas, con el mínimo de operaciones de manufactura y la menor cantidad de material utilizado.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos son procesos que tienen como finalidad mejorar las propiedades y características de los aceros. El método consiste en calentar y mantener las piezas a temperaturas elevadas, durante un tiempo determinado y luego enfriarlas en condiciones convenientes. De esta manera se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y se puede lograr cambios en la composición química del metal.

Los factores principales que debemos fijar primeramente son el tiempo y la temperatura, dependiendo de la composición del acero, forma y tamaño de la pieza y las características que deseamos obtener.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.2 Templabilidad.

3.2.1 *Severidad de temple.*

La severidad del temple es un término a menudo utilizado para indicar la velocidad de enfriamiento; el temple más rápido equivale al temple más severo. De los métodos más comunes de enfriamiento (agua, aceite y aire), el primero es el que produce el temple más severo seguido por el aceite y por último el aire. Otro factor, que influye en la severidad del tratamiento, es la agitación del medio donde se produzca el enfriamiento ya que esto aumenta la velocidad del proceso.

Dependiendo de las características del material a templar y de las propiedades que necesitamos de él, utilizaremos uno u otro método de enfriamiento más o menos severo.

3.2.2 *Diámetro crítico.*

El diámetro crítico ideal es el valor absoluto que sirve para conocer comparativamente la templabilidad correspondiente a un acero de composición y tamaño de grano determinado. Esta información fue dada a conocer por Grossman en 1935.

El diámetro critico ideal de un acero, es el mayor diámetro de ese acero, en cuyo centro se consigue una estructura de 50% martensita luego de ser enfriado desde la temperatura de temple por un medio teórico cuya capacidad de absorción sea infinita.

Para la determinación de este diámetro crítico real existen cuatro métodos. El análisis metalográfico, la medición de dureza, el análisis de la fractura y el ensayo de Jominy.

3.3 Evaluación.

Dado que los trabajos prácticos de “Severidad de temple” y “Selección de materiales alternativos” han sido producidos para ser trabajados en el presente año presentamos una lista de control o lista de cotejo para la evaluación de los criterios definidos para el trabajo práctico “Análisis de elementos de máquinas” que viene desarrollándose desde el año 2010.

ISBN: 978-987-1676-63-7

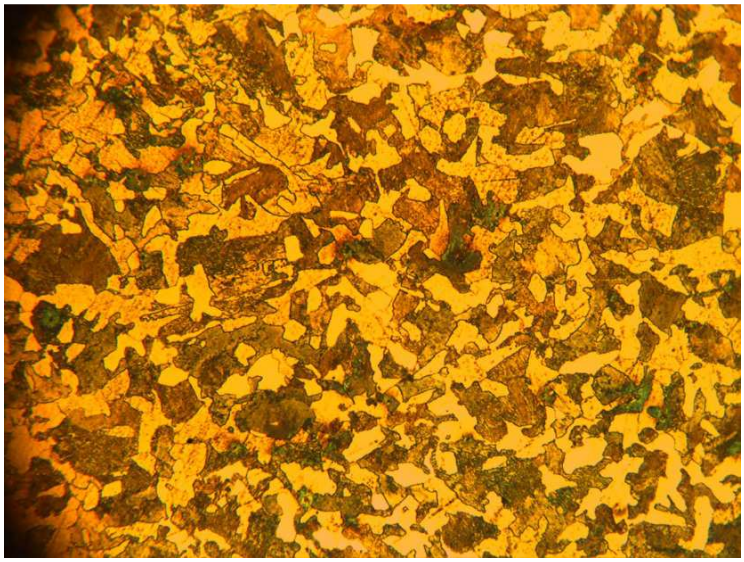


Fig.2. “Imagen metalográfica obtenida en la cátedra”.

Una “Lista de control” o de “cotejo” consiste en un listado de aspectos a evaluar (contenidos, capacidades, habilidades, conductas, etc.), al lado de los cuales se puede calificar (“O” visto bueno, o por ejemplo, una "X" si la conducta no es lograda) un puntaje, una nota o un concepto.

Es entendido básicamente como un instrumento de *verificación*. Es decir, actúa como un mecanismo de revisión durante el proceso de enseñanza-aprendizaje de ciertos indicadores prefijados y la revisión de su logro o de la ausencia del mismo.

Puede evaluar *cualitativa* o *cuantitativamente*, dependiendo del enfoque que se le quiera asignar. O bien, puede evaluar con mayor o menor grado de precisión o de profundidad. También es un instrumento que permite intervenir durante el proceso de enseñanza-aprendizaje, ya que puede graficar estados de avance o tareas pendientes. Por ello, las listas de cotejo poseen un amplio rango de aplicaciones, y pueden ser fácilmente adaptadas a la situación requerida.

La Lista de cotejo elaborada consta de una serie de 7 (siete) parámetros valorados en una escala del 1 al 3 para luego ser ponderados. Mientras mayor sea la puntuación obtenida por el grupo, mayor será el grado de concreción de los objetivos planteados. Cabe aclarar que la intención de esta valoración es analizar la calidad de los trabajos prácticos de la cátedra en cuanto relación con el medio industrial se refiere. Por lo tanto un grupo que obtenga una buena puntuación implica que estará más cerca de las expectativas industriales. Por otro lado, una baja puntuación no quiere decir que no se hayan logrado transmitir los conocimientos, sino que los criterios obtenidos son más teóricos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. "Lista de cotejo para la evaluación para el trabajo práctico Análisis de elementos de máquinas"

Evaluación objetivos: Trabajo Práctico N° 1 "Análisis de un Elemento de Máquina".					
Ítem	Valoración			Ponderación	Resultado
	1	2	3	%	
Inicio del trabajo					
Procedencia	Cátedra	Objeto de la universidad	Alumno	20	
Calidad del ejemplo	Pieza aislada	Pieza con fallas	Pieza en desarrollo	15	
Desarrollo del trabajo					
Gestión del trabajo	A cargo de la cátedra	Gestión mixta	Autogestión	15	
Resultados del trabajo					
Material	Acero al carbono	Acero aleado	Acero especial o Metal no ferroso	10	
Identificación de estructura metalográfica	Estructura de material en bruto	Estructura de material endurecido	Otras estructuras	10	
Tamaño de grano	Grueso	Medio	Fino	10	
Conclusiones					
Análisis de conclusiones	Suficientes	Bien fundamentadas	Muy bien fundamentadas	20	
TOTAL					

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. DESARROLLO DE LOS TRABAJOS PRÁCTICOS.

4.1 Equipamiento utilizado.

- Temperatura de bulbo seco, termohigrómetro digital TESmod. 1360 – Nº970901491. Resolución 0,1 ºC. Certificado de calibración 24276/10 (Laboratorio de calibración LC 008)
- Pulidora metalográfica de paño PRAZISmod. PUL-01.
- Cortadora metalográfica PRAZISmod. COR-01.
- Microscopio trinocular metalográfico INVMET T – Aumentos 100x. 200x, 400x y 1000x.
- Cámara Web para microscopio MOTICmod. MOTICAM 10 MP – Res. 3664 x 2748 pixeles.
- Decodificador de imágenes, software MOTIC IMAGES PLUS 2.0 ML.
- Horno eléctrico de tratamientos térmicos con control de temperatura automático DALVO.
- Durómetro Rockwell Superficial Cific – Modelo: HR2 –Certificado de calibración7926 – Laboratorio de calibración NRZ. (Bloque Patrón de dureza NRZ - escala HR15N – Número 03758/07 – Certificado de calibración 3136)
- Durómetro Rockwell Cific – Modelo: HR1 –Certificado de calibración S-43088 – Laboratorio de calibración LC 003.

4.2 Trabajo práctico: “Análisis de elementos de máquinas”.

4.2.1 *Objetivos.*

Evaluar todas las características mecánicas posibles con las herramientas de la metalografía, medición de dureza y otros controles macrográficos.

4.2.2 *Procedimiento.*

Se entregarán a los alumnos los siguientes elementos de máquinas, uno para cada equipo de trabajo: piñón ASA de paso 3/4" Z: 17, eje de salida de motor-reductor, rodamiento de rodillos, eje estriado o una pieza proveída por los alumnos.

Con los elementos de máquinas anteriores, los alumnos deberán realizar las siguientes tareas: medición de dureza en las partes críticas, análisis de la estructura metalográfica, medir espesores de capas cementadas, definir posibles materiales, tratamientos térmicos a los que fueron sometidos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con todo lo anterior, obtener las conclusiones correspondientes relacionadas con los resultados del análisis y mediciones.

4.3 Trabajo práctico: "Severidad de temple".

4.3.1 *Objetivos*

Que el alumno logre determinar la severidad de temple de la cuba de aceite perteneciente al LAMEQ (Laboratorio metalográfico químico).

4.3.2 *Procedimiento.*

Como primer paso, los alumnos tomarán una probeta de acero SAE 1045, a través de corte metalográfico.Seguidamente, determinarán el diámetro crítico ideal para el material estudiado. Esto se realizará mediante una ecuación empírica, a partir de los componentes químicos (valores de x1… xi) del acero a templar.

$$\text{SUMA} = x1 + x2 + x3 + x4 + \ldots + xi$$

Tabla 2. "Fragmento de tabla para determinación del diámetro crítico ideal".

D) Conversión de la suma de las características en Di			
Suma	Di (pulg)	Suma	Di (pulg)
0,740	0,55	1,550	3,55
0,778	0,60	1,556	3,60
0,813	0,65	1,562	3,65

A continuación se templarán las probetas.Se determinará luego el diámetro crítico real para el acero seleccionado y las condiciones de temple planteadas. Para esta tarea, se utilizarán dos métodos diferentes. Por un lado, se analizará la estructura metalográfica, buscando distinguir la zona en que la martensita supera el 50%. Y por otro lado, se medirán durezas de forma radial. Esta dureza es directamente proporcional al porcentaje de martensita. Se cotejarán ambos métodos para definir un solo diámetro crítico.

Comparando ambos diámetros críticos (Ideal y real) en la curva de relación adecuadaobtendremos la severidad de temple del medio utilizado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4.4 Trabajo práctico: "Selección de materiales alternativos".

4.4.1 *Objetivos*

Que el alumno identifique materiales alternativos al diseño original de un elemento de máquina buscando reducir al mínimo los costos de fabricación y mejorando sus características mecánicas.

4.4.2 *Procedimiento.*

Cada alumno optará entre las siguientes alternativas de trabajos a analizar.

- Varilla de destornillador de mano. Material original: 73 MoV. Dureza requerida: 85 HR15T.Resistencia mecánica: Alta.Tratamiento superficial:Endurecimiento. Terminación superficial: Estéticamente importante. Precisión dimensional: Alta. Tenacidad: Muy buena.
- Pinza universal de mano. Material original: AISI 9254. Dureza requerida: 85 HR15N.Resistencia mecánica: Alta. Tratamiento superficial: Endurecimiento Terminación superficial: Estéticamente importante. Precisión dimensional: media. Tenacidad: No importante.
- Eje de picadora de carne industrial. Material original: AISI 420 Dureza requerida: 35 – 40 HRC Resistencia mecánica: 830 MPa Tratamiento superficial: Endurecimiento Terminación superficial: De mecanizado Precisión dimensional: No importante Tenacidad: Muy buena.
- Cuchilla de extractora de jugo cítrico. Material original: AISI 420 Dureza requerida: 50 HRC Resistencia mecánica: No influyente Tratamiento superficial: Ninguno Terminación superficial: No importante, excepto filo Precisión dimensional: Alta Tenacidad: Muy buena.

Luego de elegida la pieza a analizar el alumno desarrollará todo el procedimiento de obtención de la misma con distintas alternativas de materiales y elegirá la que crea más conveniente.

5. RESULTADOS OBTENIDOS.

De la evaluación de todos los períodos en que el trabajo práctico fue desarrollado surgen los siguientes resultados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

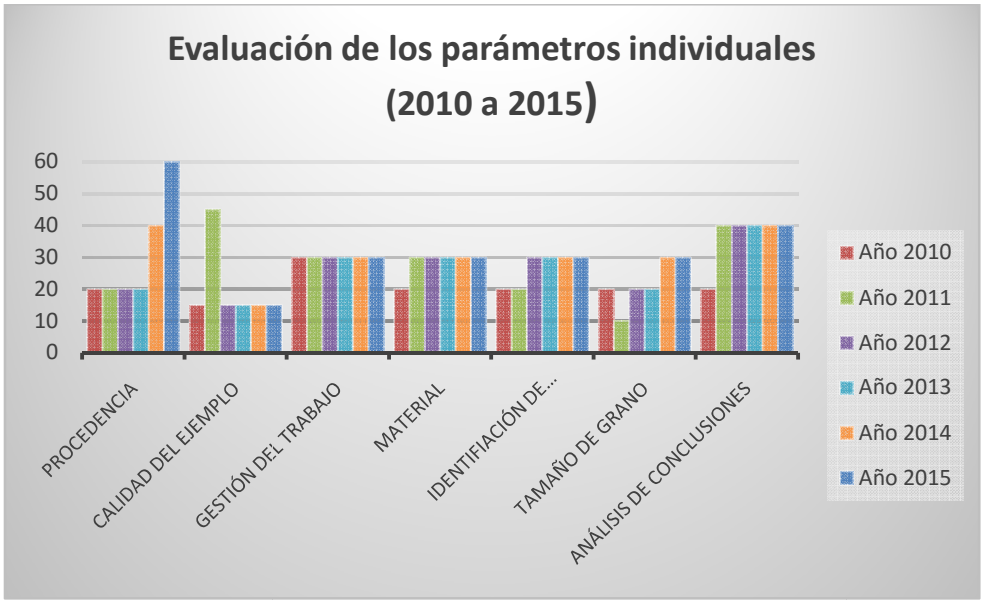


Fig.3. "Gráfico de distribución de puntajes de los parámetros individuales a través de los años"

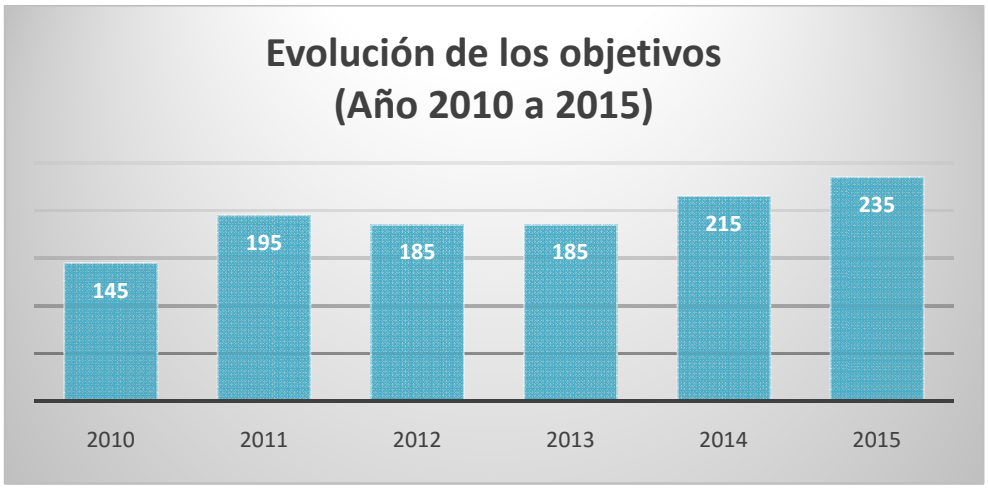


Fig.4. "Evolución a través de los años"

En la Figura 3 se observa la variación de cada uno de los parámetros evaluados en la lista de cotejo de la Tabla 1, en el período de tiempo transcurrido entre los años 2010 y 2015. De esta manera podemos observar cómo influyen individualmente sobre los objetivos.

Mientras que en la Figura 4 se observa la variación del total del puntaje obtenido en la misma tabla (Tabla 1) durante el mismo período de manera de facilitar la interpretación de los resultados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. CONCLUSIONES.

En relación a los resultados obtenidos se concluye que:

Los criterios que se buscan desarrollar en los alumnos se han ido acrecentando a lo largo de los años de trabajo, como puede observarse en la Figura 4 con total claridad.

Lo anterior surge como consecuencia principalmente de que la procedencia de las muestras utilizadas en los trabajos prácticos surgió de los alumnos.

Con esto se consiguieron muestras de materiales menos tradicionales, con estructuras metalográficas más complejas de identificar y tamaños de grano más pequeño. Todo esto implica una necesidad de perfeccionar la técnica metalográfica.

Al mismo tiempo las Conclusiones de los alumnos han mostrado una tendencia a mejorar los fundamentos sobre los que se producen.

Las conclusiones descriptas en los tres párrafos anteriores pueden observarse en la Figura 3.

Se observa entonces la necesidad de involucrar más al alumno en el proceso de enseñanza, dado que esto muestra una relación directa con los criterios desarrollados en ellos, motivándolos a encontrar problemas reales de la industria incentivando el hábito de la investigación y una conducta proactiva.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] ASM Metals Handbook Volume 04 - Heat Treating.

[2] ASM Metals Handbook Volume 09 - Metallography and Microstructures.

[3]ASM Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention.

[4]NormasAISI D2, IRAM IAS 1045, IRAM IAS 8620, IRAM IAS 4140.

[5] Tratamiento Térmico de los aceros- José Apraiz Barreiro

[6]Evaluación de programas educativos. Catalina Martínez Mediano. UNED. 1996. Madrid

[7]Evaluación basada en el centro. Un diálogo para la mejora educativa. David Nevo. Ediciones Mensajero. 1997. Bilbao

[8]Herramientas de autoevaluación del Profesorado. Peter Airasián y Arlen Gullickson. Ediciones Mensajero.1998. Bilbao

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANÁLISIS DE PROBLEMAS Y APLICACIONES DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN UN ENTORNO DE SIMULACIÓN Y MODELADO DE PRÓXIMA GENERACIÓN

Sara E. De Federico[1], **Mariela Avogradini**[1]

[1] Departamento Materias Básicas – Cátedra Fundamentos de Informática
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Rosario
E. Zeballos 1341, Rosario, Argentina
correo-e: sdefederico@frro.utn.edu.ar.

RESUMEN

La presentación adecuada de problemas, aplicaciones de física y temas específicos de la Ingeniería Mecánica es un paso fundamental para que el alumno comprenda el fundamento matemático del mismo y detecte parámetros y propiedades existentes para que ésta represente fielmente a la situación real. Los textos más importantes para la enseñanza en Ingeniería Mecánica hacen hincapié en la ilustración artística de los problemas para una mejor comprensión de los problemas [1]. Sin embargo, la modelización conlleva un trabajo arduo, aún en casos teóricos, y puede llegar a ser muy compleja en escenarios reales [2]. La modelización computacional es un medio veloz para la representación, y su aprendizaje es más firme con el conocimiento de los modelos matemáticos que lo sustentan, por ejemplo con el uso de un software de cálculo simbólico [3]. El entorno de modelado y simulación de próxima generación provee estas características descriptas; brinda accesibilidad, conectividad con otras marcas, presentación dinámica, fiabilidad e integración visual con los modelos matemáticos que definen el problema. En este trabajo se muestran las experiencias y pruebas de modelización con paquetes integrados de *Wolfram Research*. La conexión directa entre las herramientas permite la construcción de elementos a través del *Mathematica*, y luego utilizarlos como componentes para simulaciones de alto nivel, con manipulación de propiedades y parámetros. Asimismo, un modelo armado en el entorno de simulación con componentes pertenecientes al repositorio disponible, puede exportarse para observar y analizar su comportamiento a través del modelo matemático. Las tareas de modelización son realizadas en la cátedra de Fundamentos de Informática, respondiendo a la inquietud de alumnos de acceder a modelos con estas características innovadoras. Los resultados formarán parte del material de una biblioteca de medios de aprendizaje de la carrera Ingeniería Mecánica, disponible online en la página de la asignatura.

Palabras Claves: *modelización, simulación, mecánica, próxima generación.*

1. INTRODUCCIÓN

En la carrera de Ingeniería las materias básicas forman la estructura fundamental sobre las que se construye el conocimiento que se va adquiriendo a lo largo de los años. Casa una de las asignaturas troncales del plan de estudio está articulada verticalmente con alguna de estas materias. A su vez las materias básicas representan manifestaciones del mismo suceso, visiones del mismo mundo, formas de explicar el mismo universo. El alumno de ingeniería no debe olvidar nunca esta relación entre ellas y de ellas con la materia que está aprendiendo actualmente.

A lo largo de los años, la extensión de los programas y la complejidad de los temas obligan a revisar permanentemente los conceptos básicos que los fundamentan, por lo que el estudiante recurre nuevamente al material de estudio de base. Muchas veces, esta tarea conlleva mucho tiempo de búsqueda y de repaso. El uso de software de cálculo simbólico para el apoyo al aprendizaje de la matemática y la Física matemática colabora la revisión, por su portabilidad y acceso directo, y por la posibilidad de agregado permanente de nuevas prácticas y pruebas de las ejercitaciones. Si además este software provee un producto que permita la modelización y simulación de procesos y sistemas, la combinación es ideal para el aprendizaje de temas complejos que poseen una gran base matemática y física.

En este trabajo se muestran el estudio y las pruebas realizadas con el paquete de software *SystemModeler* de *Wolfram Research*, y su interesante característica de vinculación con *Mathematica*, conjunto que proporciona un entorno de trabajo múltiple y coordinado, dinámico y de amplias posibilidades de trabajo. La línea motora de investigación es la de brindar a los alumnos de ingeniería nuevos e innovadores instrumentos de aprendizaje, que posean alto nivel de contenido y performance actual y adecuada a los entornos virtuales que están acostumbrados a utilizar. Los temas abordados fueron sugeridos en forma espontánea y son solo una muestra de la capacidad infinita que poseen estas herramientas informáticas.

Las secciones están ordenadas según el hilo conductor de la experiencia: la existencia de inquietudes sobre problemas, la búsqueda de una forma diferente de enseñanza, el estudio que demandó su uso, y los resultados y las conclusiones de la experiencia.

2. APRENDIZAJE DE TEMAS COMPLEJOS DE INGENIERÍA

El abordaje de temas complejos de ingeniería genera la búsqueda permanente de material de estudio, siendo siempre la representación gráfica y la simulación las más preferidas por los alumnos. En Ingeniería Mecánica, la posibilidad de observar un modelo que imite a la realidad es

ISBN: 978-987-1676-63-7

importante para su exacta comprensión, y la simulación del modelo permite interactuar y ver el comportamiento de todas las variables y parámetros involucrados. En las consultas, los alumnos comunican la necesidad de contar con modelos para el aprendizaje de algunos problemas, como por ejemplo de mecánica de fluidos, flujos de calor, etc., para poder interactuar y comprender la dinámica y comportamiento de las variables. Las pruebas en entornos reales presentan gran dificultad para su realización, sea por razones de costos, seguridad, espacio, tiempo, y demás variables que no pueden administrarse ni resolverse académicamente. Además, los alumnos de la carrera ingeniería tienen una inserción en el mercado de trabajo bastante temprana, aun estando en los primeros años de cursado. Esto hace que el alumno deba tener cierto grado de capacitación en lectura e interpretación de modelos. Si bien el entorno simulado nunca puede reemplazar a la prueba de campo real, es importante proveer a los alumnos de herramientas para completar los vacíos generados, como por ejemplo la lejanía o imposibilidad de observar instalaciones industriales.

3. USO DE HERRAMIENTAS DE PRÓXIMA GENERACIÓN PARA EL APRENDIZAJE

El software de cálculo simbólico es un referente en la enseñanza de la ingeniería. Se han presentado infinidad de trabajos mostrando la capacidad de análisis que proveen, la facilidad de visualización, el poder de cálculo y de aproximaciones, el apoyo inestimable a la enseñanza de la matemática y la física.

A su vez el software de modelado y simulación permite la interacción y el dinamismo virtual de los modelos, la posibilidad de trabajo y cantidad de pruebas que serían imposibles de realizar en contextos reales, tanto por su costo como por el tiempo de preparación que demandarían, la posibilidad de plantear casos hipotéticos, teóricos, impracticables o inmedibles en un contexto real. Los paquetes más famosos de modelado presentan entornos sofisticados, gran cantidad de información en pantalla, posibilidad de traslado a otro tipo de formatos, etc.

El *SystemModeler* [4] reúne las características antes mencionadas, con el agregado de la visualización de los modelos absolutamente similares a la realidad, la posibilidad de observar los componentes con sus subestructuras, y de cada uno de ellos ver los fundamentos matemáticos subyacentes a través de la vinculación con el *Mathematica*. Asimismo, cuando el nivel de complejidad de los modelos hace imposible la construcción del modelo matemático, impidiendo la visualización y graficación analítica, esta dupla provee los medios para la visualización y el análisis de las variables involucradas, al mismo tiempo que el núcleo matemático valida y corre el modelo utilizando cálculo numérico de altísima precisión.

4. MODELO DE MÚLTIPLES TUBERÍAS Y FUENTES

En este ejemplo, se ha construido un sistema de tuberías en los que se traslada un fluido proveniente de un conjunto de fuentes con un sistema de flujo constante, a su vez este flujo es particionado y calentado para ciertas secciones de tuberías, para finalmente ser reenviado al flujo central y volcado en un reservorio. Para el manejo de los alumnos, se ha modelado una versión resumida de este sistema, que solo cuenta con tres fuentes de flujo, y dos sistemas de calor, uno constante y otro incremental con cota superior. Para ello se ha utilizado directamente el entorno del *SystemModeler*. En la Figura 1 se observa el modelo del sistema de tuberías realizado.

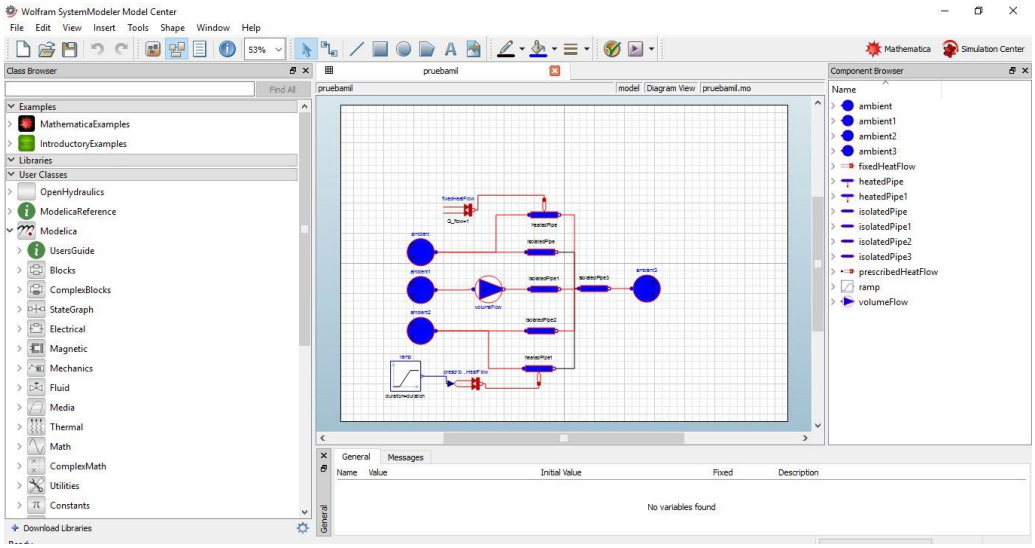


Figura 1: Modelo de múltiples tuberías y fuentes

Los componentes se arrastran desde el explorador de objetos y son vinculados por conectores. Se debe tener muy en cuenta que cada componente solo acepta conexiones con otros componentes compatibles. Cada componente tiene una definición de variables de estado y parámetros que lo delimitan. Esta definición se puede observar en el panel inferior de la pantalla de trabajo. También se puede trabajar programando en C++ directamente toda la estructura de un componente. C++ es un lenguaje orientado a objetos, por lo que cada componente es una *Clase* con sus atributos y funciones definidas. Muchos componentes son heredados de librerías pertenecientes al software *Modelica* [5]. En la Figura 1 se puede observar a la derecha el árbol de objetos, cada componente se abre mostrando sus atributos y parámetros.

Cuando se desea usar un componente es conveniente analizar su estructura mirando su documentación asociada, esto se puede hacer haciendo click con el botón derecho del mouse. En la Figura 2 se puede ver la documentación del flujo de volumen, componente que provoca el movimiento a presión constante del fluido hacia la tubería central.

ISBN: 978-987-1676-63-7

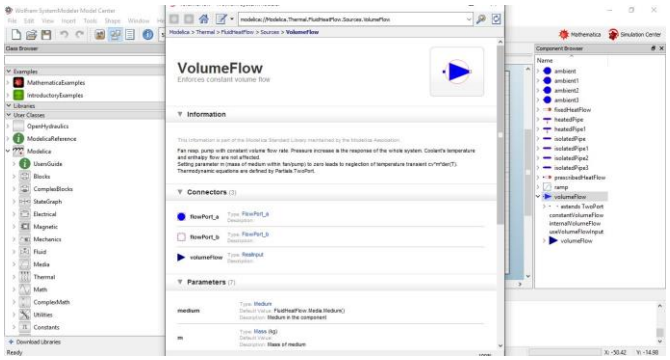


Figura 2: Definición del componente VolumeFlow

El modelo debe estar validado para su funcionamiento correcto. La validación se hace con el ícono *Check* en la parte superior de la pantalla. En la validación, núcleo del *SystemModeler*, controla la exactitud y la posibilidad de resolución de los sistemas de ecuaciones involucrados en cada una de las conexiones. Cada sistema de ecuaciones es validado y resuelto, las variables son seteadas y se efectúa un control de consistencias de parámetros y compatibilidad de medios. La Figura 3 muestra la validación del modelo presentado. Solo luego de logrado este paso el modelo se puede simular desde el *Simulation Center* haciendo click en el botón *Play*.

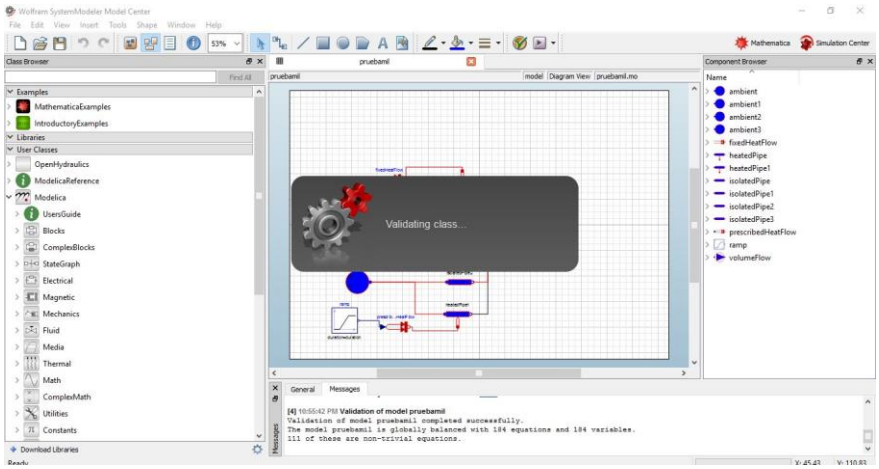


Figura 3: Validación del modelo

Simulation Center presenta una interface de altísima calidad, con características muy atractivas. En él se pueden graficar y manipular todas las variables involucradas en el modelo. Las mismas se pueden buscar en el explorador de objetos a la izquierda de la pantalla. Se pueden realizar gráficos de todas las variables involucradas, y se pueden guardar como imagen. En la Figura 4 se observa una corrida de simulación del modelo. En ella se observa las gráficas de temperatura final del reservorio según el calor generado por la fuente incremental, con un incremento de duración *2s y 15 s.*

ISBN: 978-987-1676-63-7

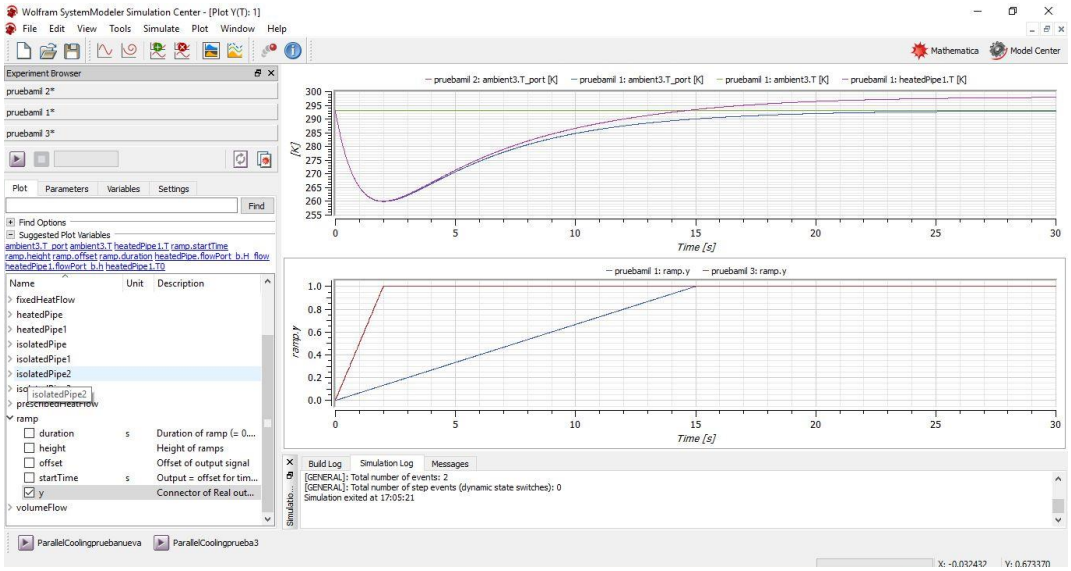


Figura 4: Simulación del modelo

En la misma pantalla se pueden agregar más Plots y en cada uno se pueden agregar tantas variables como se desee. El experimento de simulación se puede replicar, grabar y trabajar en tiempo real, cada una de las simulaciones se va apilando a la izquierda y pueden guardarse por separado.

5. VÍNCULO ENTRE SIMULACIÓN SUS MODELOS MATEMÁTICOS

Lo más importante de todo, y que hace que el *SystemModeler* sea considerado un software de *próxima generación,* es su vínculo directo y bidireccional con el *Mathematica*, que muestra la estructura matemática inherente del modelo, y la manipulación del modelo aun si este no es analítico. Además permite la construcción de componentes desde su estructura matemática desde el *Mathematica* y exportable al *SystemModeler*

Si el modelo ha sido validado y corrido exitosamente, se puede importar desde el *Mathematica*. Una vez importado, se puede analizar su estructura matemática, sus variables, su estado inicial, sus sistemas de ecuaciones involucrados. Las Figura 5 muestra el archivo completo con la simulación del modelo antes descripto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

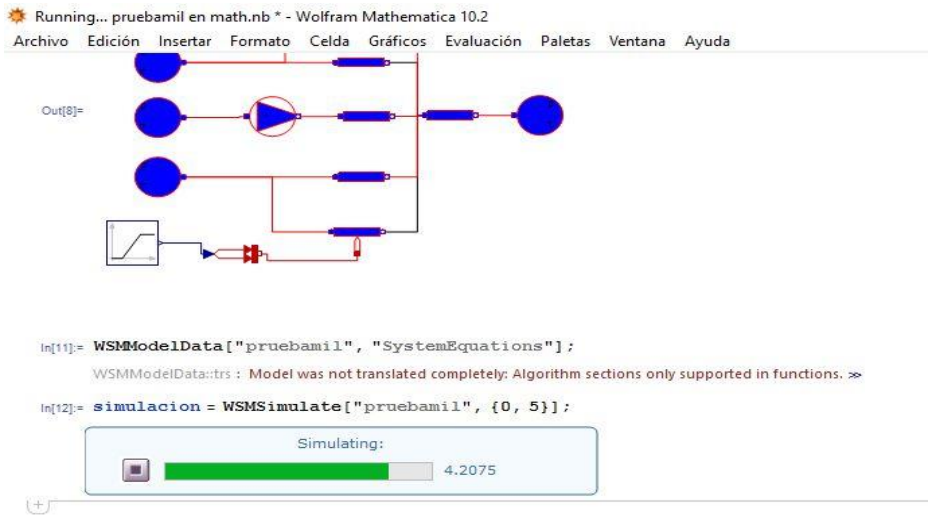


Figura 5: Modelo corriendo en Mathematica

Una vez importado, existen comandos para su análisis completo, por lo que se pueden simular situaciones hipotéticas con los comandos del *Mathematica*. La Figura 6 muestra una parte de la estructura del modelo, muestra la declaración de parámetros y la inicialización de las ecuaciones involucradas, y a la derecha se muestra una tabla sumaria de propiedades matemáticas involucradas. El modelo se describe con 115 ecuaciones, 108 variables algebraicas, 227 parámetros que definen el sistema.

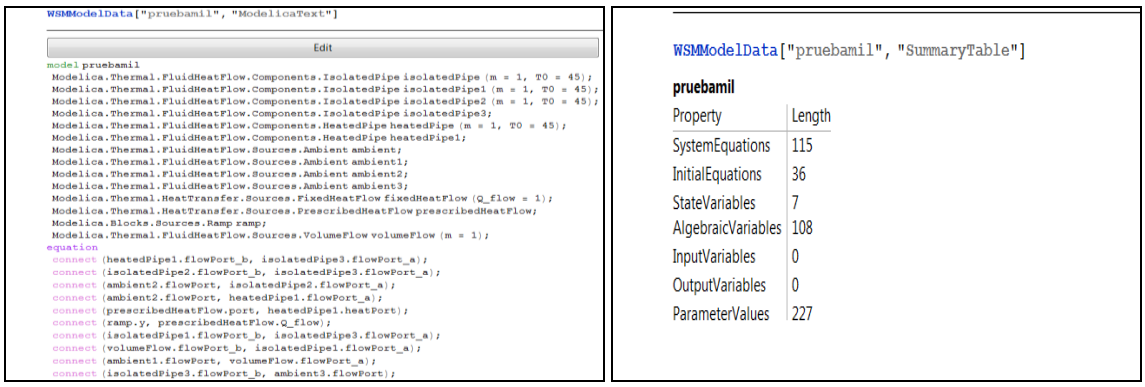


Figura 6: Descripción del Modelo en Mathematica

Con el modelo ingresado se pueden hacer múltiples simulaciones, en un único comando, de variables seleccionadas según el criterio que se desee corroborar. La Figura 7 muestra una corrida de 6 simulaciones del modelo completo con distintos valores de duración de la rampa de calor. Se puede observar la corrida simultánea y la gráfica de la variación de temperatura en la tubería caliente afectada.

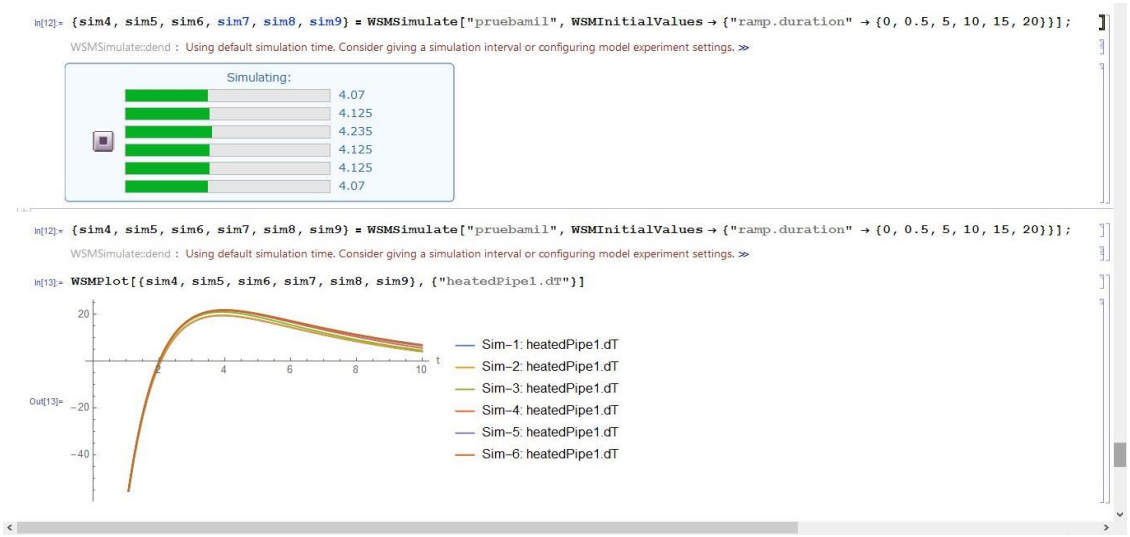


Figura 7: Temperatura de Heat Pipes para distintos valores de rampa

Cabe aclarar que la simulación que se observa en la Figura 7 es la aproximación numérica de la solución analítica posible del modelo. Se puede confirmar el nivel de calidad y precisión del *Simulation Center*, ya que los cambios ligeros en las variables no pueden observarse claramente en el *Mathematica* pero si en el *Simulation Center*, tal como se puede apreciar en las gráficas de la Figura 8 en donde se realizó la misma gráfica, y ésta es más clara y definida. Sin embargo, la manipulación de las propiedades del Plot es más trabajosa, por ejemplo con el Zoom, propiedad que en *Mathematica* se aplica directamente desde la línea de comando [6].

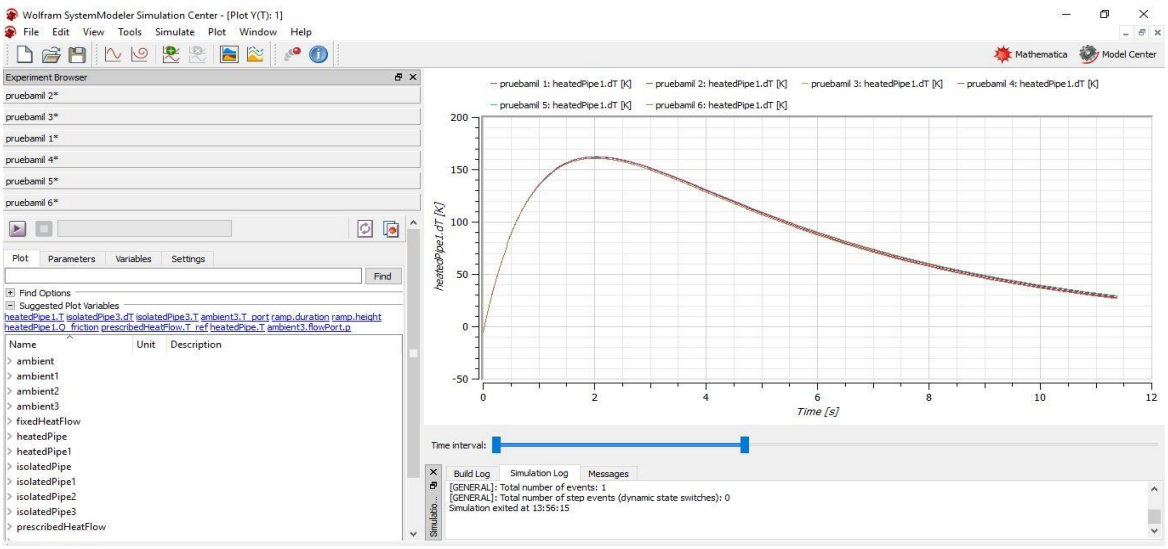


Figura 8: Variación de Temperatura de Heat Pipes para diferentes rampas

A pesar de no poseer la precisión en visualización del *Simulation Center*, la obtención del modelo matemático o su aproximación numérica permite el análisis de las variables involucradas y la

práctica de posibles escenarios para el modelo a través de los comandos. Si se conoce la operatoria del programa, se puede probar infinidad de combinaciones de variables en cuestión de segundos, y se pueden construir visores y representaciones más elaboradas y creativas. De esta forma se pueden observar comportamientos hipotéticos más rápidamente, sin tocar al modelo original, o agrupando variables en forma más sencilla, tal como se observa en la Figura 9 en donde se muestran las temperaturas de todas las tuberías invocadas en una sola línea de comando.



Figura 9: Temperaturas de las tuberías del modelo.

6. CARACTERISTICAS DEL SOFTWARE

Como se comentado más arriba, *SystemModeler* hereda las librerías del software *Modelica*, éstas son un conjunto vastísimo de componentes para la creación de modelos mecánicos, eléctricos, térmicos, etc. Cada componente creado posee una codificación que define sus parámetros, sus entradas, salidas, posibles conectores y otras características. Esta codificación está programada en C++, por lo que requiere un compilador, siendo el recomendado el de *Visual Studio 2013.*

La conexión entre componentes se hace a través de *conectores*. La definición de conector se genera a nivel programación, y ésta está sustentada en el modelo matemático. Un conector de entrada tiene definida la variable de entrada que acepta y su tipo, igualmente lo tiene un conector de salida. Para que dos componentes puedan conectarse, deben ser *compatibles,* es decir que ambos componentes deben compartir algún conector en común. Esta aclaración que parece ser muy obvia obliga a la persona que está modelando a analizar exhaustivamente cada una de las secciones, componentes, variables y parámetros que va a utilizar.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La clasificación inicial del *Modelica* da una idea intuitiva de las compatibilidades, dividiendo la biblioteca en Electrical, Mechanic, Thermal, etc. Por ello es útil comenzar situando la situación problemática dentro de esta calificación previa. Otra forma eficaz es estudiar la estructura de cada componente antes de empezar a hacer el modelo, esto se puede hacer desde el *Help SystemModeler* en el sitio de Wolfram [7]. Utilizando el poder del vínculo con *Mathematica*, se puede analizar el componente desde este software en donde se pueden observar las ecuaciones involucradas.

7. RESULTADOS OBTENIDOS Y CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas en el software *SystemModeler* han mostrado el gran nivel de precisión y capacidad que posee para la simulación de modelos complejos de ingeniería. Los componentes están construidos para una representación fiel de los procesos reales, y su estructura posee todos los parámetros para su análisis físico y químico sin dificultades. Sin embargo el armado de los modelos supone un nivel de conocimientos en programación que dificulta la tarea de construcción de ejemplos para la enseñanza. Como está vinculado con *Mathematica*, su propuesta es altamente atrayente, pero sus interfaces no son intuitivas. Además no todas las librerías del *Modelica* están validadas en *SystemModeler*, por lo que el modelado puede llegar a necesitar una construcción inicial de los componentes.

Aun así, las características y resultados que brinda hacen que *SystemModeler* sea un paquete de software muy interesante para su investigación y estudio, y la construcción de modelos provee a los alumnos una fuente de múltiples escenarios de observación de comportamientos, por lo que son de gran utilidad para la capacitación y el aprendizaje. Esto hace que el desafío de la construcción de ejemplos sea recompensado con un objeto de aprendizaje de alto nivel.

7. REFERENCIAS

[1] Hibbeler R. C. Ingeniería Mecánica. Dinámica, Prentice Hall, Pearson Educación, 12da Edición, México 2010.

[2] Ferziger J. H., Perić M. Computational Method for Fluid Dynamics. Springer, 3rd Edition, Germany, 2002.

[3] Tinnirello A., De Federico S., Szekieta P. *Design and simulation of Complex Surfaces by new Teaching Methodologies* INTED 2014 Proceedings of 8th International Technology, Education and Development Conference, Vol 1, pp. 2803.2813, 2014.

[4] http://www.wolfram.com/system-modeler/?source=nav

[5]http://www.maplesoft.com/documentation_center/online_manuals

[6] https://reference.wolfram.com/language/

[7] http://www.wolfram.com/system-modeler/examples/

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANÁLISIS DE UNA EXPERIENCIA INNOVADORA EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA UTILIZANDO WEBQUEST

Anriquez Claudia B. [1], **Figueroa Saritha** [2] **y Godoy Carlos E.** [3]

[1] y [3]Departamento de Fisica y Quimica – Facutad de Ciencias Exactas y Tecnologia -Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina
correo-e: canriquez@unse.edu.ar [1] godoycar@unse.edu.ar [3]
[2] Departamento de Informática – Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías -Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina
sarithaf@unse.edu.ar

RESUMEN

Las disciplinas, tales como Matemática o Física requieren, por su carácter abstracto, de un esfuerzo especial por parte del profesor para lograr la atención y la motivación de los estudiantes de los cursos universitarios básicos.
En este trabajo se presenta una experiencia innovadora en la enseñanza de la Física realizada durante los años 2013 y 2015 en las carreras de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías (FCEyT) de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. Se implementó la WebQuest como metodología para la enseñanza de la asignatura, se trata de una actividad de investigación orientada a que los estudiantes obtengan toda o la mayor parte de la información que van a utilizar de los recursos existentes en Internet [1].
El objetivo de la experiencia fue promover estrategias pedagógicas para mejorar las condiciones de enseñanza y de aprendizaje en el área de la Física de las carreras de Ingeniería de la FCEyT, aplicando recursos provistos por las TIC.
El tema seleccionado para implementar la WebQuest fue “Fluidos reales”, dada su relevancia en la formación del ingeniero. Los estudiantes realizaron una investigación sobre el tema en base a la descripción de la tarea central y elaboraron un mapa conceptual como producción personal, para lo cual clasificaron, organizaron, analizaron y sintetizaron la información [2].
Para la evaluación de los resultados se consideró tanto la producción de los estudiantes como el proceso que desarrollaron. Además se compararon las producciones previas a la experiencia.
La propuesta implementada permitió que el estudiante pueda seguir su propio ritmo de aprendizaje en la construcción del conocimiento.
Se plantea la factibilidad de generalizar la aplicación de la experiencia a otras situaciones, elaborar un modelo de implementación que considere los factores institucionales, los actores educativos, los procesos y recursos didácticos.

Palabras clave: análisis de experiencia, Webquest, TIC, enseñanza de la física

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo pretende reflexionar sobre el potencial de la tecnología educativa para promover el aprendizaje significativo y mostrar algunos resultados sobre la aplicación de las TIC a la enseñanza de la Física.

En este sentido, se presta especial atención a los obstáculos específicos asociados al aprendizaje de las ciencias, tales como las ideas previas de los estudiantes, el uso de modelos y abstracciones, la complejidad asociada a la experimentación científica o la carencia de contextos significativos.

Halpern (1998, 2003, 2006), afirma, que las habilidades inherentes al pensamiento crítico pueden ser mejoradas por el proceso de enseñar, de aquí surge la necesidad de establecer el impacto de una renovación metodológica en el pensamiento crítico y en el desarrollo de habilidades cognitivas tales como discriminar información, elaborar y valorar argumentos, juzgar correctamente eventos probabilísticos, analizar relaciones causales, disponer de buenas estrategias de toma de decisiones, poseer recursos para resolver ciertos problemas, para lo cual se deben crear entornos de aprendizaje para transferir estas habilidades a un contexto real del diario vivir, fuera de las situaciones del aula de clase.

El debate y la discusión han sido ampliamente reconocidos como estrategias pedagógicas para promover la reflexión y el cambio conceptual. En este sentido, el trabajo colaborativo ofrece oportunidades valiosas para promover la construcción social del conocimiento a través de la comunicación y el intercambio de ideas entre los miembros del grupo. Muchos autores sostienen que los individuos construyen significado mediante el uso del lenguaje y la interacción con otros y, por ello, el trabajo colaborativo ofrece un contexto ideal para ejercer la reflexión, la revisión de ideas y el establecimiento de relaciones conceptuales, esto es, el aprendizaje significativo, donde la participación del docente como mediador es sumamente importante.

En este trabajo se pretende analizar los resultados en cuanto a pensamiento crítico, mediante trabajo colaborativo al aplicar Webquest en temas específicos de la Física de Ingeniería del ciclo básico de la FCEyT, comparados con otra forma clásica de desarrollar el tema, pero que se observaba no daba buenos resultados en cuanto a aprendizaje.

2. SITUACIÓN PREVIA

Las carreras de la FCEyT, específicamente las ingenierías abordan los mismos contenidos de Física. En la Cátedra se tomó como actividad de aprendizaje la presentación de una monografía sobre determinados temas (ondas sonoras) que no son desarrollados durante la clase teórica por

razones de tiempo de cursada, ya que no hacen a lo medular de los contenidos, y que son tratados de ésta manera. La presentación de la monografía se distorsionó y convirtió en una tarea de "cortar y pegar", y más que monografía propiamente dicha se convirtió en una recopilación bibliográfica, por lo que el contenido no era aprendido significativamente. Pero dicha presentación, al ser un requisito de regularidad, debía ser presentada por los alumnos y el docente sólo acusaba el recibido.

Con la implementación de Webquest, se intentó dar un mejor tratamiento al tema, cambiando la estrategia de enseñanza para mejorar el aprendizaje. El grupo seleccionado para implementar esta innovación fue el de ingeniería, el cual cursaba un plan de estudio nuevo.

Al tener éxito con la primera implementación, posteriormente se seleccionó un nuevo tema que también merecía un tratamiento en profundidad, el de "fluidos reales", que habitualmente se trataba de una forma bastante escueta y fragmentando, con la apertura de la carrera Ingeniería industrial, era importante que se lo enseñara de manera más relevante y significativa.

Se comenzó entonces con un grupo menor de alumnos de la carrera Ingeniería Electrónica que cursaban en un cuatrimestre diferente, pero siendo exactamente los mismos contenidos. Posteriormente se replica la experiencia en la carrera Ingeniería Industrial.

3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

Se diseña la Webquest, y se solicita a los estudiantes que formen grupos de no más de tres integrantes.

La consigna inicial consistía en elaborar un mapa conceptual siguiendo la guía de la Webquest, diseñar una presentación utilizando Prezi y enviarla por correo electrónico a la docente de la asignatura.

Una vez presentado el trabajo del estudiante, el docente realizaba una revisión del mismo, procurando evaluar la coherencia e integración de los contenidos del trabajo, y si esto no se alcanzaba, entonces era devuelto con los comentarios o sugerencias para superar los obstáculos que presentaba, esta realimentación es uno de los pilares de la estrategia de trabajo implementada.

Finalmente se realizaba una puesta común de los trabajos y comentarios sobre las debilidades y fortalezas de cada uno (evaluación), además de las debilidades y fortalezas de su aprendizaje (metaevaluación, es decir entender por qué no entienden o si entienden, más allá del contenido). La metaevaluación no se logra mediante Webquest, sino con preguntas realizadas sólo por el profesor en la instancia de puesta en común, de esta manera el estudiante puede poner en

perspectiva su aprendizaje, y mirar su modo de aprender, y que le falta en este entrenamiento. De manera que no se trata de responder correcto o incorrecto sino de revisar también el camino que cada alumno realiza hasta alcanzar una determinada respuesta.

Tanto para la Webquest, como para el uso de prezi se contaron, en ésta primera fase, con el apoyo de una docente especialista en el tema, con la cual se realizaron reuniones previas con docentes de Física y alumnos, para interiorizar sobre el uso de éstas herramientas (Webquest y prezi).

3.1 SOBRE LA WEBQUEST

Una WebQuest es según su autor Bernie Dodge, una "actividad orientada hacia la indagación/investigación en la que parte o toda la información con la cual interactúan los aprendices proviene de fuentes de Internet" [1].

Están especialmente diseñadas para que el alumno desarrolle habilidades esenciales para utilizar apropiadamente la información que encuentra, es decir, para clasificarla, organizarla, analizarla y sintetizarla correctamente, con el objeto de generar con ella un producto nuevo. La Webquest contiene los siguientes ítems de trabajo: introducción, tareas, proceso y evaluación.

La introducción (Figura 1), permitió al docente poner en contexto al alumno y ubicarlo en cuanto a los límites de la temática en sí misma, pero a través de cuestiones motivadoras que son las porciones de la realidad que se intentan comprender (por ejemplo la” voz” de un perro es un “guau” y la voz de un gato es un” miau”, en que se diferencian?). El sonido de un bombo, un piano, un violín, en que se diferencian?

En las tareas (Figura 2) se plasman las guías que orientan al estudiante para dar respuesta a las preguntas que se plantean en la introducción. En la búsqueda de estas respuestas pueden apelar a páginas web, que el docente puede proponer o cualquier herramienta multimedia que se encuentre en internet y que consideren apropiada.

En el proceso se solicita al alumno que elabore las respuestas como mapa conceptual integral usando prezi e incorporando al mismo cualquier tipo de herramienta multimedia (gráficos, videos, audios, etc), además de las ecuaciones y expresiones matemáticas explicativas de los fenómenos.

En la evaluación se tiene en cuenta la integración de los contenidos, analizando el mapa conceptual, como la validez del modelo físico-matemático En este proceso se analiza la organización de los contenidos, si está fragmentada o incoherente, se devuelve para rehacer, recomendando al alumno los ajustes pertinentes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

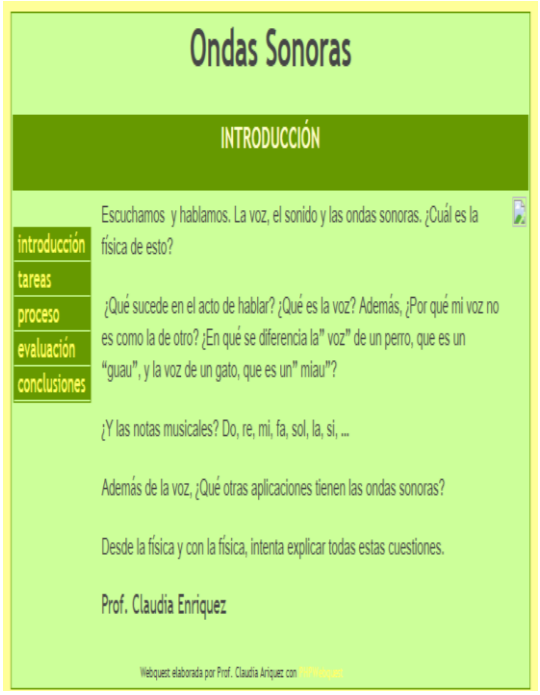


Figura 1: Introducción de la Webquest

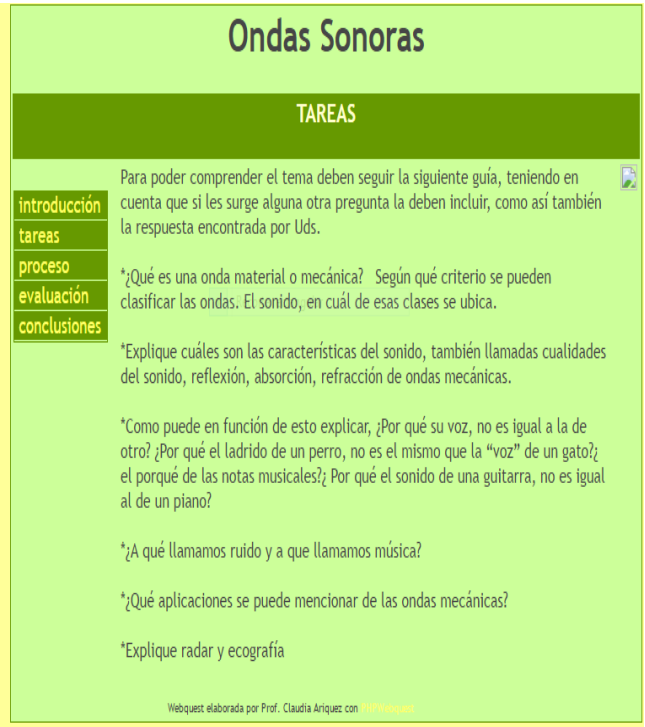


Figura 2: Tareas de la Webquest

Algunas direcciones de trabajo de alumnos:

- http://prezi.com/jsudir4roz3n/?utm_campaign=share&utm_medium=copy
- http://prezi.com/knm_wgzvqbgx/?utm_campaign=share&utm_medium=copy
- http://prezi.com/bnfjbfv7y2ct/sonido/#

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Los estudiantes presentaron los trabajos en prezi, individuales o grupales, todos ellos se encuentran en el sitio web de prezi y son públicos (algunos se muestran en anexo tablas y gráficas).
- También incorporaron videos relacionados con el tema sugerido, y hasta se puso un fragmento de una serie de tv del género comedia que se relacionaba perfectamente con el tema, trataba específicamente del efecto dopler.
- Los contenidos tratados con prezi, respondían a las tareas solicitadas y aún más, en algunos casos partes del trabajo estaban inconexas un tema con otro, esto se evidenciaba de la lectura del mapa conceptual, en otros ampliaban más y en otros casos no aparecían ciertos tópicos. Al ser presentaciones muy personalizadas, ninguna era igual y la temática se trataba de distintas maneras y poniendo de manifiesto la creatividad de cada uno.
- Se pensó en un primer momento que el uso del prezi obstaculizaría el desarrollo de la enseñanza, por ese motivo se destinó una clase para explicar sus alcances, pero en el uso de ésta herramienta no hubo obstáculo. Las expectativas en éste sentido fueron colmadas. Los alumnos hicieron no una recopilación bibliográfica, sino que seleccionaron del vasto escenario de internet (videos, gráficas, expresiones matemáticas, audios etc), y organizaron estos contenidos para tratar la temática de una manera pertinente.
- Este trabajo de búsqueda multimedial, pero siguiendo la guía de la Webquest, fue mucho más de lo que el alumno podría haber obtenido, sólo presentando la recolección bibliográfica impresa, que era habitual que se les solicitara, y muchos manifestaron sorpresa al haber visto tal o cual video, que les ampliaba la comprensión del tema. En esta selección de la ayuda multimedia, el alumno debía tener un criterio, que era justamente de pertinencia a los conceptos, por lo que se pusieron de manifiesto dos cosas: el aprendizaje significativo, en donde ahora lo que mira el alumno es lo que está buscando y por otro lado

el pensamiento crítico que es el criterio que ahora tiene a la luz de ese aprendizaje, que lo hace decidir, por cual ejemplo colocar en su presentación.

- El trabajo en sí mismo más consiente.
  Se le exigía al alumno además, presentar en el mapa conceptual las ecuaciones o expresiones matemáticas que explican algunos de los fenómenos, y es aquí donde algunos de los alumnos omitieron escribir las ecuaciones, y otros no. En éste punto al hacer la puesta común se reflexiona sobre las variables involucradas en dicha expresión y de la validez de las mismas.

- Los trabajos de los alumnos estaban organizados de diferente manera, los contenidos diferían y la creatividad en los recursos multimediales, también.

- La evaluación significaba entrar en la lógica de organización de cada prezi y hacer las sugerencias de corrección para cada uno, intentando que dicha lógica no atente con el contenido físico disciplinar.

- La retroalimentación, en ésta instancia es fundamental, ya que ésta es otra característica distintiva del proceso que en la presentación anterior no se hacía. Sin embargo la crítica a esto sería que el docente requiere más tiempo para realizar esta revisión que en grupos pequeños como en éste caso (25 alumnos) es factible, y en grupos más numerosos implicaría mayor el tiempo, a pesar que las presentaciones eran grupales como en este caso.

6. CONCLUSIONES

La experiencia de la Webquest retroalimentada funciona como una poderosa herramienta de enseñanza y de aprendizaje. Debido a que requiere tiempo para la revisión y la puesta en común, se la debe implementar con una adecuada planificación.

La producción de los alumnos es de calidad y demuestra mayor conciencia, ya que lo que hacen es significativo para ellos, ésta significatividad se evidencia a través del mapa conceptual organizando los contenidos de una manera integrada y personal.

La experiencia se evalúa en términos de la producción de los alumnos, en cuanto a la adquisición de contenidos actitudinales, procedimentales y conceptuales comparándola con la experiencia anterior a la innovación se puede decir:

- La monografía que presentaban los alumnos, se realizaba en un clima impersonal ya que, el alumno se limitaba sólo a entregar su trabajo o depositarlo en la oficina del profesor.
- La innovación permitió un trato mas personalizado entre alumno y profesor y entre alumnos.
- Despertó la motivación de alumnos, fomentó el trabajo colaborativo, ya que en la puesta común se ejercita la tolerancia a la exposición del otro, como así también la exposición argumentativa.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- El profesor pudo detectar problemas de aprendizaje, debido al trabajo interactivo, ya que la retroalimentación entre alumno y profesor pone de manifiesto los obstáculos en el aprendizaje.

.

Agradecimiento : agradecemos el valioso asesoramiento a la Prof. Paola Zapella

7. REFERENCIAS

[1] Dodge, B. (1995). WebQuests: a technique for Internet-based learning. Distance educator.

[2] Flores-García,S J. E. Chávez-Pierce, J. Luna-González, M. D. González-Quezada, M. V. González-Demoss y A. A. Hernández-Palacios - El aprendizaje de la física y las matemáticas en contexto-Culcyt// Educación

[3] Halpern, D.F. Teaching critical thinking for transfer across domains. American Psychologist, 53, 449-455 (1998).

[3] Halpern, D.F. Thought and knowledge: An introduction to critical thinking (4th ed). Hillsdale, NJ: Erlbaum. (2003).

[4] Halpern, D. Critical Thinking Assessment Using Everyday Situations: Background and scoring standards (2º Report). Unpublished manuscript. College. (2006).

[5] Retana, José Ángel García- La problemática de la enseñanza y el aprendizaje del cálculo para ingeniería- Revista Educación 37(1), 29-42, ISSN: 03797082, enero-junio, 2013

[6] Rivera, P. P. Y. (2014). Las Webquest como recurso didáctico en la Educación Superior en Experiencias de Innovación Docente Universitaria. España: Ediciones Universidad de Salamanca.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

APLICACIONES VISUALES PARA ANÁLISIS NUMÉRICO

Marta G. Caligaris, Georgina B. Rodríguez y Lorena F. Laugero

Grupo Ingeniería & Educación
Facultad Regional San Nicolás – Universidad Tecnológica Nacional
Colón 332, (2900) San Nicolás, Argentina
e-mail: gie@frsn.utn.edu.ar

RESUMEN

Algunos programas computacionales de matemática ofrecen la posibilidad de diseñar interfaces gráficas personalizadas que permiten generar aplicaciones visuales. Con estas herramientas, el usuario sólo debe cargar datos y obtener resultados, sin tener que ver líneas y líneas de código, muchas veces difícil de comprender. Una de las grandes ventajas de las ventanas personalizadas, es que el alumno puede enfocar su atención en el objeto de estudio, y no en el código/lenguaje utilizado. Discutir el código podrá ser el siguiente paso a seguir.

Aprovechando estas posibilidades, el Grupo Ingeniería & Educación (GIE) de la Facultad Regional San Nicolás (FRSN) viene desarrollando, desde el año 2008, una serie de ventanas de diseño propio relacionadas con todos los temas de Análisis Numérico que se tratan en distintas cátedras en la FRSN. Estas herramientas permiten discutir cuestiones conceptuales de los temas en estudio y mostrar a los alumnos la importancia de la aplicación de los métodos numéricos en problemas propios de la especialidad.

En un principio, estas ventanas fueron elaboradas con el software simbólico Maple pero ante el inconveniente de que éste es un software pago, se decidió utilizar el software libre Scilab, disponible en www.scilab.org.

Teniendo en cuenta la posibilidad que desde hace algunos años ofrece MATHEMATICA® de elaborar archivos CDF (Computable Document Format), se comenzó a realizar herramientas con este formato. Si bien este software no es gratuito, las aplicaciones almacenadas en formato CDF pueden abrirse y ejecutarse desde un visor, el CDF Player, accesible en Internet en forma gratuita.

El objetivo de este trabajo es presentar algunas de las nuevas herramientas diseñadas como CDF para el ciclo lectivo 2016, en particular para la cátedra Cálculo Avanzado, que incorpora temas de Análisis Numérico en la especialidad Ingeniería Mecánica.

Palabras Claves: *Herramientas visuales, Cálculo Avanzado, Análisis Numérico.*

1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza tradicional de los métodos numéricos se caracteriza por desarrollar, en primer lugar, los conceptos teóricos que se hallan involucrados en el tema y, luego, en resolver ejercicios sencillos con lápiz y papel. Sin embargo, para que los alumnos vean la verdadera importancia y aplicación de los métodos estudiados, es necesario implementarlos en un programa. De esta manera, no sólo podrán realizar más iteraciones con el fin de alcanzar buenas aproximaciones, sino también resolver problemas de gran porte.

Los estudiantes no siempre manejan técnicas de programación, y no hay tiempo suficiente para discutirlas en clase. Por lo tanto, se decidió desarrollar algunas herramientas visuales de manera que los alumnos puedan enfocar su atención en el objeto de estudio, y no en el código o el lenguaje utilizado. Así, se diseñaron ventanas hechas a medida para las cátedras de Análisis Numérico.

En un principio, estas herramientas fueron elaboradas con el software simbólico MAPLE [1-2] pero ante el inconveniente de que éste es un software pago, se decidió utilizar el programa libre SCILAB. De esta manera, todos los recursos fueron rediseñados para que los estudiantes pudieran acceder a ellos sin restricciones [3-4]. Además, se realizaron modificaciones que surgieron a partir de la experiencia de su uso para mejorar el impacto que ellos tienen en el proceso de aprendizaje.

Tanto MAPLE como SCILAB permiten desarrollar herramientas aisladas entre sí. Es decir, para poder acceder a estas herramientas es necesario descargarlas y ejecutarlas desde la propia computadora. Para que los estudiantes pudieran disponer de las mismas para su uso, estas aplicaciones se vincularon desde los sitios web que se desarrollaron para los diferentes temas que se enseñan en los cursos de Análisis Numérico de la FRSN [5].

MATHEMATICA permite generar recursos que pueden utilizarse embebidos en una página web. Así, se comenzó a diseñar este tipo de archivos [6], que luego fueron reunidos en un único sitio: el Laboratorio Virtual de Análisis Numérico. En este laboratorio se presentan herramientas, propias o no, que implementan los distintos métodos estudiados en la asignatura, y algunas aplicaciones a problemas específicos de Ingeniería.

El objetivo de este trabajo es presentar algunas de las nuevas herramientas diseñadas con MATHEMATICA para el ciclo lectivo 2016, en particular para la cátedra Cálculo Avanzado, que incorpora temas de Análisis Numérico en la especialidad Ingeniería Mecánica.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. LABORATORIO VIRTUAL DE ANÁLISIS NUMÉRICO

Teniendo en cuenta la posibilidad que desde hace algunos años ofrece MATHEMATICA de elaborar archivos CDF (Computable Document Format) y embeberlos en un sitio web, se decidió crear un sitio conteniendo una colección de estos archivos, relacionados con los tópicos que se enseñan en la cátedra de Cálculo Avanzado de la FRSN: el Laboratorio Virtual de Análisis Numérico, accesible desde la URL www.frsn.utn.edu.ar/gie/an/anlab.

El Laboratorio Virtual de Análisis Numérico incluye diferentes herramientas que abarcan los temas tratados en el curso: resolución de ecuaciones no lineales, resolución de sistemas de ecuaciones lineales, interpolación y ajuste de curvas, integración numérica, resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias y resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Algunas herramientas son de diseño propio y otras están disponibles en la Web [7].

La Figura 1 muestra la página de inicio de este laboratorio, que se presenta a los alumnos en el ciclo lectivo 2016.



Figura 1: Página de inicio del Laboratorio Virtual de Análisis Numérico

A modo de ejemplo, en la Figura 2 se puede observar la sección “Ecuaciones diferenciales ordinarias” del laboratorio. En caso de requerir información teórica sobre los métodos numéricos involucrados en este tema, se puede acceder al vínculo sobre problemas de valor inicial y problemas de frontera, que se presenta en la página principal de esta sección.

ISBN: 978-987-1676-63-7

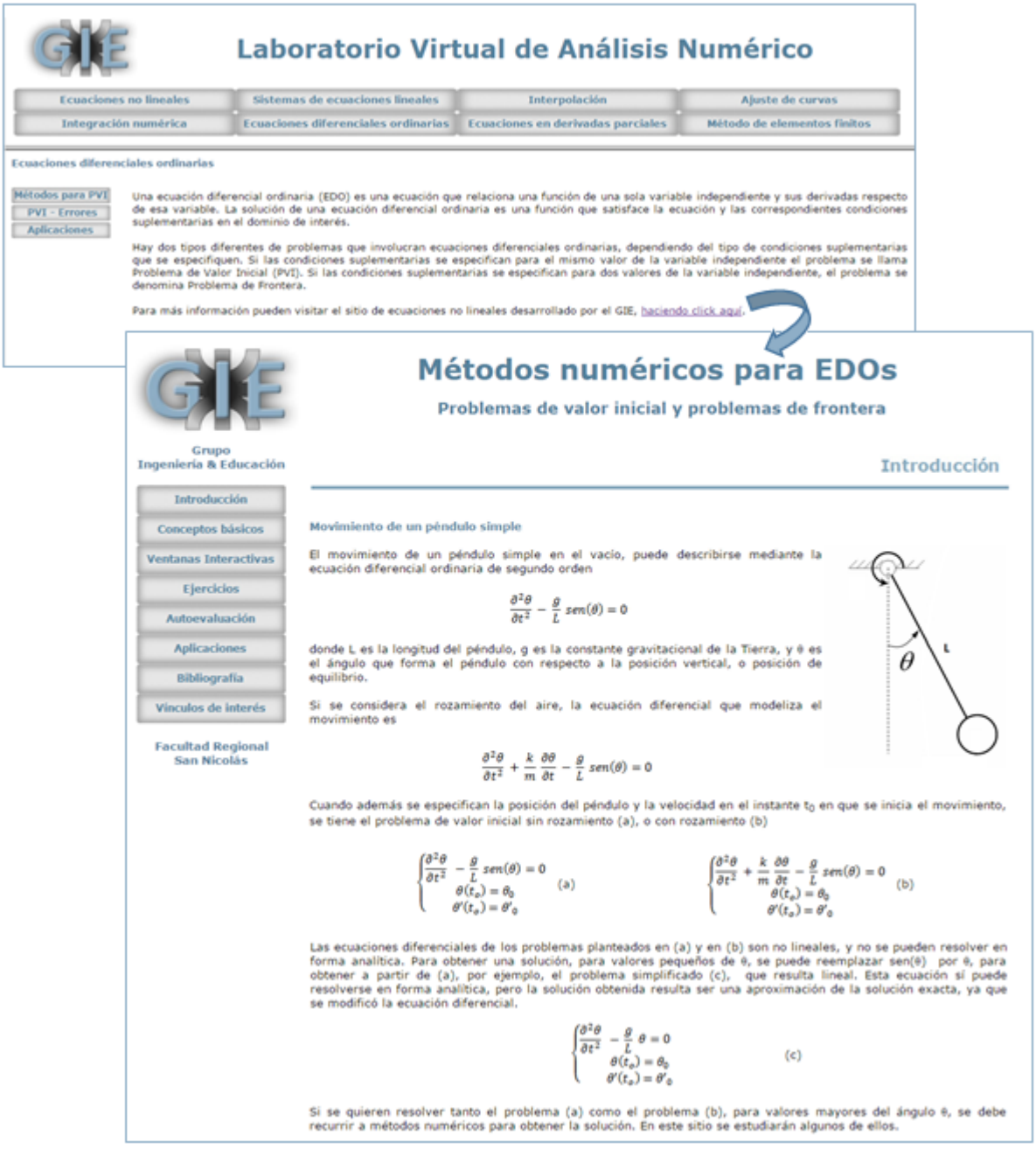


Figura 2: Ecuaciones diferenciales ordinarias, en el Laboratorio de Análisis Numérico

Todos los sitios desarrollados para la asignatura tienen la misma estructura de navegación. Contienen un menú con los siguientes botones: Introducción, Conceptos básicos, Ventanas interactivas, Ejercicios, Autoevaluación, Aplicaciones, Bibliografía y Vínculos de interés.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la sección **Aplicaciones** de cada tema, se presentan distintos problemas básicos de la carrera, donde se muestra la aplicación de los métodos estudiados en función de las potencialidades y limitaciones que presentan, con el objeto de que los alumnos vean cómo se usa la matemática estudiada en la ingeniería.

En el laboratorio, se irán incorporando distintos problemas de Ingeniería que requieren el uso de métodos numéricos para su resolución, dentro de una herramienta que permita visualizar la solución para diferentes juegos de parámetros.

La Figura 3 muestra uno de los problemas de aplicación de la sección “Ecuaciones diferenciales ordinarias”, disponible en el Laboratorio.

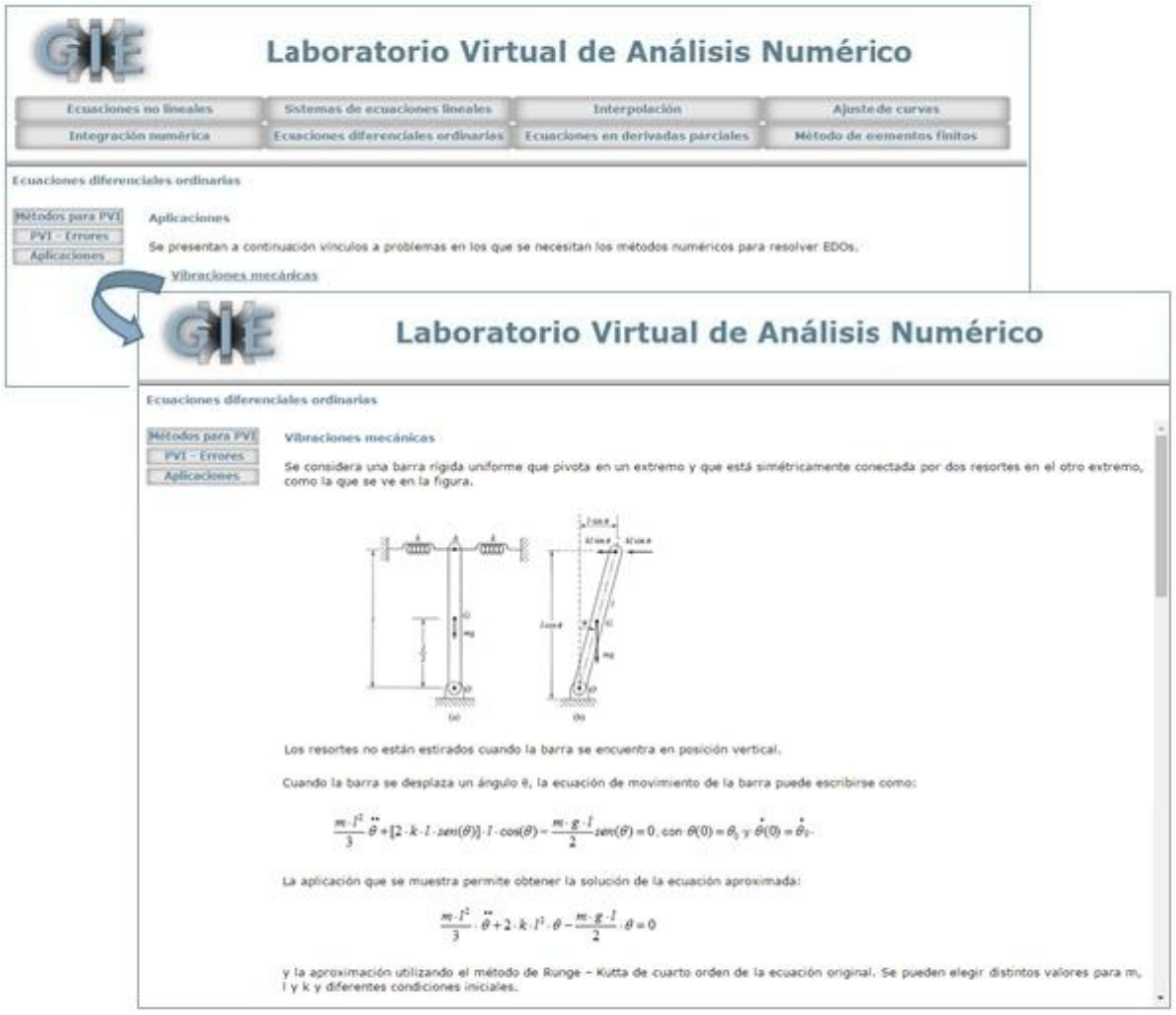


Figura 3: Aplicaciones, en Ecuaciones diferenciales ordinarias

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. HERRAMIENTAS DE DISEÑO PROPIO

Los archivos CDF son objetos de aprendizaje, es decir, recursos digitales que pueden ser utilizados como soporte para el aprendizaje [8].

Si bien MATHEMATICA no es un software gratuito, las aplicaciones almacenadas en formato CDF pueden abrirse y ejecutarse desde un visor, el CDF Player, que puede descargarse gratuitamente del sitio http://www.wolfram.com/cdf/.

La principal característica de estas herramientas es que permiten una interacción dinámica con los usuarios, posibilitando la manipulación de parámetros de sistemas o modelos para analizar el efecto que éstos tienen en el fenómeno observado. Al diseñar y poner en marcha estos recursos debe tenerse presente la función que están cumpliendo en el proceso, porque más allá de que resulten “atractivos”, deben ser considerados como medios, no como fines en sí mismos [9].

3.1. Una herramienta para vibraciones mecánicas

Una de las aplicaciones diseñadas permite estudiar el movimiento de una barra rígida uniforme que pivota en un extremo y que está simétricamente conectada por dos resortes en el otro extremo, como se muestra en la Figura 4.

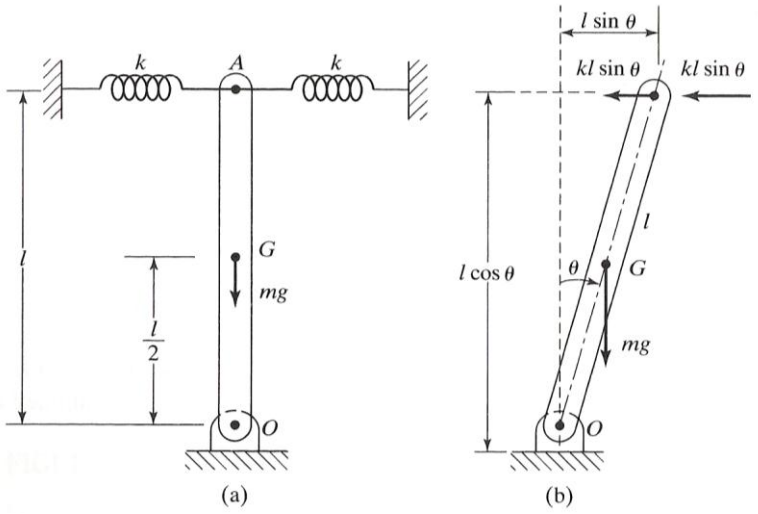


Figura 4: Esquema del problema

El movimiento de la barra se describe con el siguiente problema de valor inicial [10]:

$$\frac{m \cdot l^2}{3} \ddot{\theta} + [2 \cdot k \cdot l \cdot sen(\theta)] \cdot l \cdot \cos(\theta) - \frac{m \cdot g \cdot l}{2} sen(\theta) = 0 \text{, con } \theta(0) = \theta_0 \text{ y } \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 \quad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

La solución de una ecuación diferencial no lineal como ésta no puede encontrarse, en general, aplicando un procedimiento analítico. Sin embargo, puede obtenerse una solución resolviendo numéricamente el problema de valores iniciales o aproximando la ecuación diferencial no lineal por medio de una ecuación diferencial lineal cuya solución exacta puede ser determinada rápidamente:

$$\frac{m \cdot l^2}{3} \cdot \ddot{\theta} + 2 \cdot k \cdot l^2 \cdot \theta - \frac{m \cdot g \cdot l}{2} \cdot \theta = 0 \qquad (2)$$

La aplicación desarrollada con MATHEMATICA, que se muestra en la Figura 5, permite obtener la aproximación utilizando el método de Runge – Kutta de cuarto orden de la ecuación (1) y la solución de la ecuación aproximada (2) para distintos valores de los parámetros del problema.

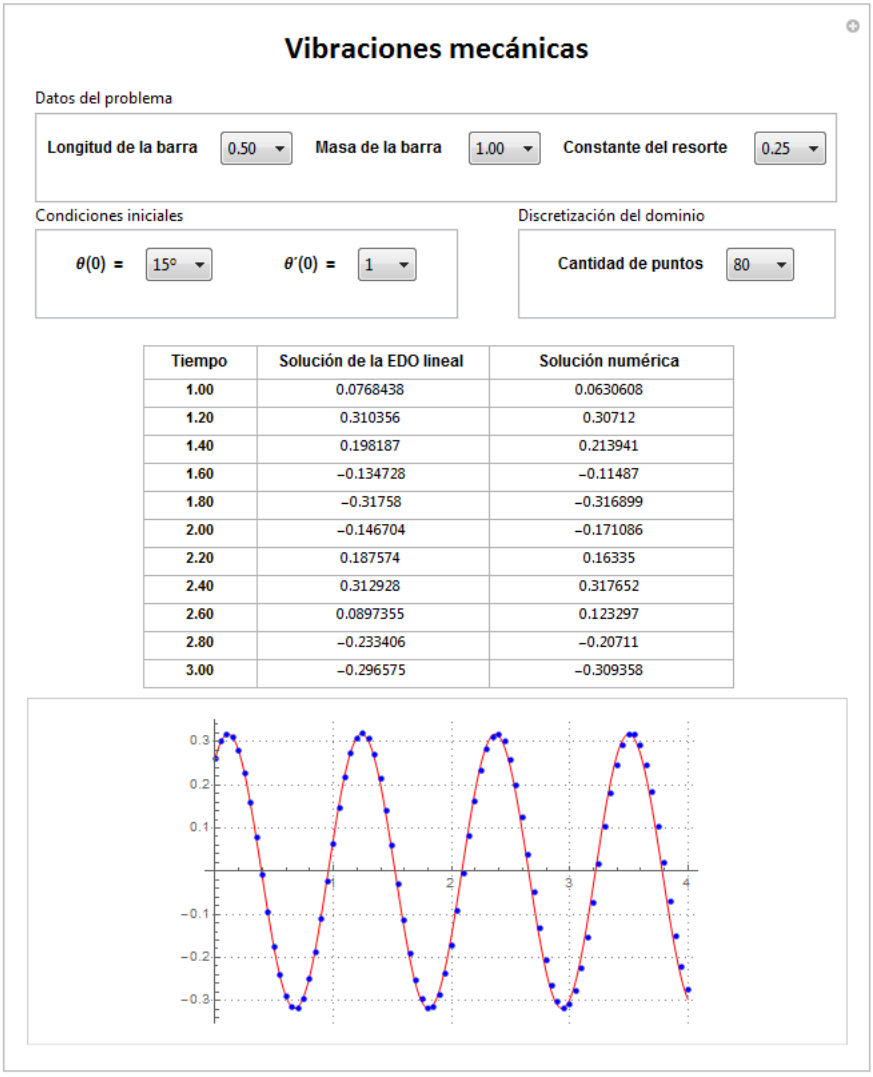


Figura 5: La aplicación para trabajar el problema (1)

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para obtener la solución discreta por el método de Runge Kutta, se deberá indicar además, la cantidad de puntos que constituye la discretización del dominio.

No se dispone de la solución exacta para determinar el error en cada caso. Se observa, tanto en forma numérica como en el gráfico, que las dos soluciones son cercanas entre sí.

3.2. Una herramienta para trabajar con gases reales

Para un gas ideal, se cumple la ley:

$$P\,V = n\,R\,T \tag{3}$$

donde V es el volumen de gas, P la presión, n el número de moles del gas, R la constante universal de los gases y T es la temperatura en grados Kelvin.

Si los gases fueran ideales el producto P V debería ser constante a todas las presiones, pero todos los gases se desvían de este comportamiento en la mayor parte de las condiciones. Generalmente, la curva P V en función de P de un gas real pasa por un mínimo. En los gases muy ligeros, como hidrógeno y helio, y en todos los gases a temperaturas muy superiores al punto de ebullición, no se observa este mínimo. En todos los gases existe una temperatura conocida como temperatura de Boyle en la que desaparece el mínimo de la curva P V = f(P). Sin embargo, el mínimo se hace muy visible cerca de la temperatura de condensación [11].

Se han propuesto distintas ecuaciones para predecir el comportamiento de gases reales. La más conocida es la ecuación de Van der Waals. Esta es una ecuación de estado para gases reales que tiene en cuenta las fuerzas de atracción y repulsión entre las moléculas. Así, se transforma la ecuación de los gases ideales, P V = n R T, en:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = R\,T \tag{4}$$

donde V es el volumen de un mol. Los valores a y b pueden determinarse a partir de las constantes críticas de los gases.

La Figura 6 presenta la herramienta que permite obtener V, conocidos P y T para un determinado gas utilizando la ecuación de Van der Waals. Se utiliza el método de Newton para hacer los cálculos, y se elige para iniciar las iteraciones el valor que se obtiene utilizando la ecuación de los gases ideales corregida:

$$V_0 = b + \frac{R\,T}{P} \tag{5}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

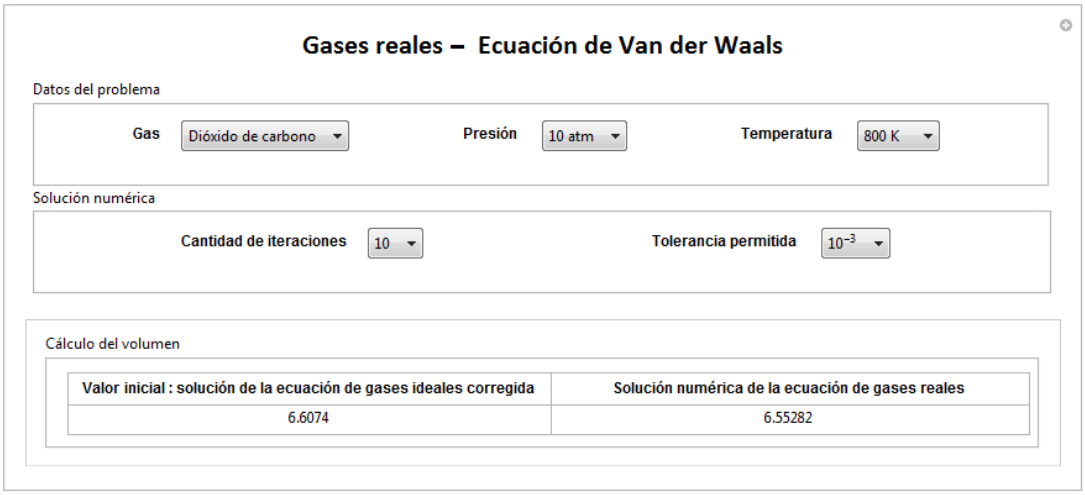


Figura 6: La aplicación para trabajar con gases reales

Los gases utilizados en la aplicación son: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, amoníaco, etileno y dióxido de azufre.

4. CONCLUSIONES

Muchas veces los estudiantes de Ingeniería no tienen en claro por qué es necesario estudiar ciertos conceptos matemáticos ya que se los presenta en forma aislada, sin relacionarlos con asignaturas de la especialidad. Plantear la enseñanza de los métodos numéricos en el contexto de problemas de interés, es una alternativa para motivar a los alumnos, mostrándoles por qué es necesario que adquieran ciertos conceptos en su formación profesional.

La utilización de herramientas para resolver problemas con las que los alumnos pueden interactuar, permitiéndoles obtener resultados según distintos valores de los parámetros, convierte al alumno en protagonista de su proceso de aprendizaje, dejando de ser un mero espectador.

Claramente, el docente deberá intervenir adecuadamente guiando a los estudiantes para lograr los objetivos planteados al inicio de cada unidad.

Se continuará en esta línea de trabajo, diseñando herramientas y secuencias didácticas para trabajar aplicaciones de los distintos temas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS

[1] Caligaris, M., Rodríguez, G., Laugero, L. (2010). Laboratorio de Análisis Numérico. In U. Cukierman & J.M. Virgili (Eds.) La tecnología educativa al servicio de la educación tecnológica. Experiencias e investigaciones en la UTN (pp. 583–606). Buenos Aires: edUTecNe.

[2] Caligaris, M.G., Rodríguez, G.B., Laugero, L.F. *Los recursos tecnológicos en la enseñanza de las deformaciones de columnas y vigas*. Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería, 24, pp. 63–72, 2013.

[3] Caligaris, M., Rodríguez, G., Laugero, L. (2013). Learning Objects for Numerical Analysis Courses. Procedia - Social and Behavioral Sciences 106, pp. 1778–1785.

[4] Rodríguez, G., Caligaris, M., Laugero, L. (2014). A Numerical Analysis Lab: Solving System of Linear Equations. Procedia - Social and Behavioral Sciences 131, pp. 160–165.

[5] Caligaris, M., Rodríguez, G., Laugero, L. (2015). Using the Web as part of the classroom in Numerical Analysis Courses. Procedia - Social and Behavioral Sciences 182, pp 596–600.

[6] Caligaris, M., Rodríguez, G., Laugero, L. (2015). Designing tools for numerical integration. Procedia - Social and Behavioral Sciences 176, pp. 270–275.

[7] http://demonstrations.wolfram.com/

[8] Wiley, D. A. (2000). *Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor, and a taxonomy*. En D. A. Wiley (Ed.), The Instructional Use of Learning Objects.

[9] Ramírez, M. S. (2007). *Recursos didácticos mediados por tecnología: Desarrollo e investigación de objetos de aprendizaje.* Memorias del 4° Congreso Internacional de Educación. México.

[10] Rao, S. *Mechanical Vibrations*. Pretince Hall, Estados Unidos, 2004.

[11] Gray, H.B., Haight, G.P. Principios básicos de Química, Reverté, 1976.

[12] Glasstone, S. *Tratado de Química Física*. Aguilar, España, 1979.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA MEJORAR LA ENSEÑANZA DE LAS MATERIAS ESTABILIDAD I Y II DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD REGIONAL DELTA - UTN.

Raffo Javier L[1], Carrizo Marcos R. [1]

[1]Laboratorio de Mecánica Computacional y Experimental – Facultad Regional Delta – Universidad Tecnológica Nacional, San Martin 1171, Campana, Buenos Aires, Argentina.
correo-e: jraffo@frd.utn.edu.ar - mcarrizo@frd.utn.edu.ar.

RESUMEN

Es bien conocido en el ámbito académico que para fortalecer el interés de los alumnos en los temas desarrollados en el aula es fundamental su participación en la realización de prácticas en los laboratorios de la facultad.

En el caso del Grupo de Mecánica Computacional y Experimental (GMCyE) de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional, contamos con experiencia en el diseño de diferentes equipos y sistemas que fueron desarrollados por la coordinación de profesionales de distintas disciplinas. Sumado al entusiasmo de los alumnos y docentes que participan dentro del grupo es que surge la idea del desarrollo del mencionado banco de ensayos.

Por otra parte, desde la docencia de las materias de grado Estabilidad I y II se promueve la participación de los alumnos en la observación y resolución de problemas cotidianos de ingeniería estructural, lo que evidencia la necesidad de contar con equipamientos para realizar mediciones de los fenómenos físicos involucrados y de esta manera motivar al alumno con aplicaciones directas de los temas tratados en clase.

El objetivo del presente trabajo es diseñar y construir un banco de ensayos para mejorar la enseñanza de la resistencia de los materiales, mejorar el estudio de modelos computacionales, generar un espacio de desarrollo experimental de alta precisión y como consecuencia fortalecer las investigaciones y recursos humanos de la facultad.

Se presenta el diseño de un banco de ensayos capaz de aplicar cargas en diferentes direcciones a diferentes componentes estructurales. Se realizaron cálculos analíticos y modelos computacionales numéricos para el dimensionamiento del mismo. Finalmente, se presentan mediciones realizadas en laboratorio para caracterizar el mismo.

Palabras Claves: *DISEÑO, BANCO DE ENSAYO, ENSEÑANZA, RESISTENCIA DE MATERIALES, CONSTRUCCIÓN.*

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos mecánicos son parte integrante del curso de resistencia de Materiales. Esta materia necesita la argumentación experimental de las hipótesis originales, la comprobación de las deducciones teóricas y el estudio del proceso de la deformación. Estas tareas deben ser cumplidas por las prácticas de laboratorio que acompañan el Curso de Resistencia de Materiales. [1].

Para adoptar el diseño definitivo, se realizó un relevamiento de algunos equipos didácticos que se ofrecen en mercado. Algunas de las firmas que proveen bancos didácticos para el estudio de la resistencia de los materiales son GUNT [2] y EDIBON [3]. Los proveedores disponen de diversos bancos de ensayos para diferentes tipos de prácticas, lo que implicaría la compra de varios bancos de ensayos para satisfacer las necesidades buscadas como por ejemplo el estudio de superposición de efectos por cargas combinadas. Incluso las probetas son estandarizadas para un ensayo en particular, esto limita la posibilidad de explorar otras configuraciones del setup experimental. Por lo que el uso de esto tipos de bancos se limita estrictamente a fines de enseñanza y a priori no son versátiles para su uso en investigaciones. Se destaca que no se encontraron equipos de origen nacional.

Luego de realizar el relevamiento descrito, se plantearon cuáles son las necesidades a cumplir por el banco de ensayos para así lograr optimizar los recursos disponibles y satisfacer la mayor cantidad de dichas necesidades.

Para satisfacer los objetivos de mejorar la enseñanza de resistencia de los materiales, mejorar el estudio de modelos computacionales, generar un espacio de desarrollo experimental de alta precisión y como consecuencia fortalecer las investigaciones y recursos humanos de la facultad, se propone construir un banco de ensayos de estructuras con la finalidad de estudiar las deformaciones, desplazamientos, vibraciones libres y forzadas de diferentes elementos estructurales como ser vigas, pórticos y reticulados.

El propósito específico del banco finalmente diseñado es dotar a las cátedras de Estabilidad I y II de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional Delta, UTN, de este equipamiento a fin de realizar experimentos que se vinculen con el desarrollo teórico y práctico impartido en las clases. Por otra parte, se pretende generar un espacio para que los becarios del Laboratorio de Mecánica Computacional y Experimental sumen experiencia en la práctica y afirmen los conocimientos teóricos adquiridos, como por ejemplo, comparar los resultados de modelos computacionales con experimentales. Además, el banco de ensayos va favorecer al grupo el incremento de la capacidad experimental en futuras investigaciones. En base a estas premisas, es que se pensó en la construcción del banco de ensayos en donde someter los componentes estructurales (vigas, pórticos, reticulados) a distintos esfuerzos (Axil, Corte, Flector, Torsor), para

ISBN: 978-987-1676-63-7

estudiar por ejemplo, el efecto de los esfuerzos característicos (MNQ), la distribución de tensiones, tensiones normales y tangenciales, la superposición de efectos, obtención experimental de tensiones principales, tensiones equivalentes, desplazamientos y otros conceptos a partir de la medición de, por ejemplo, deformaciones con galgas extensométricas.

Dentro de las premisas de diseño, se considera que tiene que ser capaz de emular diferentes tipos de vínculos o condiciones de borde en diferentes posiciones de la probeta, tiene que poderse aplicar una o más cargas puntuales en diferentes direcciones y posiciones de la estructura bajo estudio, se tiene que poder montar un excitador electrodinámico para poder generar una carga oscilante y se tiene que adaptar a diferentes tamaños y formas de probetas. Otras premisas son que debe ser de fácil construcción, montaje, operación y económicamente factible.

Una de las temáticas frecuentemente tratadas dentro del grupo es el estudio de frecuencias naturales de vibración, donde se diseñó junto con la construcción del banco un sistema automático de barridos de frecuencias con un excitador electrodinámico para detectar las frecuencias naturales de la probeta ensayada. Es por esto que se consideró en el diseño del banco que pueda realizarse este tipo de ensayos con un excitador electrodinámico.

2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO.

Se consideró que el diseño más apropiado para poder excitar con vibraciones forzadas a las probetas en estudio mediante el empleo de un excitador electrodinámico era emplear una disposición de dos columnas montadas sobre una base. Así, el excitador puede ser ubicado en la base del banco entre las columnas y excitar vibraciones sobre la probeta vinculada a ambas columnas (ver Figura 1). Una de las columnas se mantiene fija mientras que la otra puede desplazarse longitudinalmente a lo largo del eje de la base. De esta forma se puede variar las distancias entre los puntos de ubicación de los vínculos.

En base a un relevamiento de materiales disponibles en la zona, se procedió a armar diferentes diseños que se los sometió a un análisis de tensiones y desplazamientos por medio del método elementos finitos. Una vez verificadas las tensiones y deformaciones, el análisis se centra en la optimización y caracterización de las frecuencias naturales y modos normales de vibración, a fin de determinar la mejor forma de rigidizar la estructura para aumentar el valor del primer modo de vibrar.

Luego de corroborar que todos los requerimientos y necesidades fueron satisfechos se realizó un diseño final del banco de ensayos presentado en la Figura 1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

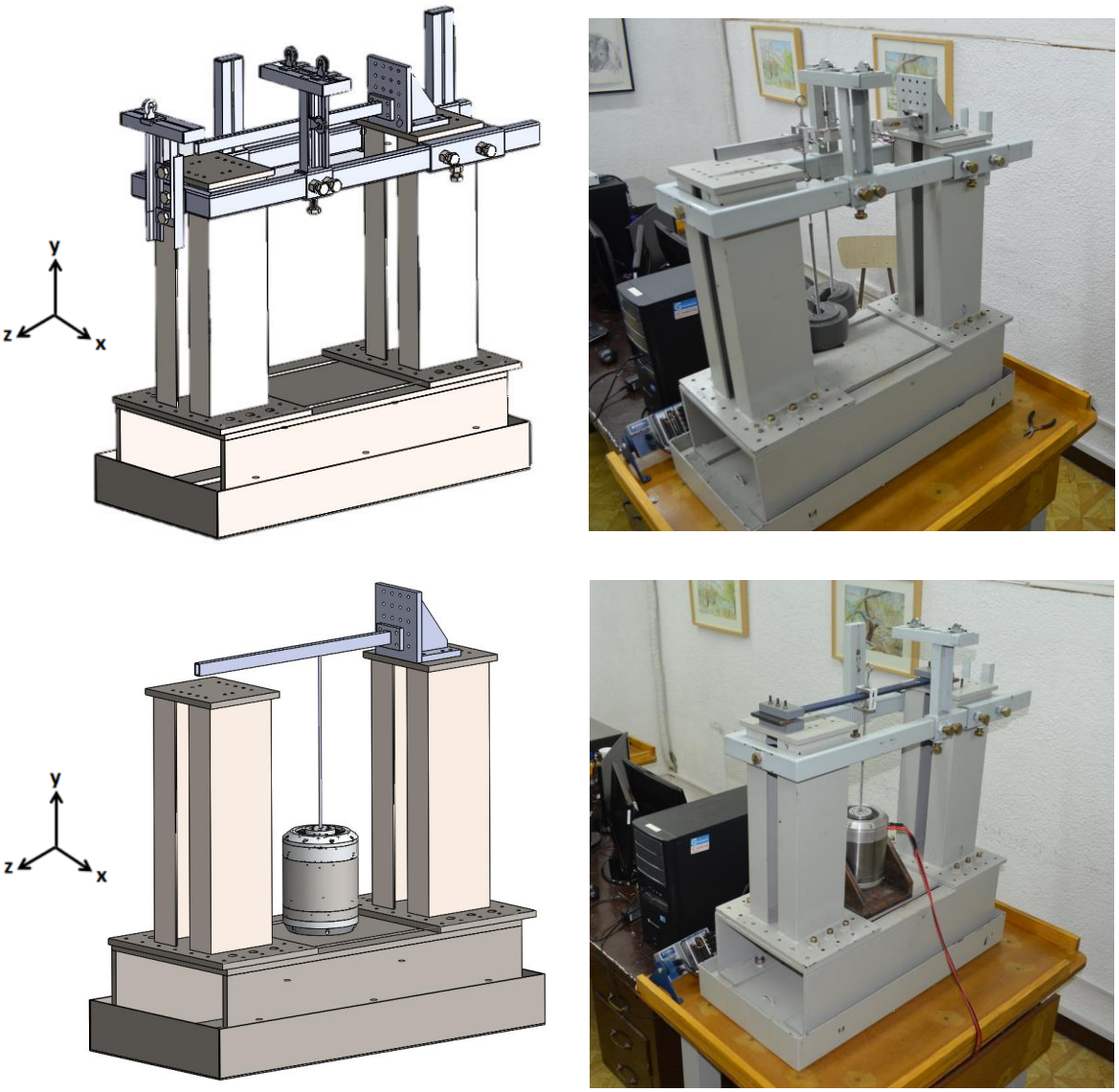


Figura 1: Diseño final del Banco de Ensayos.

Se evidenció la necesidad de construir un sistema de cargas a fin de solicitar mecánicamente a las probetas a estudiar. Buscamos que se pueda aplicar una o más cargas puntuales sobre distintos puntos de la probeta, en direcciones de los 3 ejes cartesianos y que además se pueda solicitar al mismo tiempo en direcciones opuestas de al menos dos direcciones cartesianas.

Por otra parte se consideró conveniente que el sistema de cargas fuera montado sobre las columnas del banco de ensayo. Por lo tanto, se debía contemplar que la distancia entre las mismas es variable. En base a perfiles estándares se diseñó un sistema solidario a las columnas principales, capaz de ajustarse al desplazamiento de una de las mismas. Sobre este se montan los sistemas de carga: axial, transversal y vertical. Estos subconjuntos pueden desplazarse por el

ISBN: 978-987-1676-63-7

conjunto solidario a las columnas y ser fijado mediante el empleo de tornillos de apriete. Estos sistemas, están compuestos por poleas, que transmiten las cargas desde las pesas calibradas a la probeta mediante un cable de acero (ver Figura 2).

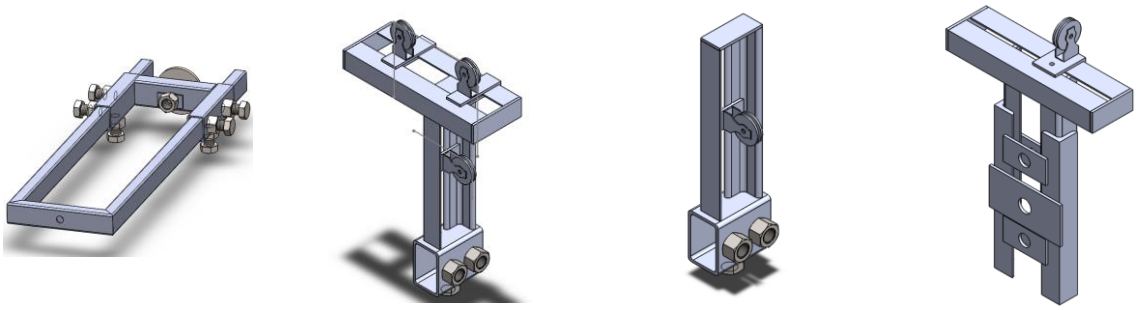


Figura 2: Sistemas de cargas: a) Apoyo. b) Vertical. c) Transversal. d) Axial.

Además se construyeron dos soportes donde se colocaran las pesas a la hora de realizar los ensayos, los cuales están sujetos por un cáncamo y este por un cable de acero al sistema de aplicación de carga (ver Figura 3). Se definió a la máxima carga cuando el soporte contiene 6 pesas de 5kg cada una.

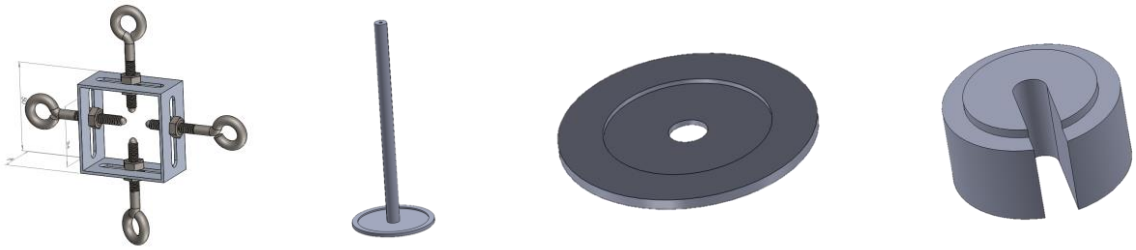


Figura 3: a) Sist. aplicación de carga. b) Soporte c) Placa superior soporte d) Pesas

Para poder aplicar la carga sobre la probeta se realizó un diseño capaz de adaptarse a probetas de diferentes perfiles y tamaños, o por lo menos a grupos de ellos.

Finalmente se fabricó el banco de ensayos y se realizaron diferentes mediciones sobre el mismo. Los resultados se contrastaron con los resultados obtenidos de los modelos computacionales numéricos.

3. VERIFICACIÓN DEL DISEÑO.

Para realizar el dimensionamiento de la columna del banco de ensayo, se analiza la condición más desfavorable, o sea la columna como una viga empotrada libre con cargas en su extremo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

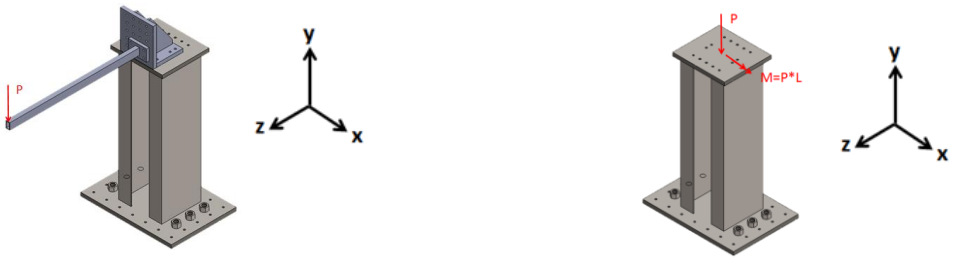


Figura 4: a) Columna con viga solicitada. b) Reacciones de vínculo en la columna.

Para la columna se seleccionaron dos perfiles UPN 160. La misma presenta las siguientes propiedades de sección: $A_T = 48cm^2$, $I_{xxT} = 1850cm^4$, $I_{zzT} = 2495.79cm^4$.

3.1 Cálculos analíticos.

A partir del método de la carga unidad se determinan los desplazamientos máximos de la columna (ver figura 4b):

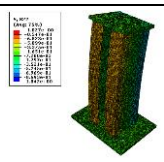
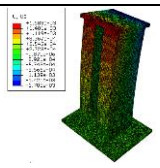
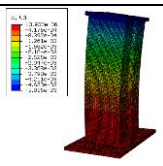
$$\delta_y = \int_0^{L_c} \frac{N \cdot \overline{N}}{E \cdot A} \cdot dy = \int_0^{L_c} \frac{(-P)\cdot(-1)}{E \cdot A} \cdot dy = \frac{(-P)\cdot(-1)\cdot y}{E \cdot A}\Bigg|_0^{L_c} = \frac{(-P)\cdot(-1)\cdot L_c}{E \cdot A} = 0.000106mm \quad (1)$$

$$\delta_z = \int_0^{L_c} \frac{M_x \cdot \overline{M_x}}{E \cdot I_{xx}} \cdot dy = \int_0^{L_c} \frac{M_a \cdot y}{E \cdot I_{xx}} \cdot dy = \frac{M_a \cdot y^2}{2 \cdot E \cdot I_{xx}}\Bigg|_0^{L_c} = \frac{M_a \cdot {L_c}^2}{2 \cdot E \cdot I_{xx}} = \frac{P \cdot L_v \cdot {L_c}^2}{2 \cdot E \cdot I_{xx}} = 0.005285mm \quad (2)$$

3.2 Resultados numéricos.

El modelo computacional se realizó con elementos sólidos tetraédricos cuadráticos de presión constante. En la Tabla 1 se presentan los resultados de tensiones y desplazamientos máximos sobre los ejes Y y Z.

Tabla 1. Resultados de tensiones y desplazamientos máximos en los ejes Y y Z.

Tensiones	Desplazamiento Eje Y	Desplazamiento Eje Z
		
$\sigma = -10.62\ {Kgf}/{cm^2}$	$\delta_y = 0.001753mm$	$\delta_z = 0.005087mm$

La relación existente entre el desplazamiento en dirección Y de la probeta y de la columna está dada por:

$$\frac{\delta_C}{\delta_p} = \frac{0.001753mm}{0.4355mm} = 0.004025 \text{ ó } 0.402\% \quad (3)$$

donde δ_C es el desplazamiento en Y de la columna y δ_p es el desplazamiento en Y de la probeta.

Por otra parte, en las Tablas 2 a 4 se presentan los resultados de las primeras 6 frecuencias naturales y sus correspondientes formas modales obtenidas con el modelo computacional numérico de la columna, base y banco completo respectivamente.

Tabla 2. Frecuencias naturales y formas modales columna.

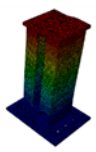
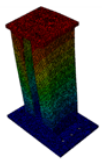
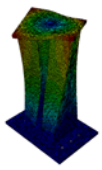
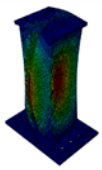
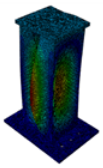
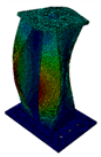
Secuencia Modal	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Frecuencia Hz	210.52	442.92	576.34	701.15	781.05	825.14
Forma Modal						

Tabla 3. Frecuencias naturales y formas modales cajón.

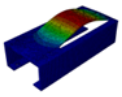
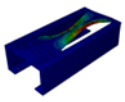
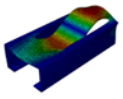
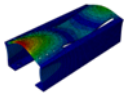
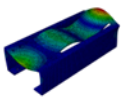
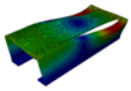
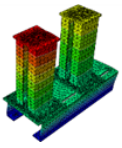
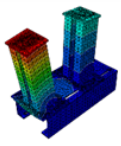
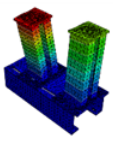
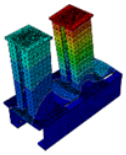
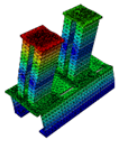
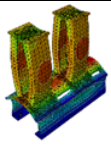
Secuencia Modal	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Frecuencia Hz	149.87	368.15	369.35	476.09	588.13	608.53
Forma Modal						

Tabla 4. Frecuencias naturales y formas modales banco completo.

Secuencia Modal	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Frecuencia Hz	140.18	156.07	171.53	184.59	227	413.92
Forma Modal						

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Si bien el grupo cuenta con la capacidad de realizar mediciones con galgas extensométricas, y observando el análisis de tensiones obtenido numéricamente, se considera que las tensiones son tan bajas que de realizar este tipo de mediciones, probablemente las mismas estén del orden del ruido eléctrico de la habitación. Por lo que se considera solo analizar los desplazamientos como forma de comparar los resultados analíticos y los modelos computacionales numéricos.

4.1 Medición de desplazamientos.

Se procedió a montar en una condición de empotrada libre a una probeta lo suficientemente rígida para resistir los esfuerzos que requería el ensayo. A la misma se le aplicó una carga que fue variando de 0 kgf a 20 kgf ascendente y descendente con pasos de 5 kgf, a una distancia de 70cm del empotramiento, tal como se muestra en la figura 5.



Figura 5: Medición de desplazamientos del extremo libre de la columna

Se instrumentó con relojes comparadores analógicos marca Mitutoyo Modelo 2046S [4] a fin de registrar los desplazamientos de la columna sobre el eje Z. Los relevamientos arrojaron los resultados que se presentan en la figura 6.

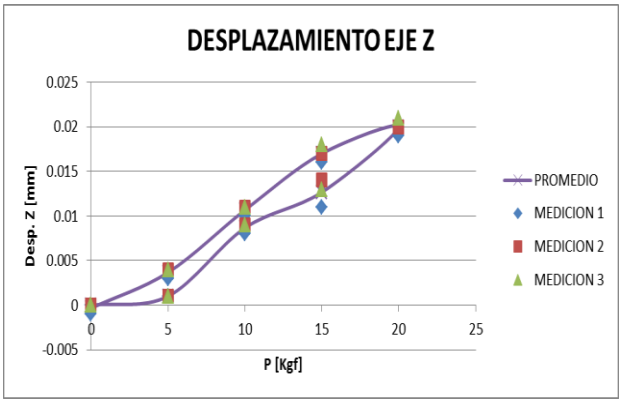


Figura 6: Resultados de la medición de desplazamientos en el eje Z.

Esto evidenció problemas en el sistema de sujeción a corregir, como ser poca cantidad de puntos fijación (tornillos), superficies irregulares, insuficiencia de rigidez de la base, etc.

4.2 Medición de frecuencias naturales de vibración.

Se procedió a determinar experimentalmente las frecuencias naturales de vibración en los distintos componentes del banco. Se dispone de cuatro acelerómetros piezoeléctricos con circuito integrado tipo IEPE Marca Bruel & Kjaer Modelo DeltaTron 4508 B 004, los cuales mediante cuatro cables MicroDot-BNC son conectados a un módulo 9234 de la firma NI [5,6,7]. El mismo dispone de 4 canales para adquisición de señales dinámicas de sensores piezoeléctricos con circuito integrado o no integrado, con rango dinámico de 102dB y puede digitalizar simultáneamente hasta 51.2Khz por canal con filtros anti-aliasing ajustables automáticamente a la frecuencia de muestreo.

Dicho módulo va conectado a un chasis NI CompactDAQ 9174 USB de 4 ranuras diseñado para sistemas de pruebas pequeños y portátiles de medidas mixtas el cual se conecta a una PC que dispone de diferentes programas de National Instruments (NI) para adquirir y controlar la medición.

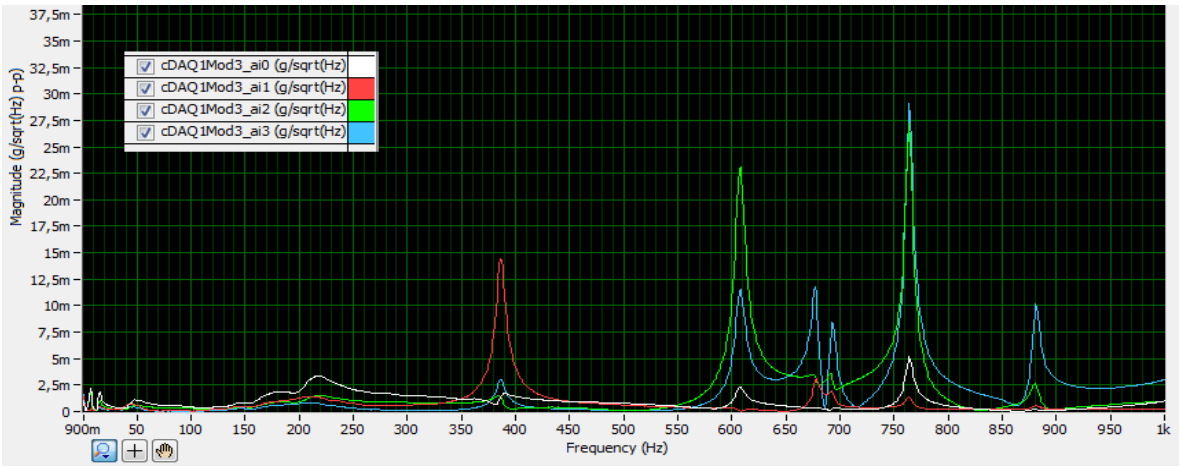


Figura 7: a)Sistema de Adquisición de Datos. b) Acelerómetros montados sobre la columna.

Para la adquisición, almacenamiento, visualización, manipulación, procesamiento y presentación de las señales manejadas se programó la medición en el programa SignalExpress de NI. Luego se realizó una transformada rápida de Fourier para ver las señales en el dominio de las frecuencias.

En base a las formas modales que se obtuvieron del modelo computacional numérico es que se ubicaron los acelerómetros en los diferentes puntos de máxima amplitud. Para realizar el ensayo, la columna es montada en una mesa anti-vibratoria Thorlabs mediante tornillos en su base y es excitada por suaves golpes, ver Figura 7. En la Figura 8 se presenta el espectro de frecuencias observado.

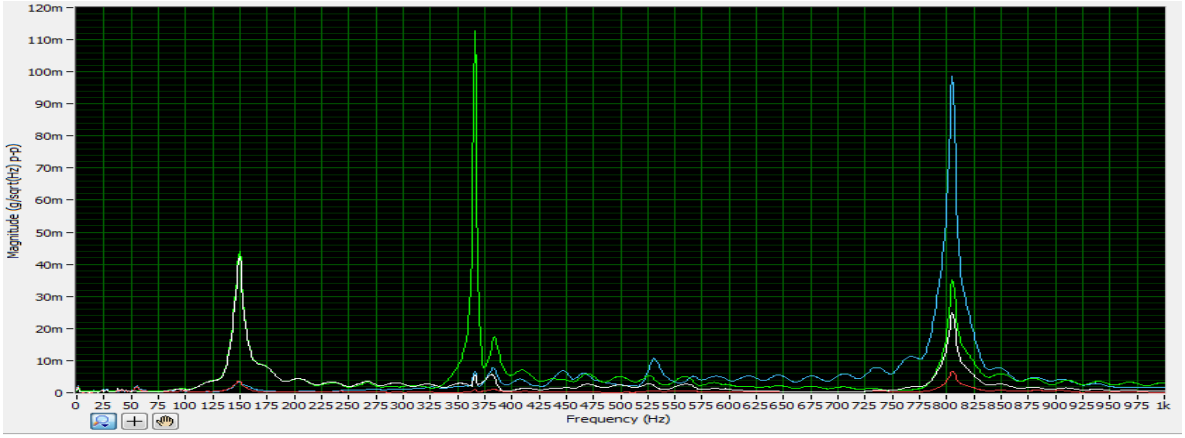
ISBN: 978-987-1676-63-7



Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
219Hz	385Hz	610Hz	685Hz	763Hz	880Hz
Ac0 (Blanco)	Ac1 (Rojo)	Ac2 (Verde)	Ac3 (Celeste)	Ac3 (Celeste) Ac2 (Verde)	Ac3 (Celeste)

Figura 8: Espectro de frecuencias de la columna.

Realizando un análisis similar, en la Figura 9 se presenta el espectro de frecuencias de la base.



Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
150Hz	366 Hz	384 Hz	450 Hz	531.5 Hz	597.5 Hz
Ac0 (Blanco)	Ac1 (Rojo)	Ac2 (Verde)	Ac3 (Celeste)	Ac3 (Celeste) Ac2 (Verde)	Ac3 (Celeste)

Figura 9: Espectro de frecuencias de la base.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Tabla 5 y 6 se presenta la comparación de los resultados numéricos y experimentales de las frecuencias de vibrar, tomando como valor verdadero a la medición experimental para el cálculo del error relativo.

Tabla 5. Comparación de los resultados de las frecuencias de vibrar de la columna.

Determinación de Frecuencias Naturales Columna						
Método	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Experimental	219	385	610	685	763	880
Simulación	210.52	442.92	576.34	701.15	781.05	825.14
Error Rel. %	4	15	6	2	2	6

Tabla 6. Comparación de los resultados de las frecuencias de vibrar de la base.

Determinación de Frecuencias Naturales Base						
Método	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Experimental	150	366	384	450	531.5	597.5
Simulación	149.87	368.15	369.35	476.09	588.13	608.53
Error Rel. %	0	1	4	6	11	2

5. CONCLUSIONES

Se realizó un trabajo completo de diseño de un banco de ensayos partiendo de analizar los requerimientos necesarios, pasando por el análisis de equipamientos disponibles y finalizando con realizar mediciones sobre el diseño final construido.

Se analizaron las frecuencias naturales y los modos normales de vibración determinados por el modelo computacional y se compararon con valores medidos demostrando una alta correlación.

Se detectó una pequeña distorsión entre la medición de desplazamientos y sus correspondientes valores obtenidos con el modelo computacional. El principal problema detectado son las condiciones de anclaje de la columna a la base, para lo cual se propone solucionar este problema corrigiendo las imperfecciones de la unión.

En términos generales el banco de ensayos cumple con las necesidades y sus consecuentes requerimientos técnicos previamente definidos. Ha permitido aumentar la experiencia y conocimiento del grupo en el desarrollo de equipos nuevos y el mismo resulta ser una valiosa herramienta.

Actualmente, el banco de ensayos está permitiendo realizar prácticas de laboratorio en las asignaturas Estabilidad I y II de la carrera de ingeniería mecánica de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional; en las que se determina experimentalmente las

ISBN: 978-987-1676-63-7

deformaciones, tensiones y desplazamientos en componentes estructurales como ser vigas, pórticos y reticulados.

Este proyecto amplió además el espacio de desarrollo experimental de alta precisión para el Grupo de Mecánica Computacional y Experimental. Cómo consecuencia se denota un fortalecimiento de las investigaciones y de los recursos humanos de la facultad.

6. REFERENCIAS

[1] Afanasiev, Prácticas de laboratorio sobre resistencia de materiales, Editorial RUBIÑOS 1860, ISBN 9789999032803.

[2] http://www.gunt.de/static/s13_1.php

[3] http://www.edibon.com/products/?area=mechanicsmaterials&subarea=strengthmaterials

[4] http://www.mitutoyosudamerica.com/imagens/catalogos/relojes.pdf

[5] http://www.ni.com/pdf/manuals/372234a.pdf

[6] http://www.ni.com/pdf/manuals/372307a.pdf

[7] http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-316

[8] http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-59

[9] http://www.neoteo.com/electronica-basica-amplificador-de-audio

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

BANCO DE ENSAYO DE FATIGA DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS. AUTOMATIZACIÓN.

Federico Posdena [1], **Ezequiel Funes** [1] **y Germán G. Keil** [1]

[1] Dpto. Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina
correo-e: federicoposdena@hotmail.com
refunes88@gmail.com
german.keil@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

El Laboratorio de Conductores de la U.N.Comahue, dispone de un banco de ensayos de fatiga, de 30 metros de longitud. Incluye extremos de retención y de tiro con palancas y contrapesos, pórtico para fijar la grapa de sujeción y un excitador. Este último constituido por una biela, vinculada al conductor y a dos discos excéntricos con ajuste cónico acoplados a un motor eléctrico. El control de frecuencia se realiza manualmente, mediante un variador electrónico. La carrera de excitación se ajusta, interviniendo sobre los discos.

A una determinada distancia del borde de la grapa, con un acelerómetro y/o un sensor de proximidad, se mide la amplitud de la vibración del conductor y exigida por el ensayo de fatiga a realizar.

El excitador presenta, facilidades para ajustar la frecuencia, y limitaciones en cuanto a carrera y su ajuste. Para lograr amplitudes considerables en correspondencia con la grapa, se opera en los límites de una frecuencia natural del conductor para lograr un efecto resonante. Por ser un banco sin control de parámetros ambientales, el sistema es muy sensible en cuanto a la variabilidad de dicha frecuencia y los valores de amplificación. Para lograr que la amplitud vibracional se mantenga en un rango, se requiere la supervisión casi permanente de un operador. Para salvar esta situación, se desarrolló un sistema autónomo.

El mismo consiste en un transductor inductivo que mide la distancia al conductor. La señal analógica ingresa a un PLC, donde con una operación se obtiene la amplitud de la vibración. Dado el valor de consigna, mediante un lazo de control asociado, el automatismo cambia la frecuencia del variador, que controla la velocidad del motor y con ello acercarla o alejarla de la frecuencia natural, variando la amplitud de oscilación y orientarla al requerido.

En un panel HMI se pueden observar amplitudes, frecuencias y número de ciclos aplicados.

Palabras Claves: *Banco ensayo, fatiga conductores, automatización.*

1. INTRODUCCIÓN

En las líneas de transmisión eléctrica, los conductores están sometidos a la acción eólica que genera distintos fenómenos de vibraciones entre las que se destacan, las denominadas vibraciones eólicas (*vortex shedding*), por viento turbulento (*buffeting*), oscilaciones de subvano, para el caso de haces de conductores múltiples en líneas de alta y muy alta tensión, y la denominada inestabilidad aeroelástica (*galloping*).

La experiencia demuestra, que en la mayoría de los casos las vibraciones de mayor criticidad son las denominadas vibraciones eólicas. Las mismas son generadas por el desprendimiento alternativo de vórtices de la masa de aire incidente, también llamados torbellinos de Von Karman. El fenómeno resulta de importancia para vientos entre 4 y 10 Km/h. La frecuencia de excitación provocada, estará condicionada por el diámetro del conductor, la velocidad del viento y el denominado número de Strouhal. Dicha frecuencia tiende a excitar al conductor en su frecuencia natural más próxima, generándose una sintonía entre las mismas.

Por el fenómeno vibratorio se generan en el conductor nodos y vientres. La grapa de suspensión se constituye en un nodo, que se puede asimilar a un empotramiento. En correspondencia con la misma el conductor considerado como una cuerda se comporta como una viga. Debido al movimiento vibratorio se generan, entre otros, problemas de fatiga en los hilos constituyentes del mencionado conductor. Independientemente de lo señalado, la resistencia a la fatiga del conductor va a depender de sus propias características, y del diseño y comportamiento de la grapa de suspensión. Corresponde señalar que un conductor típico empleado en nuestro país en las líneas de transmisión, es del tipo ACSR "*Aluminum Conductor Steel Reinforcement*", con una constitución 48 hilos de aluminio y 7 de acero.

A los efectos de reducir la amplitud de las vibraciones en la grapa de suspensión, y con el fin de absorber parte de la energía transferida por el viento al conductor, se emplean los denominados sistemas de protección antivibratoria. Los más usuales son los denominados *Stockbridge* y espaciadores amortiguadores.

Para tipificar el comportamiento a la fatiga de conductores y la eficiencia de las grapas, se realizan lo que se denomina ensayos de fatiga de conductores en bancos de prueba. En los mismos, conforme a la norma midiendo la deformación pico a pico a determinada distancia del centro de la grapa o del último punto de contacto del conductor con la misma, se obtiene las tensiones variables sobre los hilos del conductor. El control de las deformaciones se realiza indirectamente por medición de la amplitud de flexión (Bending amplitude) de acuerdo a las recomendaciones del IEEE: "*Standardization of Conductor Vibration Measurements*".

En el Laboratorio de Ensayo de Conductores del Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, se dispone de dos líneas de

ISBN: 978-987-1676-63-7

ensayo de fatiga de conductores, cuya disposición general se ajusta a lo indicado en el siguiente esquema contenido en la Figura 1

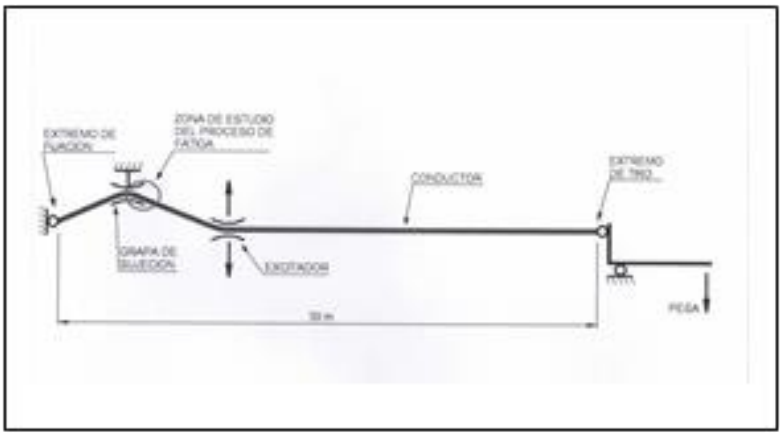


Figura 1: Esquema Banco de Ensayos

En la Figura 2, se puede observar la grapa de suspensión, y el acelerómetro que permite medir la amplitud de las vibraciones actuantes. Estas también se pueden medir empleando un sensor de proximidad.



Figura 2: Grapa de suspensión y acelerómetro

Las vibraciones se generan con un excitador electromecánico. El mismo está compuesto de un motor eléctrico que comanda un sistema de conos excéntricos ajustables, para variar la carrera del excitador. El comando del motor se realiza con un variador electrónico de velocidad. Con el mismo manualmente, mediante un potenciómetro, se ajusta la frecuencia de excitación, hasta alcanzar la frecuencia que genere la amplitud deseada, dentro de un rango de tolerancia determinado. En la Figura 3 se pueden observar detalles sobre el particular.

El excitador ha sido diseñado para realizar ensayos de fatiga de conductores de hasta 26mm de diámetro.

Usualmente los bancos de ensayo de este tipo emplean excitadores electrodinámicos comerciales (*shakers*) con su propia lógica de control. El diseño realizado tiene características funcionales distintas a los comerciales.

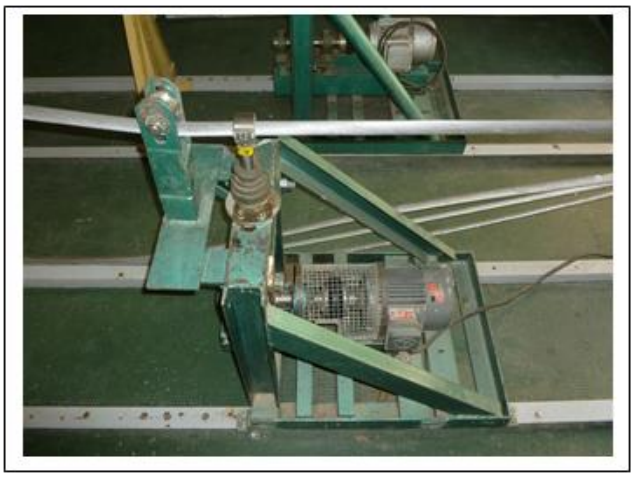


Figura 3: Excitador electromecánico

Se presentan a continuación, a modo de referencia, algunos parámetros operativos típicos del banco de ensayo:

- Fuerza de pretensión: 21.000 N.
- Distancia del extremo de fijación al centro de la grapa: 3.070 mm.
- Distancia del centro de la grapa al extremo del sistema de excitación: 5.335 mm.
- Amplitud pico a pico de la vibración a 300 mm del centro de la grapa: 1.6 mm. – Deformación pico a pico: 200 Microstrain.
- Frecuencia de excitación de referencia: 13.5 Hz.
- Ángulo de salida del conductor respecto al eje de la grapa: 10º

Con respecto a la frecuencia de excitación, para lograr las amplitudes de vibraciones necesarias que generan las tensiones definidas para el ensayo de fatiga, se opera en la zona próxima a una frecuencia de resonancia del conductor, tal lo indicado en la Figura 4.

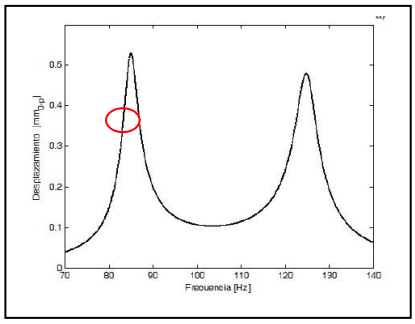


Figura 4: Curva de resonancia típica

Las frecuencias de resonancia quedan definidas por la ecuación (1).

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{m}} \tag{1}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

f_n: Frecuencia del modo "n" (Hz)

n: Orden del modo de vibración.

L: Longitud del vano (m).

T: Fuerza de tiro del cable (N).

m: Masa del cable por unidad de longitud (kg/m).

Dado que el banco de ensayo no está climatizado, pequeñas variaciones de temperatura generan cambios en los factores de amplificación, por corrimiento de las frecuencias naturales. Esto obliga a realizar controles periódicos y eventuales ajustes manuales. Para superar esta situación, se procedió a realizar el diseño, desarrollo e implementación de un sistema de control autónomo.

2. DESARROLLO

Conforme a las bases operativas del banco de ensayos, se propone realizar un control constante de la amplitud de vibración del conductor durante todo el ensayo, aplicando correcciones en la frecuencia de excitación de manera de compensar las desviaciones en la amplitud debidas a los reacomodamientos mecánicos y térmicos del conductor. Surge, tal como se presenta en la Figura 5, el diagrama de bloques funcionales correspondiente.

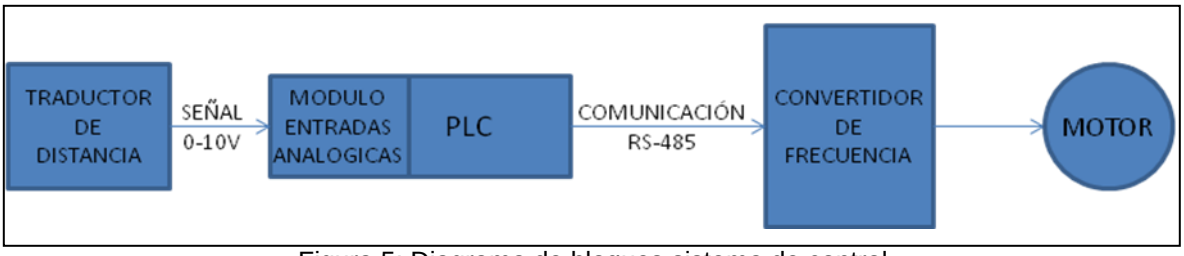


Figura 5: Diagrama de bloques sistema de control

Se presentan a continuación las características relevantes de los componentes empleados.

2.1. Componentes

2.1.1 Traductor de distancia o sensor de proximidad

Mide la distancia entre el sensor y el objeto del que se desean medir la amplitud pico a pico de desplazamiento de las vibraciones. En el diseño desarrollado, la mencionada medición, tal como se puede apreciar en la Figura 6, queda definida por la amplitud entre la distancia mínima y máxima del conductor vibrante a la superficie del sensor de proximidad, y que se obtiene a través de una operación aritmética en el PLC. El traductor empleado es de marca Turck tipo NI25-CK40-LIU-H1141, cuyas características operativas son las siguientes [4]:

- Rango de medición: [5 – 25]mm $\pm$ 0,2mm
- Tensión de alimentación: 15 – 30 VDC
- Salida de tensión: 0 – 10 V

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Salida de corriente: 0 – 20mA
- Frecuencia de conversión: 30Hz

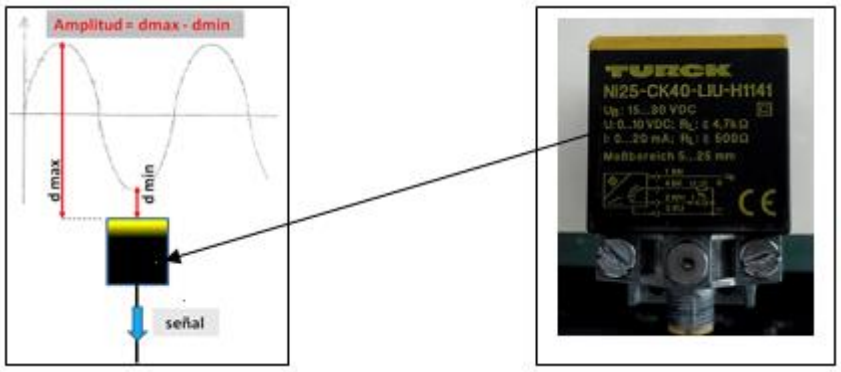


Figura 6: Sensor de proximidad

En la Figura 7 se visualiza la curva de respuesta del sensor.

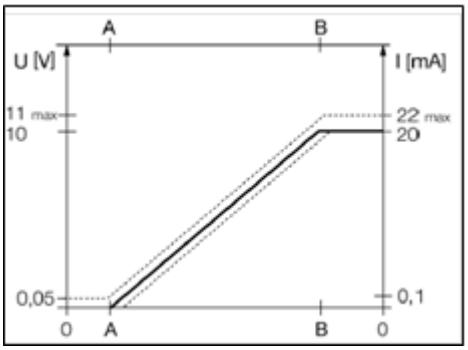


Figura 7: Respuesta del sensor [4]

La distancia A-B (5-25 mm), entre la superficie del sensor y la vibrante, define el rango de medición, y en el cual el mismo tiene un comportamiento lineal. Usualmente, las amplitudes de vibración adoptadas en los ensayos están en el orden del milímetro, llegando a valores máximos cercanos a los 2 mm pico a pico.

En la Figura 8, se puede apreciar la instalación del sensor en el banco de ensayo de conductores.



Figura 8: Instalación sensor de proximidad

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.1.2 Módulo de entradas analógicas

Convierte las señales de entrada analógica de 0 -10 V del traductor de distancia en una señal digital discreta con valores de 0 - 32000 y lo escribe en una variable en el PLC.

Esta variable es utilizada en el programa para obtener los valores máximos y mínimos de distancia y de esta manera determinar la amplitud de la oscilación.

Es de marca DELTA modelo DVP04-AD [5].

2.1.3 PLC

Tiene por objeto almacenar y ejecutar el programa que controla esta aplicación. Es de marca DELTA modelo DVP28-SV. [1]

La consigna de frecuencia resultante del lazo de control, el PLC la envía al Variador de frecuencia por medio de una comunicación con protocolo MODBUS ASCII, (9600bps, 7bits, sin paridad, 2 stop bit) por medio del puerto COM2 RS485 incorporado en el PLC y el puerto RS 485 incorporado en el variador de frecuencia.

Tanto en el PLC como en el Variador de frecuencia, se parametrizan los valores de dicha comunicación para que se realice la misma.

El arranque y la parada del motor mediante el variador, también se controla con el PLC mediante la misma comunicación antes mencionada.

El arranque y la parada del ensayo se realiza por medio de dos pulsadores uno de MARCHA y uno de PARADA ubicados en el frente del tablero y que envían la señal a dos entradas digitales del PLC.

2.1.4 Panel HMI

Al PLC se le conecta una pantalla HMI ubicada al frente del tablero. Tiene por objeto poder visualizar las variables del ensayo mediante la programación de la misma para tal efecto [3]. Es de marca DELTA modelo DOP-AS38BSTD.

La misma se conecta al COM1, RS232 del PLC. En la pantalla HMI se pueden visualizar en una ventana los valores de Amplitud, Distancia mínima, Distancia máxima, Distancia actual y en otra pantalla la cantidad de ciclos que lleva el ensayo y un grafico del histórico de la amplitud.

2.1.5 Convertidor de frecuencia

Tiene por objeto controlar el motor: encender, apagar y cambiar la frecuencia de operación dependiendo de la consigna que le fija el PLC vía el puerto de comunicación RS485. Es de marca DELTA modelo VFD015E43A. 3x380V_ 50Hz_1,5 kW_4,2A [2].

2.1.6 Tablero integrador

En las figuras 9 y 10, se pueden observar detalles del tablero donde se encuentran los elementos utilizados para solución implementada.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 9: Vista interior del tablero de comando.



Figura 10: Vista exterior del tablero de comando

2.2. Detalles operativos

El objetivo del lazo de control es mantener la amplitud pico a pico de la oscilación en un valor de referencia con una tolerancia compatible con la consigna de ensayo, incluyendo una tolerancia. Una vez que el lazo de control logra establecer ese valor, no varía mas la frecuencia del variador hasta tanto se salga nuevamente del rango establecido. Mediante un lazo de control con zona muerta [6] se aumenta la frecuencia del variador si la amplitud de la vibración está por debajo de un margen, o se disminuye si la misma está por encima.

La amplitud de la oscilación (A) se calcula teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos medidos por el traductor de distancia.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los valores de los parámetros utilizados para el automatismo se extrajeron de un funcionamiento previo de forma manual en el cual se visualiza que la frecuencia es el único parámetro a controlar y teniendo como única opción actuar sobre el variador electrónico de velocidad que comanda el motor eléctrico del excitador y teniendo como referencia las mediciones de amplitud.

Como se trabaja cerca de la frecuencia de resonancia con el riesgo de generar amplitudes indeseables, se opto por esta alternativa de control que replica en forma autónoma el control y operación manual del sistema con antecedentes de varios años de operación.

Conforme a lo señalado en el párrafo precedente, el diseño de la lógica de control tuvo como referencia las características operativas del excitador electromecánico desarrollado específicamente para el banco.

Mediante una rampa de aceleración seteada en el variador de frecuencia, se aproxima a una frecuencia cercana e inferior a la del ensayo y garantizando que la amplitud A sea inferior a la requerida. Esta frecuencia se setea en el programa del PLC teniendo en cuenta los antecedentes del ensayo. Una vez que el variador alcanzó esta frecuencia inicial comienza el lazo de control.

Mientras el valor de la amplitud de la oscilación (A) esté por debajo de la requerida el control va aumentando la frecuencia en forma discreta, con saltos de 0,05Hz (K1) con un tiempo de muestreo de 4seg que le permite al sistema estabilizarse en la nueva frecuencia.

Si la amplitud está por encima de la deseada la corrección se hace también discretamente de saltos de 0,1Hz (K2) hasta entrar en el margen deseado de amplitud. El descenso de la frecuencia se hace con saltos mayores al ascenso por el riesgo que implica superar la frecuencia.

A su vez por seguridad están acotadas por programa las frecuencias mínimas y máximas que para este ensayo son 11Hz y 15Hz respectivamente.

2.3 Algoritmo de Control

Tenemos una variable de consigna (SP) que es la amplitud deseada y una tolerancia que nos define el valor máximo y mínimo de amplitud A. Estos dos parámetros nos definen una zona muerta D, dentro de la cual no se hacen ajustes de frecuencia del motor.

La amplitud de la oscilación deseada se setea por programa dentro del mismo definiendo los valores máximos y mínimos.

Para el caso que se ensayó (prueba testigo), se estableció 1,9 mm de amplitud mínima y 2,1 mm de amplitud máxima. Estos dos valores nos definen una zona muerta D dentro de la cual no se realizan ajustes a la frecuencia del motor.

La variable de proceso (PV) se mide mediante el sensor de proximidad, para luego obtener mediante una operación aritmética, la amplitud (A) pico a pico.

$$A = PV_{máx} - PV_{mín} \quad (2)$$

$PV_{máx}$ = distancia máxima entre el sensor y el cable medido en tiempo real.

$PV_{mín}$ = distancia mínima entre el sensor y el cable medido en tiempo real.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Definimos el error (E):

$$E = SP - A \quad (3)$$

Siendo el error negativo si estoy por encima de la amplitud deseada y positivo si estoy por debajo de la amplitud deseada.

Teniendo en cuenta el signo del error se corrige la variable de control (CV) que es la velocidad del motor (frecuencia del variador).

$$CV = CV + K1 \text{ si } E>0 \quad (4)$$

$$CV = CV - K2 \text{ si } E<0 \quad (5)$$

"K1" representa una constante que utilizamos para aumentar la frecuencia cuando el error es negativo, y "K2" para reducir la frecuencia cuando el error es positivo.

CV esta acotado entre dos valores que CVmin, y CVmax.

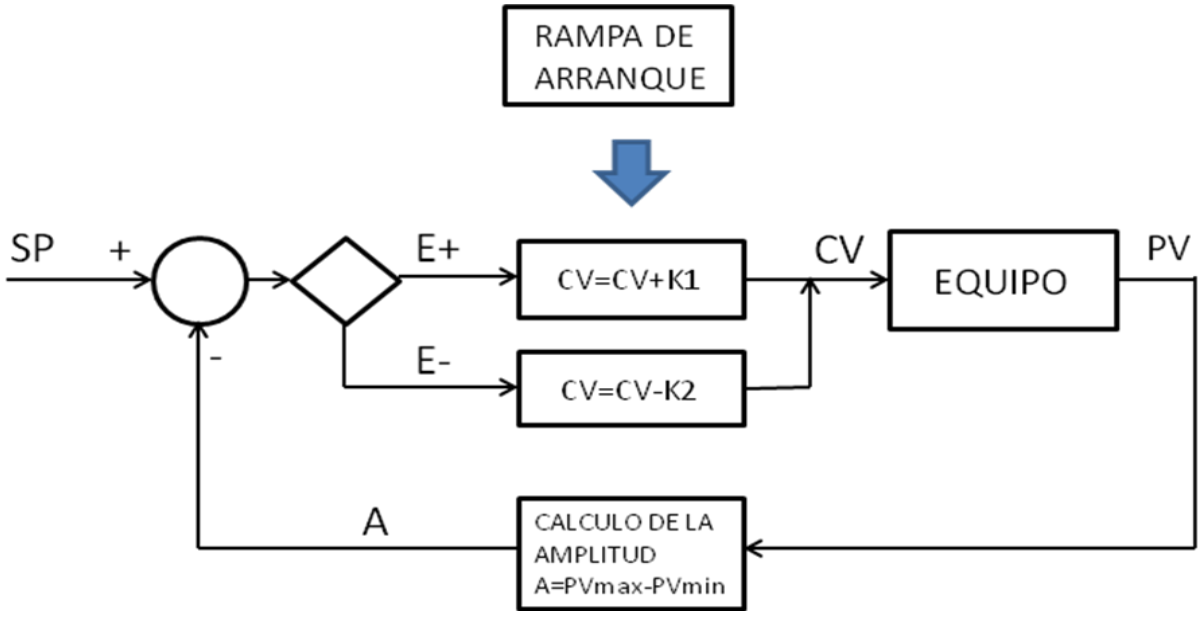


Figura 11: Diagrama del Algoritmo de control

El avance del ensayo se determina, teniendo en cuenta la frecuencia a la cual está operando el variador de frecuencia. Se contabilizan solo los ciclos realizados dentro del rango de la amplitud de oscilación requerida. El reseteo de los ciclos se puede hacer mediante un pulsador ubicado en el interior del tablero.

En la Tabla 1, se presentan las frecuencias de operación de los distintos elementos involucrados en la medición.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1: Frecuencias de operación de componentes

Instrumento	Tiempo de respuesta	Frecuencia de lectura
Traductor de distancia	-	30Hz (Máxima)
Módulo analógico	250µs	4000Hz
PLC	0,25µs	4000000Hz

El límite de frecuencia de la medición lo impone el traductor de distancia, con un valor de lectura de 30Hz.

3. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado se encuentra en operación, y cumple los requisitos para los que fue diseñado, facilitando significativamente la gestión de los ensayos. En tal sentido cabe destacar que, conforme a pruebas realizadas, el ajuste de frecuencia en el rango de 0,05Hz permite que el sistema automático, logre mantener la amplitud de las oscilaciones dentro del rango de más menos 5% del valor nominal de referencia.

Vista la versatilidad del sistema de control desarrollado, en el mismo se pueden plantear las siguientes mejoras:

- Setear el rango de oscilación y la frecuencia mínima de arranque desde la pantalla HMI.
- Parada automática del ensayo cuando llega a la cantidad de ciclos requeridos.
- Cambiar el lazo de control utilizado, por un PID para llegar a los valores requeridos más rápidamente.
- Supervisar el ensayo vía Celular o PC a distancia.
- Agregar finales de carrera que detecten anomalías en el ensayo y lo detengan automáticamente.

4. REFERENCIAS

[1] Delta Electronics Inc., *Manual de aplicaciones PLC DVP*, Revisión 2010.

[2] Delta Electronics Inc., *VFD-E User Manual*.

[3] Delta Electronics Inc., *DOP Series HMI User Manual*.

[4] Turck Industrial Automation, Ficha *técnica Sensor Inductivo con salida analógica- - NI25-CK40-LIU-H1141.*

[5] Delta Electronics Inc, *Instruction sheet DVP04AD-S*.

[6] Enrique Mandado Perez, A*utómatas programables y sistemas de automatización,* Alfaomega, Segunda Edición, 2009.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO Y ANALISIS DE UNA PINZA DE MANIPULACION, PARA BRAZOS ROBÓTICOS, CONSTRUIDA POR IMPRESIÓN 3D

G. Blanch[1], C.A. Mainetti[2], A.E. Romero[1], A. Breno[1] y M.T. Piovan [1,3]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada
Universidad Tecnológica Nacional FRBB, 11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina
correo-e: mpiovan@frbb.utn.edu.ar
[2] Departamento de Ingeniería Eléctrica – Universidad Tecnológica Nacional FRBB.
[3] CONICET: Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada, UTN FRBB

RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo constructivo y descripción de los estudios de la respuesta mecánica de una pinza de manipulación de dos mordazas para ser montada en un brazo robótico. La pinza ha sido construida casi en su totalidad con ácido poliláctico (PLA) mediante una impresora 3D. La pinza como sistema mecánico consta de dos mordazas de presión que son actuadas por un mecanismo de movimiento paralelo accionado por un conjunto tornillo sinfín-doble corona. Siendo la entrada de potencia motora conectada al sin-fin. En los extremos de las mordazas se han montado sensores de presión vinculados a adquisidores de señales y a microcontroladores de tecnología Arduino.

Se efectúa una descripción de los protocolos de diseño 3D asociados a la pinza y a su construcción por impresión 3D. Por otro lado se muestran comparaciones de la capacidad de carga y capacidad de apriete en la punta de la pinza. Se evalúa la rapidez de cierre y apriete de las mordazas en función de diversos parámetros del motor y grados de calidad de terminación/ajuste de los componentes mecánicos.

Finalmente se establece una comparación del costo contrastado con métodos convencionales de fabricación y con otras variantes de diseño, ponderando a su vez funcionalidad, durabilidad, facilidad de reemplazo, etc.

Palabras Claves: *Impresión 3D, manipulador robótico, resistencia.*

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y construcción de componentes mecánicos para manipuladores robóticos trae siempre aparejado la toma de decisiones sobre un conjunto de aspectos que intervienen fuertemente en el resultado final y costo de cada componente o bien de todo el manipulador. En la literatura abierta internacional existen muchos tipos distintos de pinzas, garras o manos para robots especialmente para manipulación de cargas en variadas aplicaciones [1,2], cada una de ellas con sus características ventajas y limitaciones. El concepto de “gripper” o pinza se ha extendido en la literatura técnica como el elemento que condensa diversas topologías de pinzas o garras, las que pueden ser de dos, tres, n mordazas, impulsadas con sistemas de transmisión por engranes sin-fin/corona entre otros [1,2,3].

El esquema más típico, que a pesar de ser histórico no por ello perimido, es el modelo de dos dedos cuyas mordazas son actuadas por un sistema de barras articuladas paralelas, dos de ellas conectadas a un par de ruedas dentadas motorizadas por un tornillo sin-fin [2,3]. En este esquema el efector final tiene una ventaja en la capacidad de autobloqueo que ofrece la transmisión sin-fin corona, evitando que se abra por exceso de carga actuante en las mordazas. En este tipo de manipuladores existen varios aspectos a tener en cuenta para su diseño y construcción, resaltando los costos de maquinado y el peso. Actualmente, las tecnologías de construcción aditiva, también llamadas de impresión 3D, están ofreciendo una alternativa muy interesante para la fabricación de piezas volumétricas complejas a costos relativamente bajos. Existen manipuladores simples que para cumplir funciones básicas pueden llegar a costar alrededor de U$ 2000 en adelante, si están hechos en metal (aluminio u otras aleaciones), mientras que sus contrapartes construidas por impresión 3D de plásticos costarían alrededor de U$ 150 en adelante [4].

La idea subyacente en este trabajo es la presentación de las etapas de diseño, análisis y construcción de una pinza de manipulación fabricado por impresión 3D siguiendo el método de deposición de filamento plástico (MDFP). La pinza formará parte de un subsistema a ser montado en una plataforma robótica prototipo ya construida para traslado y disposición de cargas peligrosas [5]. El artículo está ordenado de la siguiente manera: Luego de la introducción se hace una descripción de los objetivos del estudio y la forma de diseño más los aspectos vinculados a la construcción de la pinza. Luego se presenta el esquema de control de transmisión y fuerza en los dedos de la pinza. Se analizan los aspectos de funcionalidad en relación a la sensibilidad que ofrecen los sensores y la versatilidad del micro-controlador de la familia Arduino [6]. Finalmente se hace una evaluación de los costos en forma comparativa con procedimientos de construcción convencionales (mecanizado, desbaste, moldeo, etc).

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. CONDICIONES DEL PROBLEMA Y DESCRIPCIÓN DE LA PINZA

Se ha planteado la necesidad de contar con una pinza para ser incorporada a un brazo articulado montado en una plataforma de robot ya desarrollada y construida [5], cuya finalidad es la manipulación de cargas peligrosas. En el proceso de diseño de la pinza se han establecido una serie de condiciones y objetivos, que se describen a continuación:

a) Debe ser simple de fabricar y reponer en caso de rotura.

b) Debe ser liviana y del más bajo costo posible.

c) Debe poder resistir pesos de hasta 5 kg.

d) Debe permitir el uso de controladores de presión.

e) Se debe garantizar el agarre sin riesgo de escape por condiciones mecánicas.

A partir de estas primeras condiciones se ha optado por un diseño que contemple el uso de dos dedos rígidos con un acercamiento en movimiento paralelo accionado por un sistema de bieletas en paralelogramo y traccionado por un sin-fin doble corona; cumpliendo aquí con la condición e). Luego de varias concepciones se ha optado por un prototipo de pinza, cuyo diseño se muestra en la Figura 1 donde, claramente, se puede apreciar el tipo de transmisión de movimiento en cada etapa.

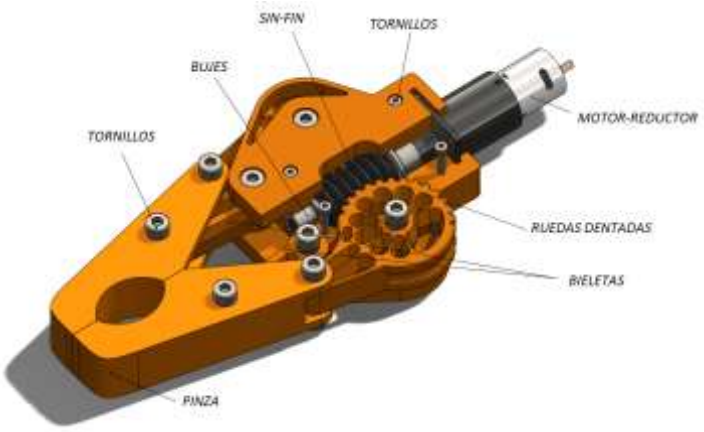


Figura 1: Prototipo de la pinza

En virtud de la exigencias enmarcadas en las condiciones a) y b) y teniendo en cuenta que en Argentina el costo de materiales convencionales livianos (aluminio y bronce entre otros los metales, y delrin y grilon entre los plásticos) es elevado, sumado a los costos de los, cada vez más sofisticados, procesos de CNC y mano de obra especializada, y teniendo experiencia y acceso a tecnología de construcción aditiva, se ha decidido por construir el prototipo en esta última manera o

ISBN: 978-987-1676-63-7

impresión 3D por el método de deposición de filamento plástico. En la Figura 2 se muestran las piezas tal cual como serían puestas a imprimir. Nótese, de la Figura 2(c), que el tornillo se ha pensado construir en dos mitades para ser ensamblado por pegamento tipo cianoacrilato (Poximix, Suprabond, etc.). Esto se ha hecho con el espíritu de mitigar algunos efectos indeseados en la impresión 3D, como por ejemplo colapsos por falta de soportes adecuados entre otros. Si bien la alternativa constructiva del sin-fin pareció apropiada, resultó poco fiable, conduciendo al empleo de otro material, como se verá más adelante. El sin-fin y las ruedas dentadas tienen una reducción 1:28. Se han practicado huecos en los diseños de la rueda dentada, la palanca y la tapa, según se observa en las Figuras 2(a), 2(b) y 2(e). Esto se ha hecho con la finalidad de cumplimentar con el objetivo b).

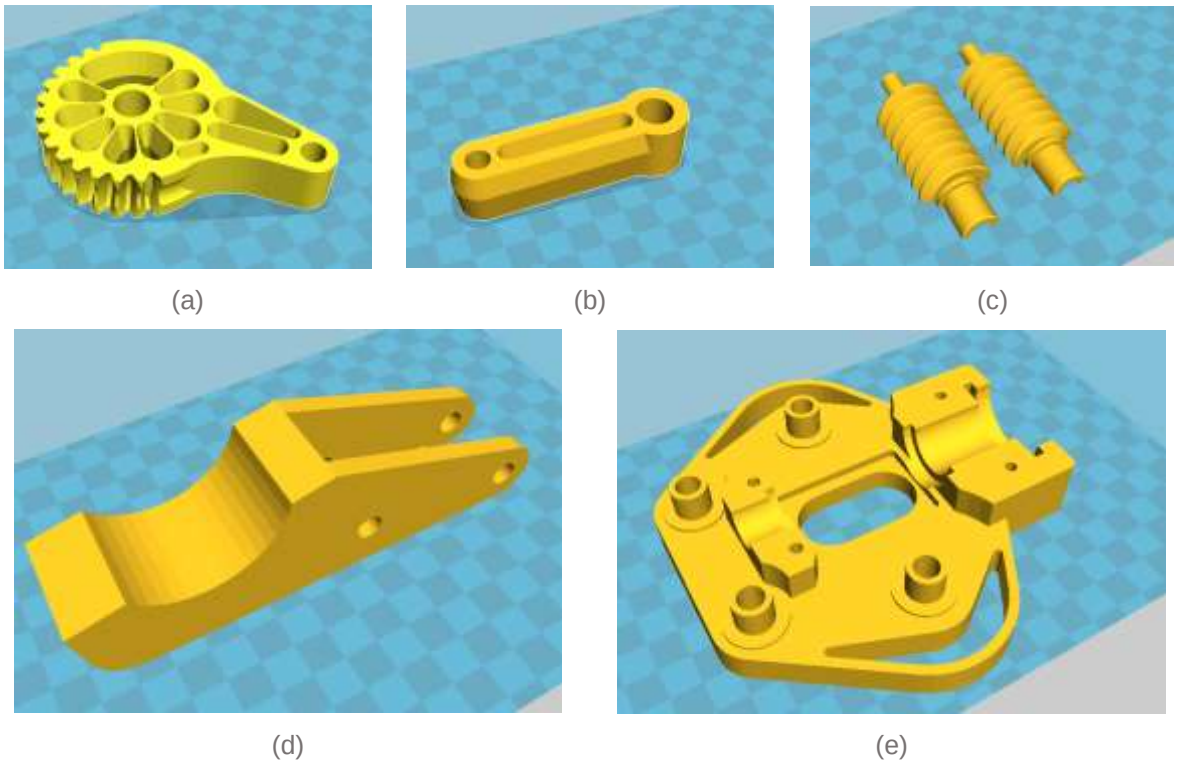


Figura 2: Partes del prototipo

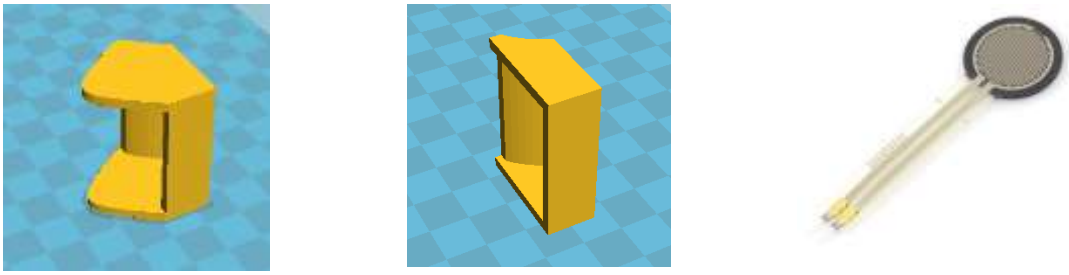
Las tapas, como las que se muestran en la Figura 2(e) tienen en su base distintos remates para favorecer el montaje encapsulado de tuercas y tornillos de tipo Allen, como se puede apreciar en los detalles remarcados en la siguiente Figura 3. Se han empleado tornillos Allen normalizados MC8 y MC4 con ajustes y precisión bastos. A su vez para fijar el sensor de presión se han diseñado dos dedales a ser montados en el extremo táctil de cada pinza. En la Figura 4 se muestran dos alternativas de diseño de los dedales junto con el sensor fuerza.

ISBN: 978-987-1676-63-7



(a) (b)

Figura 3: detalles de las tapas (a) inferior (b) superior



(a) (b) (c)

Figura 4: (a), (b) Posibles dedales para en montaje del sensor de presión (c).

Las ruedas dentadas y las palancas se montan dentro de los tacos cilíndricos que se observan en la Figura 2(e). Con esto se ha intentado reducir la fricción metal/plástico a un mínimo razonable.

Para la motorizar la pinza se ha montado un motor-reductor de la marca Ignis MR85, que tiene una potencia máxima de hasta 20W en corriente continua. El anclaje del mismo se halla en los extremos de las tapas/bases superior e inferior. Este motor es ideal para ser controlado por medio de placas del tipo Arduino.

3. DETALLES DE IMPRESIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA PINZA

De todas las alternativas de plásticos disponibles para impresión 3D se ha optado por el denominado ácido poli-láctico, o PLA por su jerga más común, debido a facilidad de acceso, bajos costos y calidad de impresión. El PLA posee una muy buena resistencia mecánica adosada a su facilidad de uso [7,8] y su alta disponibilidad en el mercado argentino, además que se trata del segundo material más barato en el país.

El protocolo de impresión se ha programado para ser hecho con un pico extrusor de 0.35 mm, y sobre una plataforma calefaccionada. Las temperaturas de pico extrusor y plataforma han sido de

190°C y 50°C respectivamente. Se ha empleado el método de adherencia por cinta de enmascarar azul rugosa en la plataforma con goma de pegar en barra (tipo Voligoma) sobre ella; mismo que ha demostrado ser, en experiencia de los autores, más eficiente que el uso de Poli-Vinil Acetato (PVA o fijador de cabello) sobre el vidrio de la plataforma. Con esto se evitan, en las piezas de mayor porte, potenciales alabeos y sectores despegados. El esquema de impresión de las piezas involucró un contorno externo de 1.05 mm de espesor (implicando 3 perímetros) y un relleno interno (llamado "infill" en la jerga) de entre el 20% y 33% según la pieza, mientras que el espesor de capa ha sido fijado en una precisión de 0.20 mm. Lo cual otorga un grado de terminación bueno para la funcionalidad del conjunto.

Tabla 1. Características de las piezas impresas

Pieza	Peso [grs]	Infill [%]	Tiempo [hs]
2 Mordazas/pinza	96.20	25	14.40
2 Ruedas dentadas	74.00	25	12.84
2 Bieletas/palancas	31.00	25	5.06
Tornillo Sin-fin (en mitades)	19.00	33	1.35
Tapa superior	24.86	20	11.83
Tapa Inferior	25.13	20	11.25
2 Dedales. Fig 4(a)	15.50	25	1.25
2 Dedales. Fig 4(b)	13.08	25	0.75
Tornillo Sin-fin (*)	32.50	--	0.80

(*) Construido en Delrin

En la Tabla 1 se consigna un registro de las características de peso, refuerzo interno (infill) y tiempo de fabricación de las piezas construidas por impresión 3D y la única pieza construida por torneado. En la Figura 5 se muestra la terminación de la pinza con su ensamble, en particular en la Figura 5(a) se muestra un ensamble preliminar con el tornillo construido en PLA negro, mientras que en la Figura 5(b) se muestra el ensamble completo final con el tornillo que fue construido en Delrin y con el pre-montaje de los dedos sensitivos, optándose por la alternativa de la Figura 4(a). Esto se ha hecho con el fin de evitar posibles roturas en los laterales de las mordazas por un mecanizado que exige mucha precisión en caso de los dedales de la Figura 4(b).

La razón de usar un tornillo sin-fin construido con Delrin por torneado convencional obedeció a una serie inconvenientes vinculados con el ensamblado de los casquillos para los cojinetes y montaje del motor-reductor y en particular con los huelgos reales entre las coronas y el sin-fin lo que condujo a la rotura y/o atascamiento de varios casos según se aprecia en la Figura 6. El sin-fin hecho en PLA color negro condujo a fuertes atascamientos por no tener suficiente holgura,

ISBN: 978-987-1676-63-7

poniendo en riesgo la integridad del conjunto. Por otro lado, el sin-fin naranja se rompió en ensayos preliminares lo que indujo a cambiar el diseño y optar por el Delrin.



(a)



(b)

Figura 5: Pinza impresa (a) Ensamble preliminar (b) Ensamble completo



Figura 6: Distintos tornillos sin-fin empleados: Negro y naranja en PLA, blanco en Delrin

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE FUERZA

Siendo que el objetivo central de este desarrollo es montar la pinza en un brazo de una plataforma robot para manipulación de cargas u objetos de riesgo, uno de los aspectos cruciales de aquella es contar con un sistema que dote a la pinza de cierta sensibilidad para la manipulación de objetos delicados y frenar automáticamente el accionamiento de agarre, a partir de valores prefijados en la presión sobre el objeto.

El sistema implementado se basa en una plataforma Arduino UNO, el cual controla el manipulador a partir de un motor de corriente continua comandado por un circuito adaptador de potencia (driver). Sobre una de las mordazas se ha acoplado mecánicamente, un sensor de fuerza (modelo SFR402) de la firma Interlink Electronics. El acoplamiento posee agujero ranura con suficiente holgura para permitir el contacto y luego el sensado de presión.

ISBN: 978-987-1676-63-7

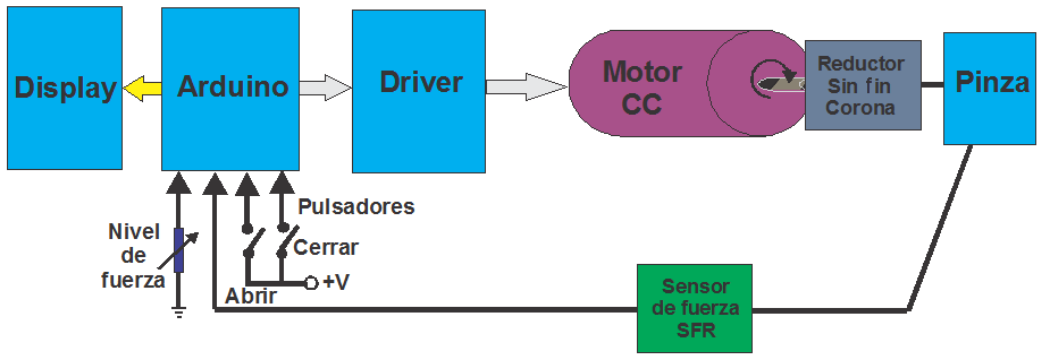


Figura 7: Diagrama en bloques del sistema implementado.

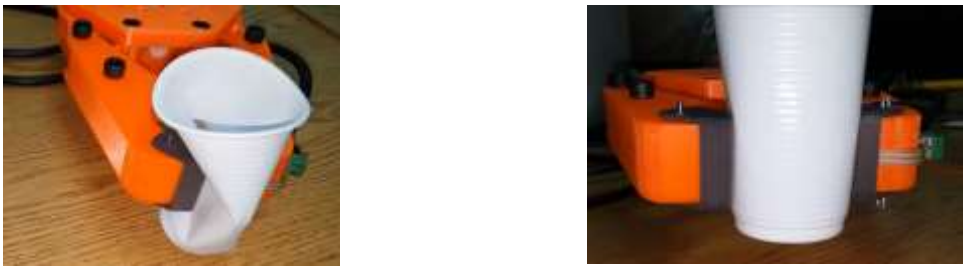
En la Figura 7 se describe el diagrama en bloques del sistema con las conexiones de los controladores Arduino, en tanto que en la Figura 8(a) se muestra el montaje de la placa y drivers junto con su conexión al sensor de presión ubicado en la gema de una de las mordazas según se aprecia en la Figura 8(b).



(a) (b)

Figura 8 (a) Sistema Completo (b) Detalle de la ubicación del sensor

En la Figura 9 se disponen dos imágenes del comportamiento de la pinza ante dos condiciones de presión prescritas (fijadas con el potenciómetro) actuando sobre un vaso de papel.



(a) (b)

Figura 9 (a) Presión firme (b) Presión ligera

ISBN: 978-987-1676-63-7

En particular, el enlace de la Referencia [10] permite ver un video vinculado a la Figura 9(a) muestra una presión firme hasta aplastar el vaso de papel. Por otro lado, en el enlace de la Referencia [11] se muestra un video asociado a la Figura 9(b), observándose que el vaso es ligeramente sujetado si obrar mayor daño o presión que la que puede ejecutar una mano humana que sujeta un vaso de café.

5. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

El tiempo total de construcción de las piezas impresas, tal como se indica en la Tabla 1, ha sido de 59.53 hs, sin embargo en razón de verdad se deben añadir no menos de 15 hs. para limpieza y ajuste de rebabas y restos de proceso de impresión sobre el total de las piezas. Se debe mencionar que ha habido piezas falladas, aunque mayormente debido a cortes abruptos del suministro eléctrico. El peso de todos los componentes impresos empleados en la pinza, tomando en cuenta la Tabla 1, es de 285.69 grs. Sin embargo a esto se deben agregar otros 40 grs de peso de filamento PLA que corresponde a piezas de suplemento y pérdidas de material vinculadas con la impresión (soportes y tramados de adherencia a la plataforma de impresión), con todo no alcanzó los 350 grs de PLA. El costo del consumo eléctrico obtenido de facturas de consumo domiciliarias se halla entre 0.60 y 0.90 AR$/KWh, mientras que el consumo medio de una impresora 3D oscila los 0.250 KWh, casi como una PC simple. El costo de mano de obra corresponde al nomenclador “Operario Calificado” en la Tabla de Escalas Salariales ofrecidas en la página web de la UOM [9].

En la Tabla 2 se muestra un desglose de los costos de construcción inherentes a la pinza con las valoraciones máximas de cada ítem correspondientes a Abril 2016.

Tabla 2. Desglose de los costos de construcción.

Item	Insumo	Costo Unitario	Costo Total [AR$]
Plástico PLA	350.00 grs.	400.00 AR$/Kg	140.00
Placa Arduino, driver y sensor			480.00
Tornillo maquinado Delrin			100.00
Mano obra limpieza piezas	15.00 hs.	49.76 AR$/h	746.40
Electricidad	80.00 hs.	0.90 AR$/KW	18.00
Total			**1484.40**

Como puede apreciarse en la Tabla 2, el costo total estimativo ascendería 1484.40 pesos o su equivalente a poco más de 100.00 dólares estadounidenses. Nótese que el mayor costo comparativo corresponde al servicio de mano de obra de limpieza (el cual es estimativo pues, en

ISBN: 978-987-1676-63-7

razón de verdad, esto ha sido hecho por los autores al igual que el maquinado del tornillo en Delrin). En suma, el costo de construcción es casi comparable, o incluso bastante menor, a varios casos similares observados en la literatura abierta internacional [2], a pesar de tener aspectos de encarecimiento devenidos de la importación de insumos como los microcontroladores y los sensores. A su vez el desarrollo completo no demandó más de tres meses con dedicación a tiempo parcial de los autores.

Se han evaluado algunas alternativas de diseño en los componentes previendo potenciales riesgos de rotura en algunas piezas, por concentración de tensiones, especialmente en las ruedas dentadas y las palancas, que en los diseños construidos efectivamente tienen mucha reducción de volumen, con la pretensión de hacer más liviana la pinza. Una comparación, solo en el contexto de los programas de diseño e impresión 3D, de las piezas de la Figura 2(a) y 2(b) considerando y sin considerar los huecos arroja que habría un ahorro de material del 12% sin embargo con un consumo de tiempo mayor al 28%. Aun así, en la pinza completamente ensamblada que se muestra en la Figura 8(b), el peso de los materiales plásticos corresponde casi a la tercera parte del peso total, siendo el resto del peso el correspondiente al motor-reductor y los tornillos.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los aspectos de diseño, construcción y demostración de manipulación de una pinza para ser montada en una plataforma de robot. La construcción se ha efectuado por impresión 3D en ácido poliláctico y el control fuerza y detención del motor-reductor efectuado con microcontroladores de la familia Arduino. De todo el conjunto de actividades llevadas a cabo se pueden extractar las siguientes conclusiones:

a) Se puede lograr una pinza de manipulación para robots del orden de 100 dólares, suficientemente robusta, empleando impresión 3D.

b) El tiempo de desarrollo ha sido relativamente corto.

c) Se han extraído conclusiones importantes en cuanto a las técnicas de impresión 3D, en lo atinente a reducción de tiempos de impresión a partir de cambios en la geometría.

La resistencia ante diversas solicitaciones reviste un aspecto muy importante en los diseños de este tipo de conjuntos mecánicos, especialmente cuando los modelos de análisis computacional no están del todo definidos y claros como en las construcciones por impresión 3D de la actualidad. Este aspecto, debido a su longitud e importancia será tratado en investigaciones próximas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

7. REFERENCIAS

[1] Singh P., Kumar A., Vashitsth M. *Design of a Robotic Arm with Gripper and End Effector for Spot Welding*. Universal Journal of Mechanical Engineering, 1, 3, 92-97, 2013.

[2] Telegenov K., Telegenov Y., Shintemirov A. *A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes*. IEEE Access, 3, 638-647, 2015.

[3] Rateni G., Cianchetti M., Ciuti G., Menciassi A., Laschi, C. *Design and development of a soft robotic gripper for manipulation in minimally invasive surgery: a proof of concept*. Meccanica, 50, 2855-2863, 2015.

[4] Franchi G., Ten Pas A., Platt R., Panzieri S. *The Baxter Easyhand: A Robot Hand that costs $150 US in parts*. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), ISBN 978-1-4799-9994-1, sep.28-oct.2 2015, Hamburgo, Alemania.

[5] Mainetti C, Romero A., Piovan M.T. *Plataforma multipropósito para aplicación en robots manipuladores de cargas peligrosas*, Actas del IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, sep.2-5 2014, Resistencia, Chaco, Argentina.

[6] Mc.Roberts, M.R. *Earthshine Design Arduino Starters Kit Manual - A Complete Beginners Guide to the Arduino 2nd Edition*. Earthshine Design, United Kingdom, 2009.

[7] Piovan M.T., Romero A. *Caracterización de plásticos para impresoras 3D*. Actas del IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, sep.2-5 2014, Resistencia, Chaco, Argentina.

[8] Tymrak B.M., Kreiger M., Pearce J.M. *Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions*. Materials and Design, 58, 242-246, 2014.

[9] C.C.T. N°260/75 Salarios Anexo A: Rama 17 Metalmecánica y otras. https://s3-us-west-2.amazonaws.com/uom-acuerdos/ANEXO_A_2016.pdf.

[10] https://youtu.be/7CM7ud_Rjjc

[11] https://youtu.be/5_qXg6lTb2g

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional a través del PID 2194TC por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de esta publicación y a CONICET.

Sistema automatizado de riego por pulsos

Pedro D. Bocca[1], Osbaldo H. Penisi[2], Alejandro Quiroga[1], Juan B. Vuanello[1], Oscar Dölling[1] y Huaman Victor[1].

[1] Universidad Nacional de San Juan – Facultad de Ingeniería
Departamento Ingeniería Electromecánica
Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109, San Juan, Argentina
Correo-e: pedrobocca13@gmail.com

[2] Universidad Nacional de San Juan – Facultad de Ingeniería – Instituto de Mecánica Aplicada
Av. Lib. San Martín (Oeste) 1109, San Juan, Argentina
Correo-e: openisi@unsj.edu.ar

RESUMEN

En las zonas desérticas, la escasa disponibilidad de agua limita la actividad agropecuaria. Además, es sabido que cualquier exceso en el aporte de agua realizado a la planta no puede ser aprovechado y se desperdicia.

Es por ello que se optó por armar un sistema de control moderno que permita, implementando nuevas tecnologías, adaptarse a las distintas necesidades y poder ser usado para controlar la cantidad de agua usada, aprovechando las características del suelo, reduciendo las pérdidas por infiltración profunda y desagüe al final del sembrado. Se ha comprobado que al controlar el agua de forma pulsante se logra reducir considerablemente las pérdidas de agua por infiltración permitiendo que la misma alcance niveles controlados.

El trabajo se compone de una fase teórica, que busca adquirir los conocimientos necesarios para poder evaluar las distintas partes que conforman el proyecto. Una fase económica, que analizan los márgenes de costos y su viabilidad como negocio, para ser considerados en la fase de diseño. Una fase de diseño, en donde se crea el sistema y se abordan los distintos problemas técnicos, ajustándose a los requerimientos del terreno y los costos. Y una fase de experimentación en el sistema de control diseñado, donde se realizan las pruebas con los elementos de los que se disponen y ensayando su funcionamiento.

Mediante este sistema se consigue una reducción en el consumo de agua que puede alcanzar el 50 % del consumo de la misma que se utiliza en los sistemas de riego convencionales, siendo además un sistema versátil para su adaptación a las distintas condiciones de terreno y ampliación de cultivo.

Palabras claves: *Automatización, sistema de control, riego por pulsos, agricultura.*

1. Introducción

En las zonas desérticas, la escasa disponibilidad de agua limita la actividad agropecuaria. Además, es sabido que cualquier exceso en el aporte de agua realizado a la planta no puede ser aprovechado y se desperdicia. Actualmente en la provincia de San Juan, la zona cultivable es abastecida con el agua proveniente de embalses del único rio que atraviesa el valle, el sistema de riego predominante en la zona corresponde al riego por manto, el cual requiere grandes cantidades de agua para lograr una óptima irrigación, produce un gran desperdicio y una saturación en las napas de agua.

Otro sistema utilizado es el riego por goteo, el cual aporta a cada planta la cantidad de agua que necesita para desarrollarse, teniendo este sistema algunas ventajas y desventajas, en particular estas últimas en el costo inicial de la instalación y en su mantenimiento posterior, además de una elevada concentración de sales en zonas áridas [1].

Otro sistema que se usa en estos casos para regar el cultivo, es el denominado riego por pulso, el cual requiere de mucho menos costo de instalación y mantenimiento [2].

En Estados Unidos, a partir de la década del 70, se desarrolló un sistema de riego que pudiera reducir el consumo de agua por hectárea sembrada en zonas áridas, que permitiera además el control de la salinidad del suelo, dando origen al riego por pulsos [3].

A los fines de hacer más eficiente el uso del agua se optó en este trabajo por armar un sistema de control moderno que permita, implementando nuevas tecnologías, controlar el flujo de agua de forma eficiente, ya sea para ser utilizado a nivel de distribución, como en las propias fincas de producción. Se ha comprobado que al controlar el agua de forma pulsante se logra reducir considerablemente las pérdidas de agua por infiltración permitiendo que la misma alcance niveles controlados.

En este trabajo se desarrolla el concepto del sistema de riego por pulso como así también el método propuesto para ejercer el control del manejo del agua a criterio y necesidad del productor según sea su extensión y cantidad de agua que requiera el tipo de suelo como el tipo de cultivo que se tenga.

El sistema que se propone puede ser usado para impedir las pérdidas de agua hacia las fincas en largas distancias en la etapa de conducción y distribución hasta las propiedades que la usarán y a su vez puede ser empleado como un muy efectivo sistema de riego, ya que se reduce considerablemente la percolación (infiltración de agua en el suelo) profunda, la que no es aprovechada por la planta o se pierde en los canales de distribución.

2. Descripción de la Técnica

Se denomina Riego por Caudal Discontinuo a una Técnica Aplicada que fue desarrollada en los EEUU a fines de la década de los 70 para el control de la percolación del agua de riego. Su origen se debió a la necesidad del gobierno norteamericano de proveer a sus agricultores de un medio económico y eficaz que permita controlar la infiltración en suelos salinos. Es una de las prácticas de

ISBN: 978-987-1676-63-7

mayor eficiencia en el uso de agua y así fue designada por el Departamento de Agricultura de EEUU ("best management practice") [3].

Se supone un lote regado desde la cabecera por donde se vuelca un cierto caudal Q de agua en cada surco, que además se tiene la posibilidad de cortar y habilitar el abastecimiento de agua a todos los surcos simultáneamente. Esta metodología comprende dos etapas: Avance y Remojo.

2.1. Avance

En este período el objetivo es el mojado rápido del surco a todo lo largo. Esto se logra con pulsos de agua en el surco, alternando un periodo de escurrimiento de agua y otro de similar duración de reposo del suelo, de modo que en forma gradual o por ciclos se moja hasta el final.

Se inicia el AVANCE con el primer ciclo mojando los surcos como se observa en la Figura 1, supongamos que alcanza un cuarto de la longitud, y seguidamente se corta el flujo de agua, permitiendo que el suelo se "oree". El segundo ciclo, comienza atravesando la parte del surco ya mojada avanzando más rápidamente (casi sin infiltrar) hasta el segundo sector seco. Entonces moja la segunda cuarta parte del surco y la cortamos cuando llega a la mitad. Repitiendo estos ciclos cuatro veces se alcanzará el extremo final del surco.

Este proceso de arrancar-parar o "mojar y orear" produce ciertas transformaciones en la estructura del suelo que permite alcanzar rápidamente la mínima capacidad de infiltración a todo lo largo del surco, las cuales son:

- Oclusión de los poros
- Expansión de las arcillas
- Tensión Superficial



Figura 1: Ciclo de avance, representado en un corte de un surco, donde cada línea en azul representa un ciclo de mojado

2.2 Remojo

Cuando se logre igualar la capacidad de infiltración a todo lo largo del surco, se estará en condiciones de iniciar el REMOJO, que consistirá en abrir el flujo de agua un tiempo determinado y cortarlo por la misma duración. En la Figura 2 se puede observar que el volumen de agua aportado durante ese período es capaz de infiltrarse en su totalidad a lo largo del surco en forma homogénea, logrando

ISBN: 978-987-1676-63-7

además eliminar (o minimizar) el coleo o desagüe que se produce por el agua que no infiltro a lo largo del surco y puede o no ser aprovechada en reservorios inferiores.



Figura 2: Ciclo de remojo más avance, representado en un corte de un surco, donde cada línea en azul representa un ciclo completo

3. Ventajas del Riego por Caudal Discontinuo con respecto al riego tradicional

1. Ahorro de Agua: Evitando la percolación profunda y el desagüe al final del lote, pudiendo lograr mejorar la eficiencia en la aplicación del agua. El efecto "pulso" permite administrar el agua desde la cabecera, logrando un desarrollo de la capa húmeda del subsuelo extremadamente pareja entre la cabecera y el pie de surco.
2. Surcos más largos: Dependiendo de las condiciones de terreno, los surcos podrán ser mucho más largos que los habituales en riego tradicional. Se trabaja con valores de 600 a 800 metros como normal.
3. Mayor rango de pendientes: Nos permite ampliar el rango de pendientes del terreno, minimizando así los altos costos de nivelación. Se puede trabajar desde 0.1 % hasta 1.5 %.
4. Bajo costo de mantenimiento: Dado que no tiene partes complejas ni sometidas a presión, estos costos son prácticamente nulos.

4. Planteamiento del sistema

Para garantizar la correcta irrigación del campo, el sistema deberá alternar entre dos brazos en una rama principal, para reducir las pérdidas por percolación profunda y drenaje al final del surco como lo indican las Figura 3 y 4; en las cuales la manga es el distribuidor de agua a cada surco que se debe regar, estas deben ser alimentadas por un conducto de derivación y este por uno principal que es alimentado por una bomba que proveerá el caudal y presión necesarios. La bomba se alimentará de un reservorio donde llegará a almacenarse el agua que proviene del canal de distribución a cada propiedad.

Se tienen además válvulas para poder controlar que conducto de derivación se alimenta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

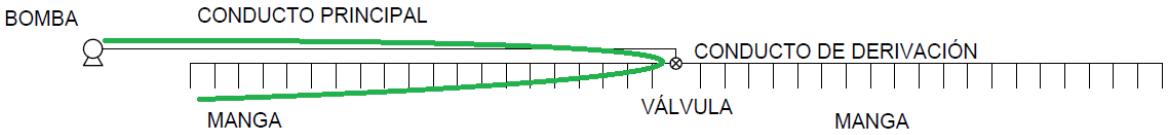


Figura 3: Primer ciclo de funcionamiento

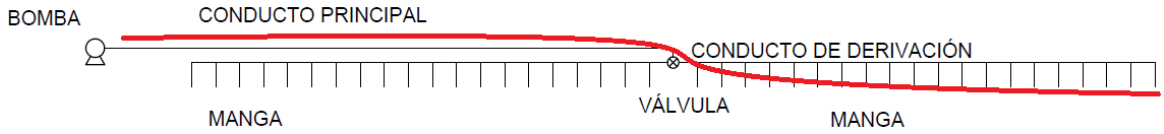


Figura 4: Segundo ciclo de funcionamiento

Para comandar el sistema físico descripto se ha pensado en tener dos sistemas uno para la interacción con el operador y para el control operativo de bomba denominado control central y otro para controlar cada rama compuesta por dos válvulas denominado control de válvulas.

4.1 Comando central

Este sistema es la interfaz de comunicación entre el operador y el sistema a comandar, a través del cual se deben ingresar todos los parámetros necesarios para el funcionamiento controlado del sistema físico.

4.1.1 Opciones del sistema

El diagrama de bloques del sistema de comando central se puede observar en la Figura 5. Contará con una pantalla de presentación indicando su nombre y versión, y luego mostrará las opciones principales, cuya descripción se describen a continuación:

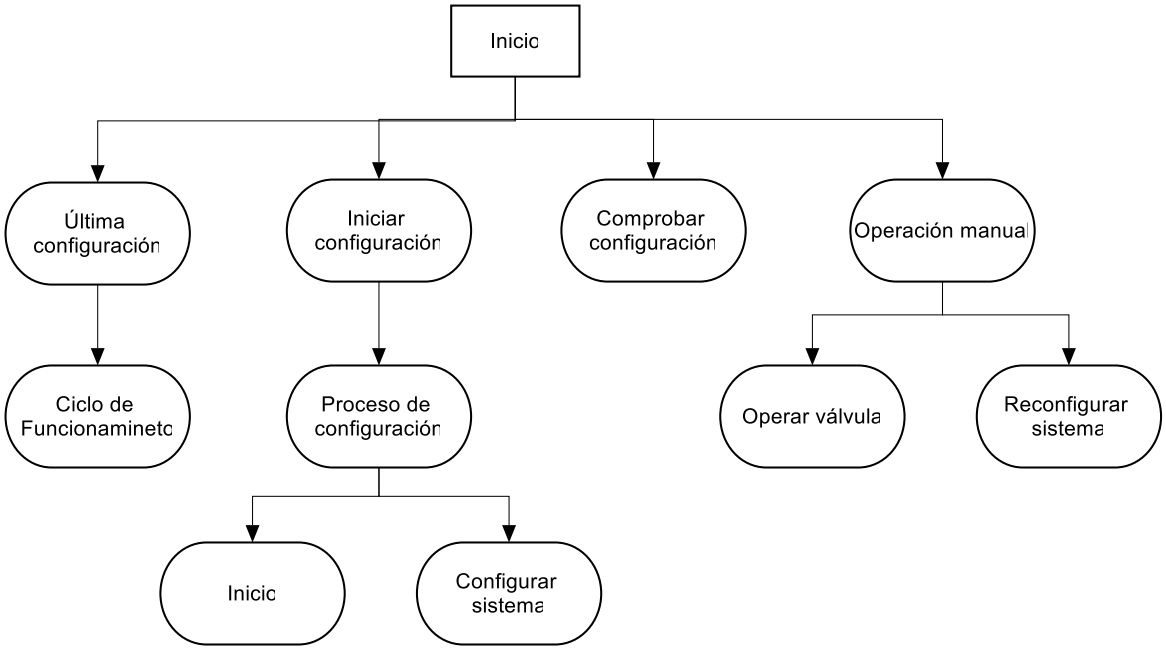


Figura 5: Opciones del sistema de control central

Última configuración: Esta función iniciará el ciclo de funcionamiento completo del sistema de riego. El mismo comprobará las ramas, y de no estar configuradas les mandará una señal con los parámetros de configuración. En caso de que el sistema no esté configurado volverá al inicio.
Iniciar configuración: Esta opción nos permitirá configurar todas las variables para el funcionamiento del sistema.
Una vez configurado, el sistema calculará todos los factores requeridos para su correcto funcionamiento y luego brindará la opción de configurar el sistema o volver a inicio.
Comprobar configuración: El sistema verificará cuál es la configuración y la comparará con la configuración del sistema. De ser errónea lo informará en pantalla y volverá al inicio.
Operación manual: se divide en dos opciones principales:

1. Operar válvula: Este sistema permite activar cualquier válvula del sistema.
2. Reconfigurar sistema: En este caso, se enviará una señal a todas las válvulas con los parámetros de funcionamiento.

4.1.2 Ciclo de funcionamiento

El sistema de control dirige el funcionamiento de todo el sistema. En forma permanente controla los niveles de agua del reservorio. El funcionamiento de las ramas se inicia una vez que se alcanzó el nivel máximo de agua y entra en estado de pausa si se alcanza el nivel mínimo. La bomba se enciende una vez que la válvula ha confirmado el comando y ha activado el circuito correspondiente. Cada vez que un pulso termine, la válvula se lo indicará al centro de control para corroborar su funcionamiento; de no hacerlo la bomba se apagará ante un posible reinicio, corte de energía o mal funcionamiento de la válvula. Lo antes mencionado puede verse en el diagrama de flujo de la Figura 6.

ISBN: 978-987-1676-63-7

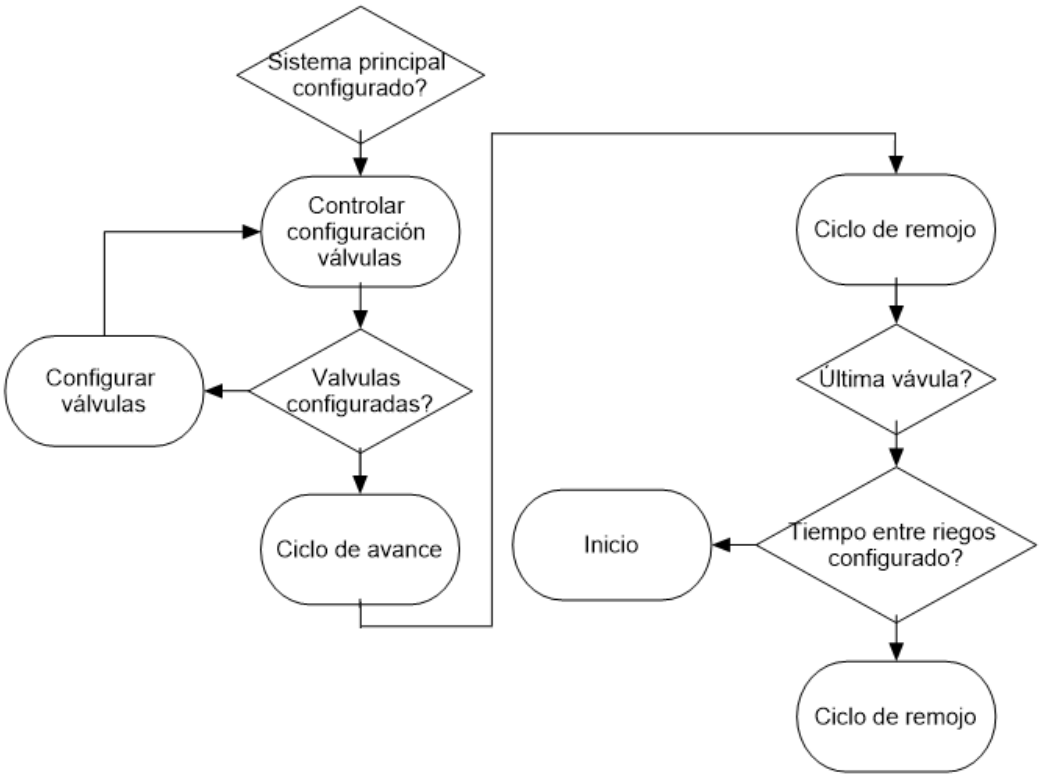


Figura 6: Ciclo de funcionamiento

4.2 Control de válvulas

Las válvulas se encargan de controlar el efecto de alternancia que produce el avance y el remojo mediante su apertura y cierre. Debido a que se emplea el mismo tiempo para mojar y orear el campo, se emplean dos circuitos que funcionan en forma opuesta para reducir el tiempo de riego.

4.2.1 Puesta en marcha

Al no poder controlar su último estado las válvulas esperan hasta que los capacitores se carguen y fuercen el cierre de ambas válvulas en secuencia, para evitar que alguna quede abierta. Este proceso lo indican encendiendo los dos ledes de estado.

Para indicar la válvula activada, se utilizan dos ledes que corresponden a cada válvula y un led indicador de energía. El sistema de control de las válvulas se opera a través del sistema central por medio de radio frecuencia. Una vez configuradas, las válvulas tienen la información para ejecutar el ciclo de riego en la rama que controlan.

4.3 Sistema de comunicación

Una de las principales innovaciones del sistema es la capacidad que tiene de comunicarse con los distintos elementos que lo componen. Esto se logra a través de radio frecuencia y transmisión en cadena, como se muestra en la Figura 7. Esto permite que el sistema de control central pueda

comunicarse con la última válvula, aunque la misma se encuentre fuera de su rango. El sistema está diseñado para que la señal tenga alcance suficiente para abarcar dos elementos, como se muestra en la Figura 8; esto permite que el sistema no colapse ante la caída de una de las válvulas.

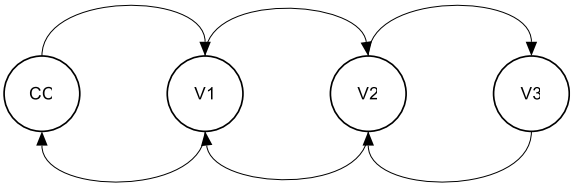


Figura 7: Comunicación en cadena con el control central y 3 válvulas

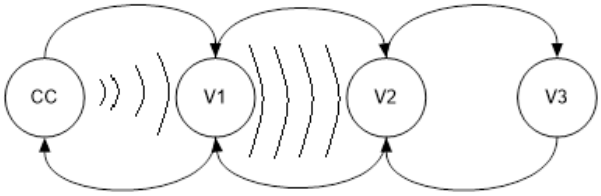


Figura 8: alcance de la señal desde el control central hasta la válvula 2

4.3.1 Protocolo de comunicación

Para que todos los componentes puedan comunicarse, los mismos deben respetar un protocolo. Este se caracteriza por dos elementos principales, el canal de comunicación o channel y los conductos o pipes.

El canal de comunicación está dado por un número que va desde el 0 hasta el 127. Todos los dispositivos deben estar en el mismo canal para poder comunicarse.

4.3.2 Conductos o pipes

Los conductos son los encargados de controlar la comunicación en cadena. Este está definido por un valor de 40 bits. Para simplificar su configuración se trabaja en base 16 para reducirlo a 10 valores hexadecimales. Cada elemento tiene configurado su canal y el correspondiente al elemento anterior y posterior. De esta manera pueden escribir al elemento correspondiente y escuchar los tres canales para que en caso de caída de una válvula el elemento siguiente pueda recibir la información y evitar que todo el sistema colapse como se observa en la Figura 9. Además, se le agrega una pequeña pausa con el objetivo de eliminar rebotes de señal.

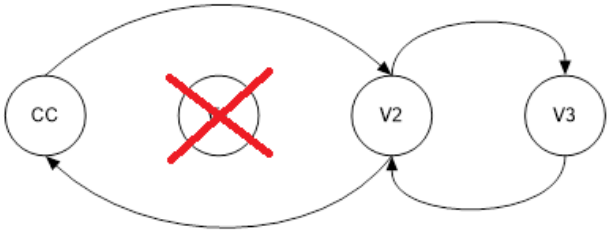


Figura 9: Comunicación directa desde el control central a la válvula 2

5. Hardware

5.1 Circuito optimizado del control central

El circuito cuenta con una alimentación de 24V que se reduce en 3 etapas a 12V, 5V y 3.3V. Esto se encarga de alimentar los distintos componentes del sistema. En la Figura 10 puede observarse el circuito correspondiente al control central y a continuación, se muestran los componentes principales y una descripción de cada uno.

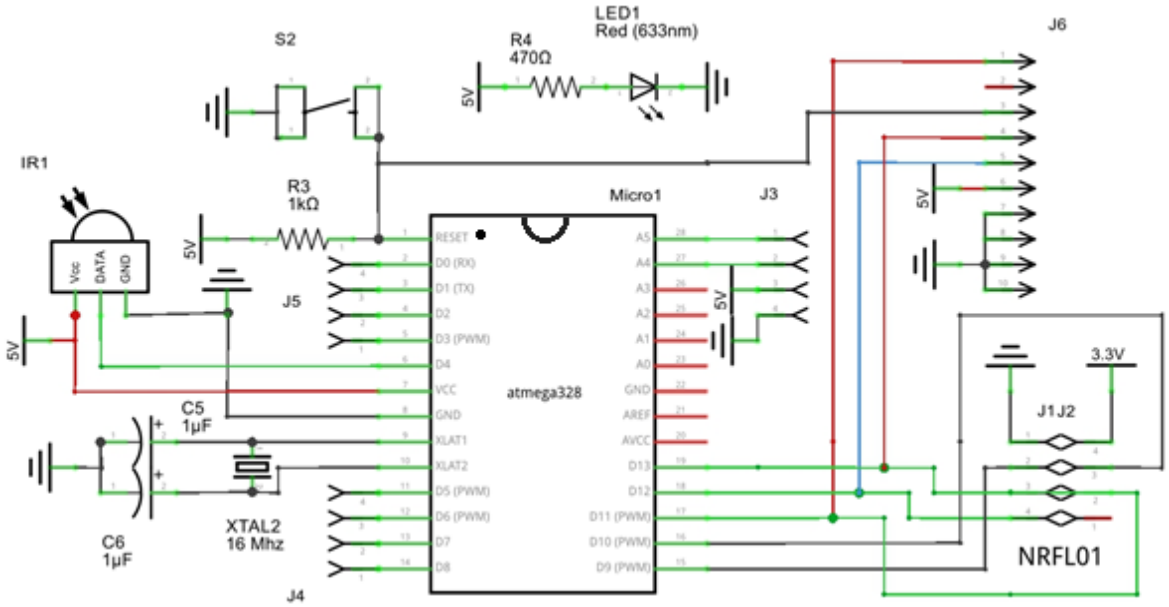


Figura 10: Esquema del control central

Micro1: Es el microprocesador encargado de almacenar los datos y contiene las instrucciones a llevar a cabo. Controla las funciones y los periféricos. [4]

XTAL2, C5 y C6: Cristal de 16Mhz y capacitores de 22 pf para configurar la frecuencia del procesador a 16Mhz.

J6: Conector para programador USBasp. Es el responsable de cargar el programa al micro a través de la interface SPI.

S2 y R3: Circuito de reset. Este circuito cuenta con una resistencia de 1 KΩ conectado a 5 V y al pin 1 del micro (reset) para mantenerlo activado a 5 V, y un botón conectado a masa para llevar a 0 la tensión del pin y así resetear el micro.

J3: Conector para pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C. Sirve para brindar la información necesaria al operario.

J1 y J2: Conector para módulo NRF24L01 con amplificador para comunicación por radio frecuencia. El sistema se comunica a través de la interface SPI del micro. Este componente debe estar desconectado para usar el programador.

IR1: Conector para receptor infrarrojo VS1838B tanto el mando como el receptor.

5.2 Circuito optimizado de la válvula

El circuito optimizado de las válvulas es casi idéntico al del control central salvo una serie de modificaciones.
Se elimina el conector para el Lcd y el receptor infrarrojo, quedando un conector auxiliar. Los pines digitales 2 y 3 son los encargados de mandar los pulsos de apertura y cierre de la válvula 1, y los pines digitales 4 y 5 de la válvula 2.

6. Software

El software guarda en sí mismo las instrucciones que debe seguir el hardware para poder cumplir con las necesidades del sistema de control. El mismo se puede dividir en dos partes principales: la configuración y el ciclo de funcionamiento [5].

6.1 Configuración

En la configuración se pueden destacar las siguientes características:
Carga de librerías: Estas son instrucciones que permiten controlar elementos específicos, como el Lcd, el módulo de radiofrecuencia, el receptor infrarrojo y permite ahorrar el trabajo de su configuración.
Configuración de hardware: Estos componentes tienen distintas variables de funcionamiento, como los canales de comunicación, direcciones o pines de conexión, los cuales deben ser definidos para el correcto funcionamiento de las librerías.
Declaración de variable: En esta etapa se definen todas las variables que afectan al sistema para asignarle su lugar correspondiente en la memoria. Además, se definen si los pines digitales funcionarán como entradas o salidas.
Inicio de los sistemas: Por último, se inician los sistemas que se utilizarán, como la pantalla Lcd, la comunicación infrarroja y de radio frecuencia demás de algunas configuraciones opcionales que se deseen.

6.2 Ciclo de funcionamiento

Una vez terminada la configuración, empieza el ciclo infinito de funcionamiento. Este se repite de forma indefinida mientras el sistema se encuentre energizado. En este ciclo se encuentran todas las instrucciones que responden a las funciones del sistema. Tanto en el control central como como en la válvula, este ciclo contiene un bucle de escucha que espera al comando enviado por el operario o el sistema de control central y sub bucles que en función del comando ejecutan la orden. En ambas partes se pueden destacar una serie de técnicas empleadas para el correcto funcionamiento.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6.2.1 Bucle principal con comando de salida.

Para brindar la opción de salida de cualquier sub-bucle se creó in bucle principal con una condición de salida que, al ser activada, resetea todas las variables de control y devuelve el sistema al estado inicial (se mantiene la configuración de riego). Esta condición es “while (b! = 2)”, la cual se activa por el control remoto.

6.2.2 Sub ciclos de comando

Estos ciclos nos permiten navegar por las distintas opciones que tiene el sistema de control. Una vez cumplida su función, la misma tiene condiciones de salida, ya sea para seguir a otra función, continuar o salir al inicio.

7. CONCLUSIONES

El sistema planteado permite cumplir con la exigencia del sistema de riego y brinda una gran versatilidad en configuración y operación, permitiendo usar el sistema ante inconvenientes en alguna válvula o una necesidad específica de riego. Además, la gran versatilidad de los distintos componentes y del software permiten que el sistema se adapte a una gran cantidad de situaciones, permitiendo posteriores ampliaciones sin mayores esfuerzos de instalación y configuración. También posee una operación sencilla que permite un rápido aprendizaje del mismo. Por último, los componentes utilizados pueden garantizar el correcto funcionamiento del sistema durante largos periodos de funcionamiento, con una gran fidelidad y manteniendo costos reducidos.

8. REFERENCIAS

[1] Marta Laura Paz, 2015. *Manual de capacitación: riego por goteo* / Mario Liotta. [et al.].

[2] Fipps, G. (2013). *Growvers Guide to Surge Flow.* Texas: Texas A&M Agrilife Extension. 2012

[3] Ing. Sebastián Beláustegui (2010). *Introducción al riego por caudal discontinuo.* PyR Argentina SA

[4] Herrador, R. E. (2009). *Arduino user manual*. www.uco.es/aulasoftwarelibre/wp-content/uploads/2010/05/Arduino_user_manual_es.pdf

[5] W. Durfee, University of Minnesota. *Arduino Microcontroller Guide*. http://www.me.umn.edu/courses/me2011/arduino/arduinoGuide.pdf

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DETERMINACION DEL UMBRAL DE CONFORT DE VIAJE EN FUNCION DE LAS ACELERACIONES PERCIBIDAS EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS

Hurani, Raúl Andrés [1], Imaz, Fernando Javier [2] y Jaurena, Juan Francisco [3]

[1, 2 y 3] Grupo Científico de Estudios de Transporte, Accidentología y Movilidad (CETRAM)
Facultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional
Lavaisse 610, Santa Fe (3000), Argentina. cetram@frsf.utn.edu.ar

RESUMEN

La calidad del transporte público urbano se mide a partir de indicadores que se establecen para cada aspecto del servicio. Son instrumentos que ayudan enormemente a la planificación, control y permiten visualizar de forma sistémica los objetivos y su cumplimiento. A partir de esta premisa se persigue relacionar las aceleraciones sufridas por un usuario durante su viaje con el confort asociado a irregularidades en el pavimento, a los efectos dinámicos consecuencia de las vibraciones, aceleración, frenado y cambio de carril del vehículo, problemas mecánicos del coche y otras circunstancias que afectan a la comodidad del usuario.

El interés en mejorar el confort de los pasajeros lleva a plantearse cómo relacionar el valor de las aceleraciones identificadas anteriormente con el confort que perciben los ocupantes del vehículo.

Para ello, se diseñó un protocolo de medición, a partir del uso de acelerómetros y giróscopos fijados a diferentes puntos de la carrocería, y así se pudieron medir las aceleraciones en los tres ejes, lo que asociado a datos de GPS establecieron con gran exactitud los lugares, las condiciones de la vía o actitudes de conductores que provocan estas situaciones. Además, el ensayo incluía la provisión de pulsadores para los usuarios y así identificar momentos de incomodidad, para relacionarlo con los picos de las aceleraciones.

Verificado el protocolo a partir de una prueba piloto se realizó el ensayo definitivo con una muestra mayor, para garantizar la representatividad de la misma.

Una vez procesados los resultados se analizaron las relaciones entre las aceleraciones y la sensación de disconfort percibida por los usuarios, determinando que los mayores malestares se observaban cuando el vehículo transitaba por calles en mal estado, asociados a aceleraciones y frenadas bruscas de parte del conductor.

El análisis final permite determinar el umbral de disconfort relacionados con las aceleraciones

Palabras claves: *indicadores de calidad, confort, transporte público, aceleraciones.*

Área Temática: Mecatrónica y automatización - Instrumentación, actuadores, sensores y transductores.

1. Introducción

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto de investigación y desarrollo denominado "Estudio del índice de confort del servicio del transporte público de pasajeros a través de la medición de aceleraciones" homologado por Evaluadores Externos de la Universidad Tecnológica Nacional dentro del Programa de Incentivos Docentes Investigadores de la Secretaría de Políticas Universitarias (código REI3451), que tiene por objetivo general "relacionar las aceleraciones (laterales y verticales) medidas en el sistema de transporte público de pasajeros con el confort percibido por los usuarios del sistema". El mismo se encuentra en fase de desarrollo a la fecha de publicación de este trabajo, por lo que lo que aquí se presenta no es una valoración de los resultados finales del proyecto sino una validación de la metodología que se estableció para la determinación del umbral de confort, a partir de la realización de trabajos de campo.

Existen algunos antecedentes donde se desarrollan metodologías para ese fin, que hacen referencia al tratamiento de las aceleraciones medidas. En ellos se manifiesta que a igualdad de aceleraciones, la respuesta del cuerpo humano varía de acuerdo a las condiciones de operación, por ejemplo si una persona se encuentra sentada en un colectivo: al acelerar éste, el cuerpo de la persona se mantiene firme, sujetado por el respaldar del asiento; pero en el momento en el que el vehículo frena, la persona se abalanza involuntariamente hacia delante al carecer de un soporte en esta dirección.[1] Este ejemplo permite evidenciar que a igualdad de aceleraciones en distintos sentidos, el cuerpo humano presenta reacciones muy diferentes, por lo que se considera preciso incorporar estos aspectos al tratado de los datos.

El análisis se realiza teniendo en cuenta cuatro tipos de aceleraciones principales:

- Longitudinales
  - Arranques (positivas)
  - Frenadas (negativas)
- Transversales
  - Giros (positivas y negativas)
- Verticales
  - Saltos, pozos o desniveles (positivas y negativas)

Relacionando las aceleraciones percibidas con las valoraciones de confort de los usuarios se pueden determinar los umbrales de incomodidad, es decir las tolerancias de las personas frente a las distintas direcciones de las aceleraciones.

El objetivo fue estimar el umbral de confort, a partir de la medición de las aceleraciones en el servicio de transporte urbano de pasajeros, que luego pueda ser tomado como referencia para determinar si un servicio analizado excede, o no, estos valores, en vistas de elaborar un índice de calidad del transporte basado en sus aceleraciones promedio.

2. Metodología

Para el desarrollo de este estudio se utilizó un colectivo urbano de la ciudad de Santa Fe, de la línea 16 -en servicio- en su recorrido normal. La elección del mismo surgió de un análisis de criticidad de la totalidad de líneas urbanas y sus recorridos en la ciudad de Santa Fe, donde se consideraron la presencia de tramos céntricos, tramos rectos, sinuosos, frecuencia de circulación por avenidas. Además se consideró la cantidad de pasajeros transportados. En la **Figura 1** se resalta el recorrido estudiado sobre un mapa de la ciudad de Santa Fe. Los registros de posición se obtuvieron por medio de un GPS.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 1. Recorrido estudiado Línea 16

Una vez determinado el recorrido, se procedió a definir cómo se iban a realizar las mediciones del **vector de aceleraciones** por un lado y de qué forma se registrarían los momentos en los cuales los usuarios perciben incomodidades.

Para la medición de las aceleraciones se utilizó una aplicación de un teléfono celular [2](ver **Figura 2**), el cual fue instalado solidariamente en la estructura del colectivo de forma tal que pudiera medir las componentes de aceleración correspondientes a la dirección del movimiento, a la dirección normal al suelo y a la dirección perpendicular a las dos anteriores. Cabe aclarar que dicho equipamiento podía registrar además, los valores de velocidad instantánea del coche.



Figura 2. Registro de aceleraciones con el acelerómetro de un celular.

Para determinar la **percepción de disconfort**, se utilizaron aplicaciones de celulares capaces de almacenar marcas de tiempo cuando los usuarios del servicio presionaban un botón del celular, ***"cada vez que se sintieran incómodas***".

La cantidad de pulsadores distribuidos en el colectivo surgió de un análisis de la cantidad de pasajeros transportados, de forma tal que la muestra tomada analizada sea representativa.

Se seleccionó un tipo de muestreo probabilístico, y se utilizó la siguiente ecuación:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{N}\sigma^2.\mathbf{Z}^2}{(\mathbf{N}-1).\mathbf{e}^2+\sigma^2.\mathbf{Z}^2} \quad (1)$$

Donde,

- **n:** tamaño de la muestra.

- **N:** tamaño de la población. En este caso se tomó la cantidad de pasajeros por día (promedio) en la línea seleccionada. De datos obtenidos por el Ente de Control del Transporte Público de Pasajeros de Santa Fe, la Línea 16 transporta 4.187.221 pax/año, por lo que se estima un promedio de 11.631 pax/día (distribución constante).
- **σ:** Desviación estándar de la población. Se adopta un valor de 0,5.
- **Z:** Valor obtenido mediante niveles de confianza. Se tomará en orden al 95% de confianza, equivale a 1,96.
- **e:** Límite aceptable de error muestral. Teniendo en cuenta que no se tiene su valor, se adopta un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09). Para este caso, se adopta: e = 9% (0,09).

Con estos datos se obtiene el siguiente valor de muestra:

$$n = \frac{11631 \times 0{,}5^2 \times 1{,}96^2}{(11631 - 1) \times 0{,}09^2 + 0{,}5^2 \times 1{,}96^2} = 117 \qquad (2)$$

El valor obtenido se estratificó por horario, y por franja etaria.

Para la estratificación por horario, se realizó el siguiente análisis: de acuerdo al estudio realizado por la UTN en 2008 [3], se dividió el uso del vehículo en 6 franjas: pico mañana, valle mañana, pico mediodía, valle tarde, pico tarde-noche y valle noche. Dividiendo el total de pulsadores por 6 resultó que se colocarían 20 pulsadores en el coche.

En tanto, para el tipo de edad de los usuarios se tomó como referencia el estudio de 2008 y ajustando la representación de las edades a la distribución referida anteriormente, se adoptó la siguiente estrategia de estratificación:

- Niño / Adolescente (hasta 15 años): 20% (4 usuarios)
- Joven hasta 30 años: 20% (4 usuarios)
- Adulto hasta 55 años: 45% (9 usuarios)
- Mayor 55 años: 15% (3 usuarios)

En cuanto a la distribución de los pulsadores dentro del colectivo, se utilizó el siguiente criterio; debía haber pasajeros sentados y parados y ocupar las tres zonas definidas. La **Figura 3** muestra la distribución que se adoptó dentro del vehículo, donde "**A**" representa la ubicación del acelerómetro y "$\mathbf{Z_1}$", "$\mathbf{Z_2}$" y "$\mathbf{Z_3}$" indican las zonas donde se ubicaron los pulsadores.

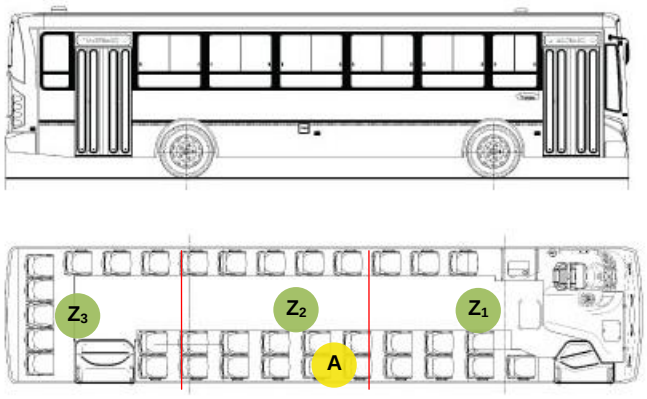


Figura 3. Zonas de ubicación de los pulsadores y el acelerómetro dentro del vehículo estudiado.

Los pulsadores y el acelerómetro estuvieron vinculados en el tiempo de forma que cada "sensación de incomodidad" se represente inequívocamente en un punto en el espacio e

identificada con un usuario. Durante los distintos recorridos se obtuvieron aproximadamente 420.000 registros de aceleraciones y más de 1200 pulsaciones de disconfort.

Dichos registros se vincularon con las marcas horarias, unificando registros de aceleraciones, pulsadores y GPS en una misma línea temporal y espacial.

Se obtuvieron dos líneas de valores:

- **Aceleraciones** en función del tiempo. Para el análisis se seleccionaron los 1000 valores mayores en valor absoluto (sobre más de 400.000) ya que si se analizaban en su totalidad el procesamiento resultaba muy lento y a los efectos del estudio no resultaba beneficioso.
- **Instancias de incomodidad** (una por pulsador) ubicadas temporal y espacialmente. Se establecieron franjas de 10 segundos de duración y se contabilizaron las cantidades de pulsaciones en cada período.

Posteriormente se procedió a analizar y relacionar dichos valores con situaciones de perturbación prefijados, tales como: arranques, frenadas, giros y saltos.

Se tomó como criterio, que cuando la percepción de incomodidad en un punto en el espacio superara al 66% de los usuarios, se realizaría un análisis particular de las aceleraciones que causaran el disconfort.

Tal como se comentó, se dividió el tiempo de recorrido en franjas de 10 segundos y se contabilizaron las cantidades de pulsaciones que había en cada período. Se adoptó este rango porque los usuarios tienen distintas velocidades de reacción. Se estima que una persona lúcida puede demorar entre 1,5 y 2 segundos en reaccionar ante una perturbación.

Una vez determinados los períodos de disconfort de los usuarios se analizaron las aceleraciones y velocidades registradas en dicho período para evaluar la relación entre las variables.

Luego de procesar los datos, analizar los valores y tipos de aceleraciones fue posible determinar algunos valores de aceleración que ponen de manifiesto la incomodidad de los usuarios que podrían definirse como "***umbrales de incomodidad***". Algunos autores, cómo Robert Norton, lo definen como "Tolerancia humana a la aceleración" [4].

3. Resultados

La forma de tomar y procesar los datos tiene las ventajas de brindar información sobre las pulsaciones desagregada en términos espaciales (por la vinculación temporal con los datos del GPS) y cualitativos (por la asignación a los distintos tipos de aceleración).

La **Tabla** muestra el volumen de datos obtenidos:

Tabla 1. Cantidad de registros obtenidos.

Datos	Cantidad de registros
Ubicación GPS	2322
Aceleración X	418195
Aceleración Y	418195
Aceleración Z	418195
Pulsaciones	1229

A continuación se muestran algunos resultados obtenidos. La figura 4 muestra el total de aceleraciones y la 5 el resumen de las 1000 aceleraciones más altas discriminadas por ejes. Como se puede ver sería muy difícil realizar el análisis sobre el total por la cantidad de datos observados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

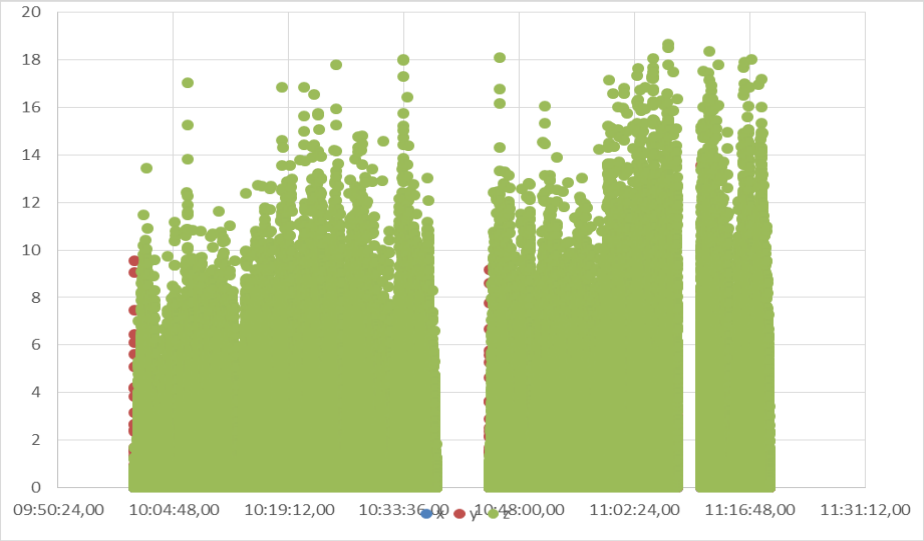


Figura 4. Total de aceleraciones medidas durante el ensayo

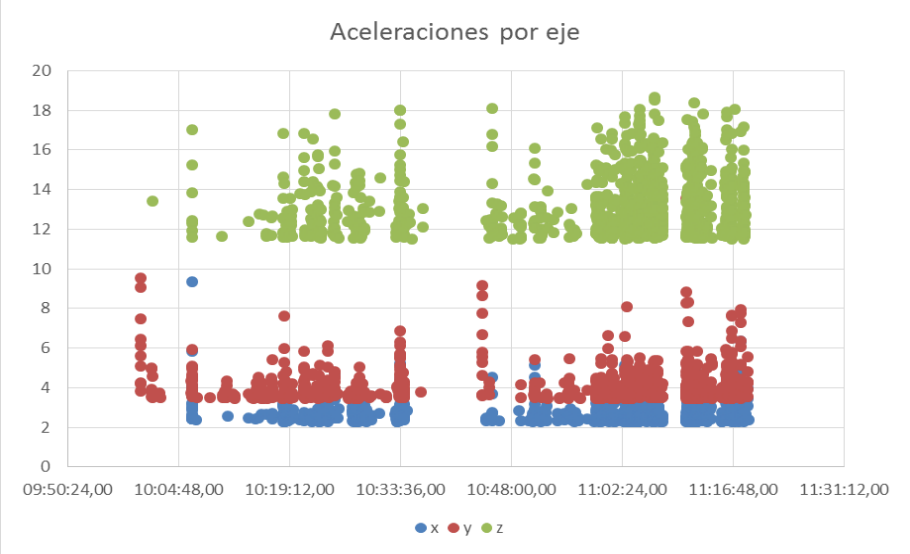


Figura 5. Resumen de las 1000 aceleraciones superiores en los tres ejes

El GPS permitió tener datos de las velocidades que tuvo el vehículo durante el ensayo, lo que se pone de manifiesto en la Figura 6, donde se observa que en algunos tramos del recorrido se superaron los 60 km/h.

ISBN: 978-987-1676-63-7

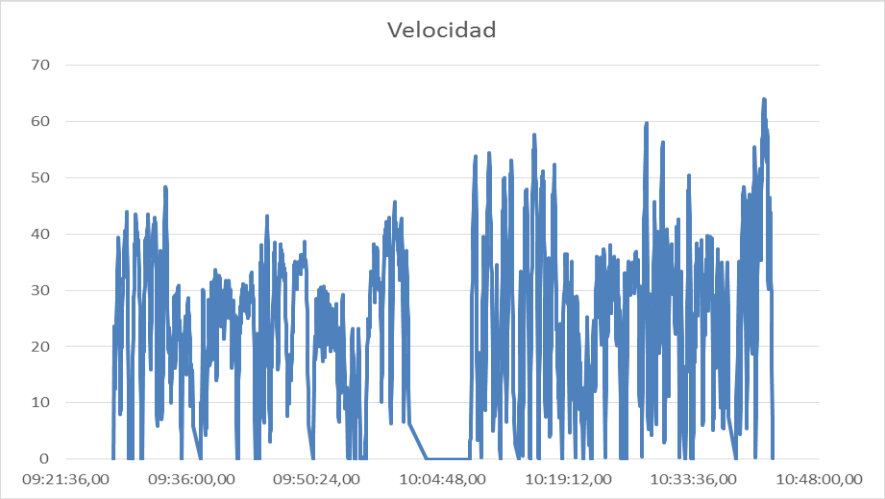


Figura 6. Valores de velocidad que adoptó el vehículo en el ensayo

Tal como se comentó en el apartado 3 se llevó a cabo el agrupamiento de las pulsaciones por rango de tiempo, las que posteriormente fueron ordenadas y analizadas en forma particular.

La Tabla 2 muestra el resumen de los valores de pulsaciones más elevados.

Tabla 2. Mayor cantidad de pulsaciones por rango horario

Hora Intervalo	Pulsadores accionados
11:16:10	94,44%
11:08:30	94,44%
10:51:10	94,44%
10:44:20	94,44%
11:13:20	88,89%
10:00:10	88,89%
11:12:50	83,33%
10:37:40	83,33%
11:19:20	77,78%
11:13:10	72,22%
11:12:30	72,22%
11:06:40	72,22%
11:05:20	72,22%
10:52:20	72,22%
10:30:40	72,22%
10:06:30	72,22%
11:18:50	66,67%

Posteriormente se filtraron los valores de aceleración para los períodos de tiempo citados en la Tabla 2 para ver si se podía obtener alguna relación.

La Figura 7 muestra el rango de tiempo entre las 11 horas 16 minutos y 00 segundos y las 11 horas 16 minutos y 10 segundos y se puede apreciar que a las 11:16:03 se midieron valores de

ISBN: 978-987-1676-63-7

aceleración en el eje Z cercanos a los 18 m/s^2., lo que indefectiblemente comprueba que es la causa de la disconformidad de los usuarios.

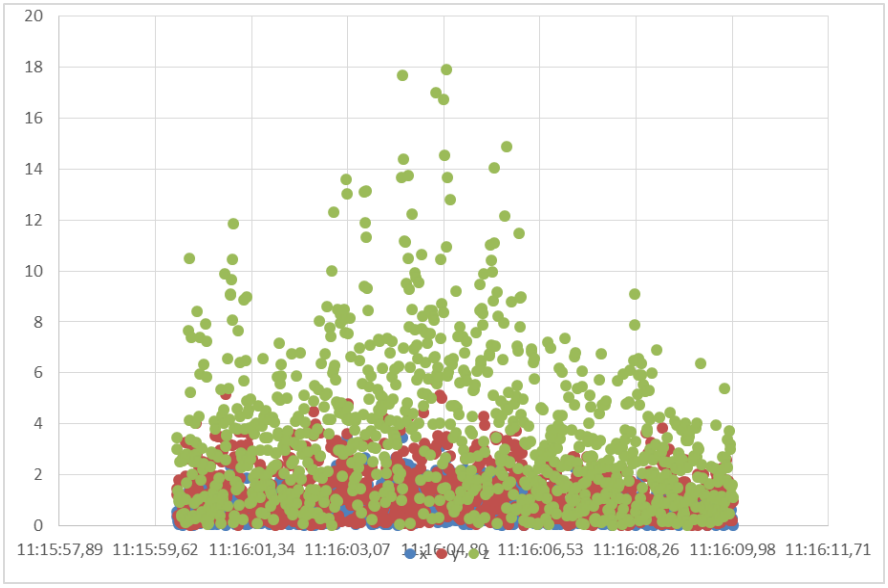


Figura 7. Análisis del período de tiempo 11:16:00 – 11:16:10

Otro punto singular lo representa el período 10:44:10 – 10:44:20 donde se puede observar (Figura 8) un componente de aceleración sobre el eje Y superior a los 9 m/s^2, que llevó a que un gran porcentaje de usuarios (94%) pulsara el botón de incomodidad. Este análisis lleva a pensar que los usuarios son más proclives a tolerar aceleraciones verticales que laterales, ya que la perturbación mostrada en la Figura 7 es significativamente más baja, pero los porcentajes de usuarios molestos son similares Las aceleraciones laterales pueden provenir de una maniobra brusca de parte del conductor.

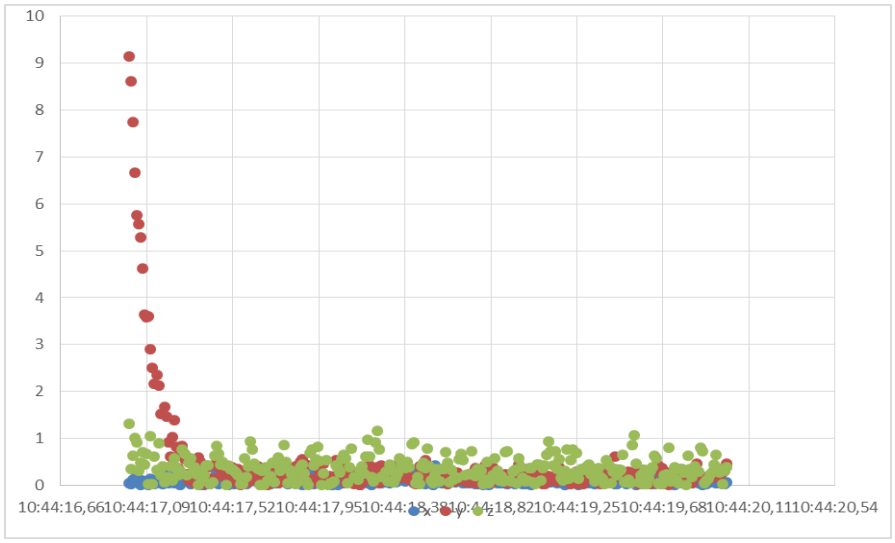


Figura 8. Análisis del período de tiempo 10:44:10 – 10:44:20

ISBN: 978-987-1676-63-7

Otro estudio interesante corresponde al período 10:06:30 – 10:06:40 donde el 72% de los pasajeros se sintieron incómodos. En la Figura 9 se puede ver que hay componentes de aceleración elevados, tanto en el eje X como en el eje Z. Sin embargo, los valores absolutos de aceleración son mucho más altos en Z (verde) que en X (azules) (17 m/s^2 contra 9 m/s^2).

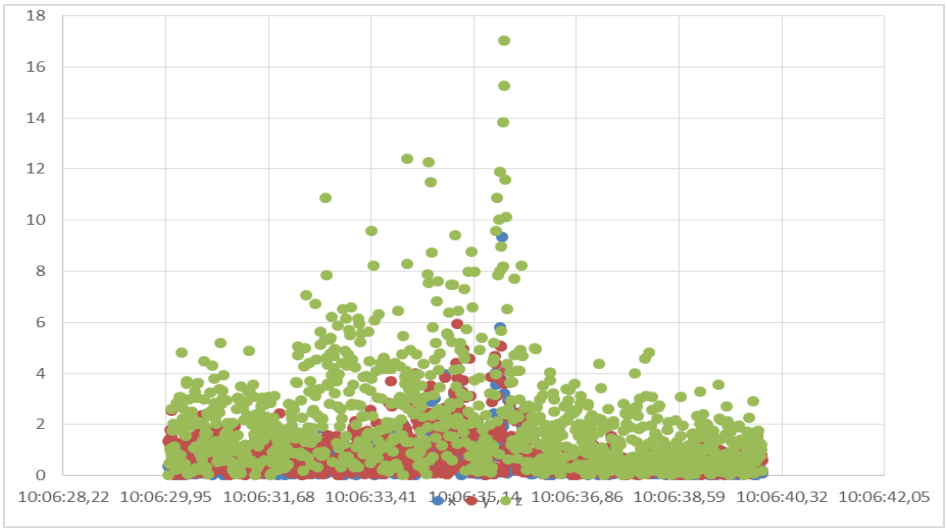


Figura 9. Análisis del período de tiempo 10:06:30 – 10:06:40

El último período seleccionado para el análisis es el correspondiente a: 11:18:40 – 11:18:50, donde solo el 66% de los pasajeros demostraron disconfort, es decir el valor a partir del cual se realizaba el estudio particular. La figura 10 muestra valores de aceleración en el eje Z cercanos a 10 m/s^2 y algunos valores en el eje Y apenas inferiores a los 6 m/s^2.

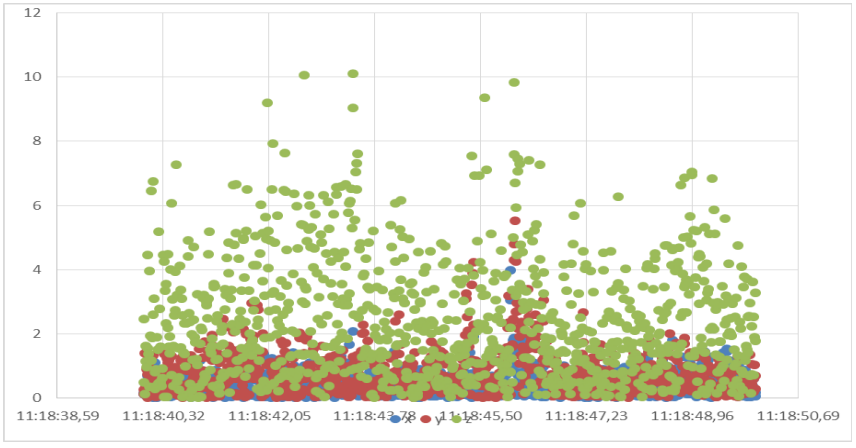


Figura 10. Análisis del período de tiempo 11:18:40 – 11:18:50

El análisis de cada uno de los períodos estudiados comprueba que existió, al menos un valor de aceleración que motivó el accionamiento del pulsador.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. Conclusiones

Haciendo la salvedad que el ensayo realizado constituye una primera prueba, y que el mismo debe extenderse a todos los coches de la empresa, con mayor número de pulsadores, se pueden detectar las siguientes potenciales conclusiones:

- **Definición de umbrales de confort:** a partir de la comparación de las cantidades de "botones de incomodidad" pulsados se pueden definir valores límites de aceleración (en cada uno de los ejes), o zonas de mayor o menor comodidad. Para el estudio se pudo comprobar que para valores de aceleración superiores a 9 m/s^2 la percepción de incomodidad es muy alta por lo que puede considerarse que el umbral está por debajo de dicho punto.
- **Variación de la valoración de la incomodidad según la dirección de las aceleraciones:** del análisis de los distintos casos singulares se pudo comprobar que la aceleración lateral es menos tolerable para los usuarios que la vertical. La aceleración longitudinal se observó un valor de más de 11 m/s^2, que sin embargo no tuvo su respuesta como percepción de incomodidad.
- **Causas de las aceleraciones:** un análisis posterior al presente escrito permitirá determinar el porqué de la generación de dichas aceleraciones. Como se nombró anteriormente, éstas se pueden generar debido a una forma agresiva de conducción, a problemas mecánicos de los vehículos relacionados a la suspensión o a imperfecciones en la calzada, baches, lomos de burro, calles no asfaltadas, etc.

5. Reflexión Final

El uso de instrumentos tales como acelerómetros y giróscopos permite colaborar con la planificación y el control de la prestación del servicio de transporte urbano de pasajeros, determinando en tiempo real las desviaciones al programa acordado entre las partes. Además, brinda información para interpretar las causas que producen dichas incomodidades, para luego poder adoptar medidas tendientes a mejorar la calidad del viaje de los usuarios.

La factibilidad de conocer los ***"umbrales de incomodidad"***, asociados a aceleraciones permite determinar aspectos relacionados al perfil de los usuarios del sistema de transporte público de pasajeros, y en base a ello adoptar medidas para mejorar el servicio, de forma de captar mayor cantidad de pasajeros y por consiguiente fortalecer un sistema más sostenible para la movilidad de las personas.

6. Referencias

[1] Castellanos, J. C., Fruett, F. "Embedded system to evaluate the passenger comfort in public transportation based on dynamical vehicle behavior with user's feedback". Elsevier - Measurement, (págs. 47, 442-451). (2014)

[2] Thommen Karimpanal, G, Harit Maganlal, G. "Sensing discomfort of standing passengers in public rail transportation systems using a smart phone". International conference on control and automation (ICCA) (págs. 1509-1513). (2013).

[3] Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe - GETRANS, Estudio del transporte Público de Pasajeros de Santa Fe - UTN, Fac. Reg. Santa Fe – Argentina (págs. 69-72) (2005)

[4] Norton Robert, "Diseño de Maquinaria", editorial Mc Graw Hill 4° Edición, (págs 319 – 320), (2009)

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FRECUENCIAS NATURALES EN VIGA EMPOTRADA-LIBRE.

Masch Federico[1,2], Hecker Rogelio[1,2] ,Capraro Flavio[3], Sardá Augusto[4] y Torres Nicolas[4]

[1] Grupo de Mecatrónica Aplicada de la Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 N° 390 General Pico, La Pampa, Argentina
correo-e: maschfederico@gmail.com.
[2] CONICET
[3] Instituto de Automática, INAUT. Universidad Nacional de San Juan.
[4] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Pampa.

RESUMEN

El control activo de vibraciones es una posibilidad utilizada para reducir los efectos negativos generados por fuerzas variables en el tiempo aplicadas a estructuras mecánicas con alto grado de flexibilidad. En general, la sintonización del controlador requiere de modelos matemáticos del sistema, validados experimentalmente en el rango de frecuencia de interés.

La viga empotrada-libre es un elemento fundamental en diversas estructuras mecánicas tales como: manipuladores robóticos, paneles solares de satélites, barra de pulverización en maquinarias agrícolas, torres de molinos de vientos, micro-viga de posicionamiento en microscopía por citar algunos ejemplos de aplicación. La misma provee un marco adecuado para evaluar el desempeño de técnicas experimentales para la identificación de la dinámica de cuerpos flexibles.

En este sentido, se ha realizado un conjunto de experimentos de respuesta libre sobre una viga de acero 1010 con una sección rectangular de 50,8 mm x 3,4 mm y una longitud de 2000 mm en una configuración empotrada-libre. El relevamiento de la respuesta libre se ha realizado mediante acelerómetros de tecnología MEMS y galgas extensiometricas, ubicados convenientemente en diversos puntos de la viga. Las señales de aceleración y deformación específica fueron utilizadas para determinar las primeras frecuencias naturales. Complementariamente, estos resultados fueron contrastados con resultados provenientes de simulaciones mediante software de elemento finito y resultados derivados de la teoría Euler-Bernoulli aplicada a este tipo de vigas.

Palabras Claves: *Dinámica de cuerpo flexible, Frecuencia Natural, Identificación experimental.*

1. INTRODUCCIÓN.

La optimización del peso de estructuras mecánicas trae consigo la necesidad de tener en cuenta la dinámica de cuerpo flexible y su impacto en el comportamiento dinámico total de la estructura mecánica. Las estructuras mecánicas flexibles como el ala de un avión, la barra de una pulverizadora y los paneles solares de satélites son algunos de los ejemplos donde el criterio de optimización del peso y la dinámica juegan un rol preponderante en el desempeño de la estructura.

Las ecuaciones en derivadas parciales que describen la dinámica de cuerpo flexible poseen un conjunto acotado de soluciones analíticas. Cuerpos flexibles de geometrías sencillas como la viga de sección constante o una lámina rectangular o circular de espesor constante son algunos ejemplos para los cuales se dispone de soluciones analíticas. Para cuerpos flexibles con geometrías más complejas el método de elementos finitos permite arribar a soluciones aproximadas a estas ecuaciones. Tanto para las soluciones analíticas y como para las obtenidas a través de elementos finitos es necesario validar los parámetros característicos de dichas soluciones mediante técnicas experimentales. Las técnicas experimentales se enmarcan en lo que se denomina Análisis Modal experimental el cual reúne un conjunto de técnicas destinadas a identificar los parámetros modales como la frecuencia natural, modo de vibración y factor de amortiguamiento. Los acelerómetros han sido y son los transductores con mayor adopción debido a su simplicidad de instalación y por el hecho de no requerir un marco de referencia para su medición. En tanto la utilización de galgas extensiometricas no ha sido ampliamente adoptada debido a la simplicidad de utilización de los acelerómetros. Sin embargo en ciertos sistemas como turbinas de gas, aplicaciones aero-espaciales, molinos de viento, aspas de helicópteros las galgas extensiométricas presentan ventajas en tamaño y peso respecto a los acelerómetros minimizando el impacto aerodinámico y la modificación de la dinámica de cuerpo flexible [1] . El campo de aplicación usual de las mismas ha sido la evaluación de la integridad estructural, la evaluación ante cargas estáticas en estructuras, evaluación de fatiga [2] y predicción de tiempo de vida [3]. La utilización de las mismas en el campo del análisis modal ha sido reportado en trabajos [1,4].

En este trabajo se procede a evaluar la factibilidad de utilización de galgas extensiométricas para determinar las frecuencias naturales de una viga de sección constante en una configuración empotrada-libre. La viga empotrada-libre es un elemento constitutivo fundamental en estructuras mecánicas y posee una solución analítica a las ecuaciones en derivadas parciales que describen la dinámica de cuerpo flexible. Además, la dinámica de cuerpo flexible de la viga presenta el fenómeno de aglomeración de sus primeras frecuencias naturales cuando la viga presenta un alto grado de esbeltez, siendo posible observar el mismo fenómeno es estructuras flexibles esbeltas

ISBN: 978-987-1676-63-7

como la barra de una pulverizadora, paneles solares de satélites, manipuladores robóticos flexibles. Por estas razones la misma ofrece un marco adecuado para la evaluación de técnicas experimentales. Este trabajo se divide en tres secciones, en la primera se presentan las ecuaciones para el cálculo de las frecuencias naturales bajo las hipótesis de la Teoría de Euler-Bernoulli. La segunda sección, presenta los resultados obtenidos mediante la utilización del método de elemento finito a través del software SolidWorks. Por último, en la tercera sección se presentan los transductores utilizados, la metodología experimental adoptada y el análisis posterior de las señales obtenidas para determinar las frecuencias naturales de la viga.

2. SOLUCIÓN ANALÍTICA.

2.1 Frecuencias naturales y modos de vibración

Sea una viga de sección rectangular de altura h , ancho e y longitud L como se observa en la Figura 1 y $w(x,t)$ el desplazamiento lateral de la viga en la dirección del eje "z", entonces la evolución temporal del mismo estará gobernado por la siguiente ecuación en derivadas parciales.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EI\,\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+\rho A\,\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0 \qquad (1)$$

Donde se asumen la hipótesis Euler- Bernoulli y además que la viga no está sujeta a fuerzas externas en la dirección del eje "z", que reacciona a las fuerzas propias de las condiciones de contorno [3] y donde E es el módulo de elasticidad del material de la viga, I el momento de inercia respecto del eje "y" , ρ la densidad del material y $A = h.e$ el área transversal de la viga.

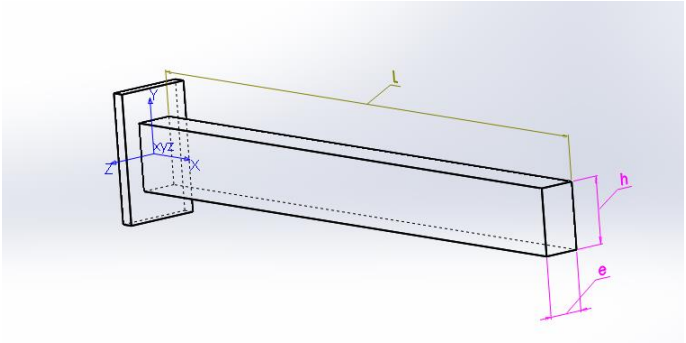


Figura 1. Viga empotrada-libre de sección constante.

La solución de la Ecuación (1) en derivadas parciales se expresa como

$$w(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} B_j \varphi_j(x) \cos(2\pi f_j t + \beta_j) \qquad (2)$$

donde B_j y β_j son los coeficientes que determinan las condiciones iniciales, $\varphi_j(x)$ es el modo-j de vibración y f_j es la frecuencia natural y se calcula por medio de la ecuación

$$f_j = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}\alpha_j^2 \qquad (3)$$

donde α_j es la raíz-j de la función $f(\alpha) = \cos(\alpha)\cosh(\alpha) + 1$ cuyos 6 primeros valores son $\alpha_1 = 1.875$, $\alpha_2 = 4.694$, $\alpha_3 = 7.855$, $\alpha_4 = 10.996$, $\alpha_5 = 14.137$ y $\alpha_6 = 17.279$.

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno para el caso de la viga empotrada libre el modo de vibración $\varphi_j(x)$ asume la siguiente definición

$$\varphi_j = C_j\left(sen\left(\alpha_j \frac{x}{L}\right) - senh\left(\alpha_j \frac{x}{L}\right)\right) - \frac{sen(\alpha_j) + senh(\alpha_j)}{\cos(\alpha_j) + \cosh(\alpha_j)}\left(\cos\left(\alpha_j \frac{x}{L}\right) - \cosh(\alpha_j \frac{x}{L})\right) \qquad (4)$$

donde el parámetro C_j permite normalizar cada modo de vibración y su valor se determina por

$$C_j = \frac{1}{\sqrt{\int_0^L \rho A \varphi_j^2(x)dx}} \qquad (5)$$

Teniendo en cuenta que el material de la viga es acero SAE 1010 y las dimensiones geométricas y parámetros físicos presentados la Tabla 1, utilizando la Ecuación (3) se determinan las primeras seis frecuencias naturales de la viga empotrada-libre asociadas a la dinámica de los desplazamientos laterales $w(x,t)$ resultando que: $f_1 = 0.710\ Hz$, $f_2 = 4.480\ Hz$, $f_3 = 12.550\ Hz$, $f_4 = 24.600Hz$, $f_5 = 40.670\ Hz$ y $f_6 = 60.750\ Hz$

Tabla 1. Parámetros de la viga material SAE 1010

Parámetro de la viga	Unidad	Magnitud	Parámetro de la viga	Unidad	Magnitud
h = altura de la sección	[mm]	50.7 ± 0.1	E = Módulo Elástico	[Pa]	2.07E11
e = ancho de la sección	[mm]	3.45 ± 0.06	I = Momento de Inercia	[mm^4]	173.5
A = área de la sección	[mm^2]	174.9	ρ = Densidad	[Kg/m^3]	7850
L = Longitud de la viga	[mm]	2000			

En la Figura 2 se presentan las gráficas correspondientes a cada modo $\varphi_j(x)$ definidos por la Ecuación (4), los cuales representa el estado de deformación de la viga asociado a cada uno de los modos.

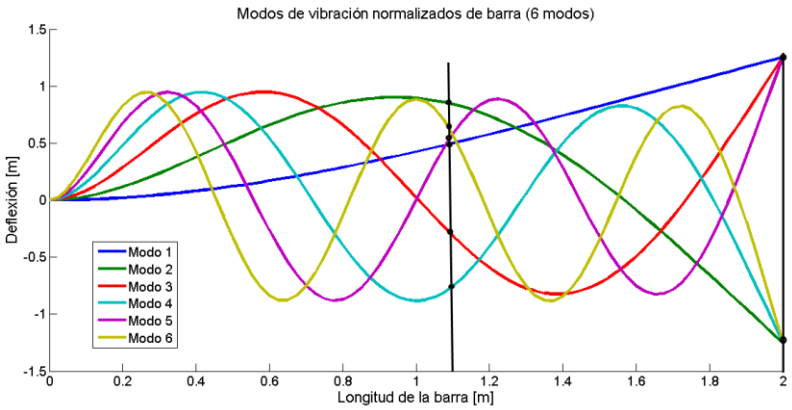


Figura 2. Modos de vibración de la viga.

2.2 Modos de deformación

En tanto de poder utilizar a la galga extensiométrica como sensor para captar la dinámica de cuerpo flexible de la viga hace necesario disponer de los modos de deformación específica $\varepsilon_{j\,x}$ asociado a cada modo de vibración φ_j . El modo de deformación $\varepsilon_{j\,x}$ puede ser derivado a partir de la Ecuación (2) teniendo en cuenta que la deformación específica ε_x observable en la superficie lateral de la viga se relaciona con los desplazamientos laterales mediante la siguiente ecuación

$$\varepsilon_x(x,t) = -\frac{1}{2} e \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \qquad (6)$$

donde el parámetro e es el espesor de la viga. Por lo tanto el modo de deformación específica $\varepsilon_{j\,x}$ que determina la deformación observable en la superficie lateral de la viga producida por el modo de vibración φ_j se define con la siguiente ecuación

$$\varepsilon_{j\,x}(x) = -\frac{1}{2} e \frac{d^2 \varphi_j}{dx^2} \qquad (7)$$

En la Figura 3 se presentan los estados de deformación específica $\varepsilon_{j\,x}(x)$ de los primeros seis modos de deformación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

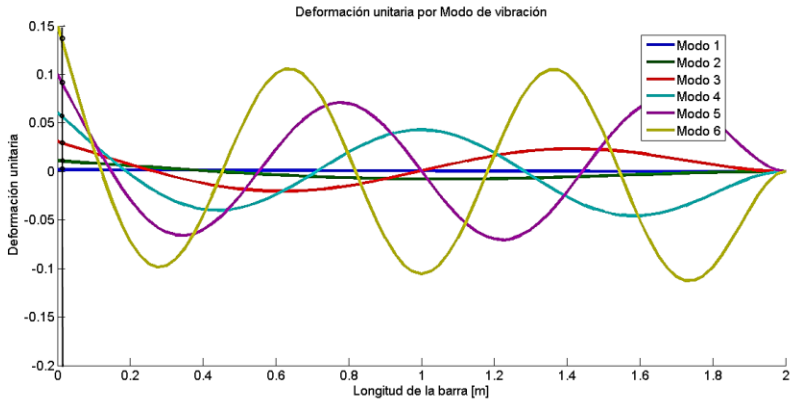


Figura 3. Modos de deformación específica de la viga.

3. SOLUCIÓN POR ELEMENTO FINITO

También de manera tal de contrastar los datos obtenidos de manera experimental se procedió a la utilización de software de elemento finito para la realización de simulación destinada a obtener las frecuencias naturales de la viga. Para ello se utilizó el software SolidWorks y su paquete de simulación de análisis de frecuencias naturales. Teniendo en cuenta los datos de la viga presentados en la Tabla 1 los resultados de dicha simulación arrojaron que las frecuencias naturales son $f_1 = 0.715\ Hz$, $f_2 = 4.486\ Hz$, $f_3 = 12.563\ Hz$, $f_4 = 24.622 Hz$, $f_5 = 40.709\ Hz$ y $f_6 = 60.825\ Hz$.

4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

4.1 Sensores y su posicionamiento

El análisis experimental se basó en el análisis de la respuesta al impulso utilizando como sensores dos acelerómetros de tecnología MEMS modelo MMA 7361 de tres canales analógicos con un rango de +- 1.5g y un ancho de banda por canal de 400 Hz y una galga extensiométrica modelo KFD-5-C1-11 con un acondicionador de señal SG-306. La digitalización de las señales de los tres sensores se realizó a una frecuencia de adquisición de 2000 Hz mediante el equipo UEISIM 600-1G.

Las posiciones seleccionadas para los dos acelerómetros se adoptaron con el criterio de garantizar poder detectar los primeros seis modos de vibración. Para los acelerómetros las posiciones seleccionadas fueron 2000mm y 1100mm desde la base, ver Figura 2, en donde se puede observar que los seis modos de vibración presentan desplazamientos no nulos en dichas posiciones. Para el caso de la galga extensiométrica, la misma se posicionó próxima al extremo de

empotramiento, ver Figura 3, en donde se puede observar que las deformaciones específicas de cada modo son apreciables pudiendo así maximizar la amplitud de señal de manera y la relación señal/ruido de la misma.

4.2 Metodología Experimental

La metodología consistió en dos experiencias. La primera destinada a la captura de las señales de los acelerómetros consistió en realizar impactos sobre la viga sobre la línea media en las posiciones 2000 mm, 1550 mm, 1100 mm y 650 mm medidos desde el extremo empotrado. Cada impacto se repitió en seis ocasiones produciendo así 24 sesiones de captura de señal de ambos acelerómetros. En la Figura 4 se puede observar la señal del acelerómetro ubicado en el extremo libre ante un impacto en la posición 1100 mm.

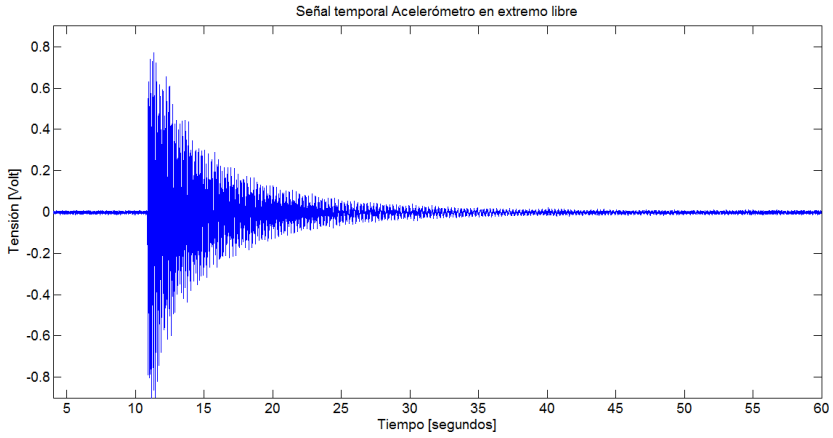


Figura 4. Señal de acelerómetro en extremo libre.

La segunda experiencia consistió en la captura de la señal proveniente de la galga extensiométrica cuando la viga es sometida a un impacto lateral en la línea media a los 1100 mm desde la base. Este impacto se repitió en seis oportunidades. En la Figura 5 se puede observar la señal de la galga extensiométrica de dos impactos consecutivos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

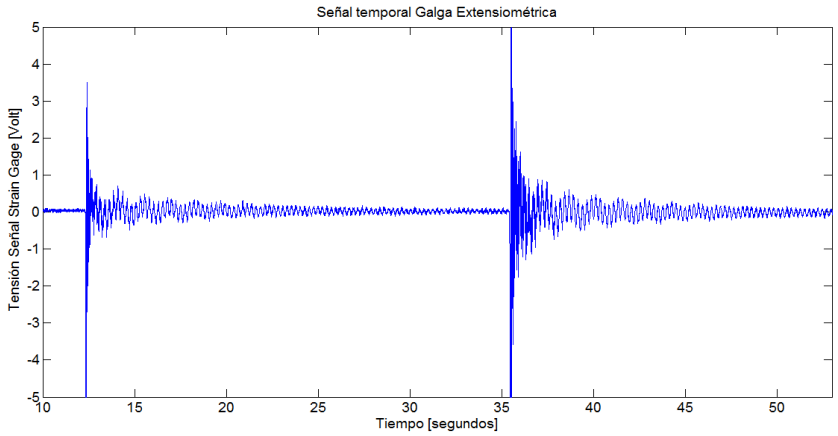


Figura 5. Señal de galga extensiométrica.

4.2.1 Procesamiento de las señales

El procesamiento de las señales tanto provenientes de los dos acelerómetros como de la galga extensiometrica fue previamente filtrada mediante un filtro digital Butterworth de orden mínimo diseñado en Matlab tipo paso-bajo con una frecuencia de corte de 90 Hz. Las señales filtradas fueron analizadas en el dominio frecuencial mediante la utilización de la Transformada de Fourier discreta implementada en una rutina de Matlab basado en el algoritmo FFT. Se utilizó una ventana de inspección con una longitud de 3 segundos compuesta con una envolvente Hamming y desplazamientos de 0.5 segundos para generar los espectrogramas correspondientes a cada señal. En la Figura 6 se presenta el espectrograma correspondiente a la señal del acelerómetro presentada en la Figura 4.

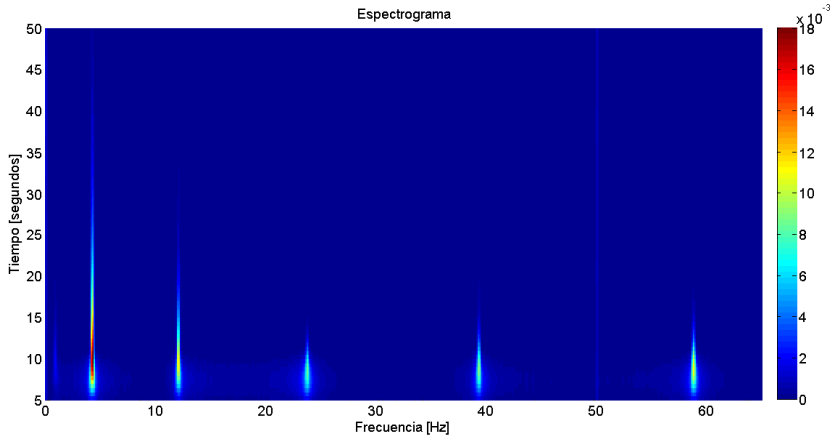


Figura 6. Espectrograma de señal de acelerómetro en extremo libre.

En él se observa la evolución temporal del espectro de frecuencias que componen dicha señal. De este espectrograma y de los demás espectrogramas resultantes de las señales de ambos acelerómetros en las distintas sesiones se determinó que las primeras seis frecuencias naturales son: $f_1 = 0.754\ Hz,\ f_2 = 4.271\ Hz,\ f_3 = 12.084\ Hz\ ,\ f_4 = 23.681\ Hz,\ f_5 = 39.184\ Hz\ y\ f_6 = 58.715\ Hz$

En la Figura 7 se presenta el espectrograma de la señal de la galga extensiométrica presentada en la Figura 5. En el mismo se puede observar la evolución temporal del espectro de frecuencias productos de dos impactos consecutivos y una fuerte atenuación entorno a los 50 Hz producto del filtrar la señal con un filtro stop-band. Esto fue necesario para remover el ruido de 50 Hz presente en la misma el cual generaba una relación señal/ruido muy bajo.

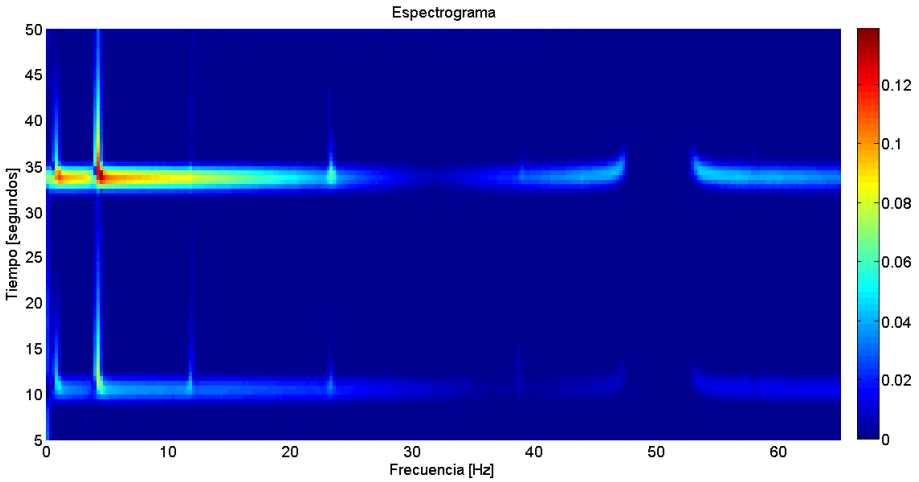


Figura 7. Espectrograma de la señal de galga extensiométrica.

De este espectrograma y de los demás espectrogramas resultantes de la señal de la galga extensiométrica en las distintas sesiones se determinó que las primeras seis frecuencias naturales son: $f_1 = 0.732\ Hz,\ f_2 = 4.150\ Hz,\ f_3 = 11.718\ Hz\ ,\ f_4 = 23.193\ Hz,\ f_5 = 38.574\ Hz\ y\ f_6 = 57.617\ Hz$.

4.2.2 Comparación de frecuencias naturales obtenidas

Las frecuencias naturales provenientes de resultados teóricos, las obtenidas a través de simulación por elemento finito y las obtenidas a través de análisis experimentales son presentadas en formas conjunta en la Tabla 2 con su respectiva variación porcentual respecto a los resultados teóricos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2. Frecuencias Naturales. Comparación de diversos métodos.

Frecuencia Natural	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
Teórica [Hz]	0.710	4.480	12.550	24.600	40.670	60.75
Simulación [Hz] (Var. Teorica%)	0.715 (+0.7%)	4.486 (+0.13%)	12.563 (+0.05%)	24.622 (+0.1%)	40.709 (+0.09%)	60.825 (+0.12%)
Acelerómetro [Hz] (Var. Teorica%)	0.754 (+5.6%)	4.271 (-4.6%)	12.084 (-3.7%)	23.681 (-3.7%)	39.184 (-3.6%)	58.715 (-3.3%)
Galga Exten. [Hz] (Var. Teorica%)	0.732 (+3.1%)	4.150 (-7.4%)	11.718 (-6.6%)	23.193 (-5.7%)	38.574 (-5.5%)	57.617 (-5.1%)

Los resultados presentados en la Tabla 2 y obtenidos por medio de simulación por elemento finito son satisfactorios y congruentes. Las frecuencias naturales obtenidas por este método son superiores a las frecuencias teóricas tal como se esperaba debido al que método de elemento finito presenta un carácter asintótico superior en la determinación de dichas frecuencias [5]. En tanto a los resultados obtenidos por análisis experimental, tanto en la metodología en la cual se utilizan acelerómetros como en la metodología la cual utiliza galga extensiométricas, presentan valores para las frecuencias naturales de los modos 2,3,4,5 y 6 por debajo de las teóricas, en concordancia en que los modos de vibración reales son levemente amortiguados y por lo tanto deben presentar una frecuencia natural menor que la teórica. Esto no sucede en el caso del primer modo tanto para en la metodología basada en acelerómetros como en el caso de la utilización de la galga extensiométrica. La razón a las que se puede atribuir este desvío es que en el cálculo teórico Ecuación (3) los valores reales de los parámetros físicos E y ρ son desconocidos y es posible que difieran de los presentados en la Tabla 1 los cuales fueron obtenidos de bibliografía de consulta.

En tanto haciendo referencia de manera específica a la experiencia utilizando galgas extensiométricas, la misma ha presentado una relación señal/ruido relativamente menor a la experiencia en la que se utiliza acelerómetros, esto se puede observar comparando los respectivos espectrogramas, ver Figura 6 y Figura 7. La presencia de la componente de ruido de línea de 50 Hz hizo necesario aplicar un filtro Stop-Band entorno a los 50 Hz tal como se puede observar en la Figura 7 lo cual dificultó la detección de la frecuencia natural del sexto modo (~60 Hz). La relación señal/ruido de la galga extensiométrica puede ser mejorado sustancialmente mediante la utilización de un puente completo y así permitir que el método experimental basado en mediciones de deformación especifica sea viable para la determinación de las frecuencias naturales.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha realizado el análisis experimental de las frecuencias naturales de una viga empotrada-libre mediante la utilización de acelerómetros y galgas extensiometricas.

Se ha reportado la factibilidad de utilizar galgas extensiométricas para la determinación de las frecuencias naturales de un cuerpo flexible presentando un desempeño similar a la técnica experimental basada en acelerómetros.

Es posible aumentar la relación señal/ruido de las galgas extensiométricas mediante la disposición galgas extensiométricas en una configuración de puente doble/completo obteniendo así una sensibilidad mayor o similar a los acelerómetros.

Se espera en trabajos futuros evaluar la factibilidad de poder determinar los modos de vibración y el factor de amortiguamiento mediante la utilización de galgas extensiométricas.

6. REFERENCIAS

[1] F. L. Marques dos Santos, B. Peeters, R. Van der Vorst, W. Desmet y L. C. Sandoval Goes, *The use of strain and mixed strain/acceleration measurements for modal analysis*, Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014, pp. 2247-2254, 2014.

[2] . H. Wentzel, *Fatigue test load identification using weighted modal filtering based on stress*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 40, pp. 618-627, 2013.

[3] D. Vandepitte y P. Sas, *Case study of fracture of a mechanical component due to resonance fatigue.*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 4, nº 2, pp. 131-143, 1990.

[4] A. C. Pisoni, C. Santolini, D. E. Hauf y S. Dubowsky, *Displacements in vibrating body by strain gauge measurements*, Proc. SPIE Vol. 2460, Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference., vol. 2460, pp. 119- 127, 1995.

[5] J. H. Ginsberg, *Mechanical and Structural vibrations*, USA: John Wiley & Sons INc., 2001.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Escriba aquí la ecuación.

MOVIL PARA INSPECCION REMOTA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

Molina H.[1], **Penisi O.**[2] , **Guevara C.**[3] , **Alba F.**[4] , **Sánchez M.**[5]

[1,2,3,4,5] Instituto de Mecánica Aplicada – Universidad Nacional de San Juan
Av. Lib. San Martin (O) 1109, San Juan, Argentina
correo-e: [1] hmolina@unsj.edu.ar
[2] openisi@unsj.edu.ar
[3] cguevara@unsj.edu.ar
[4] falba@unsj.edu.ar
[5] msanchez@unsj.edu.ar

RESUMEN

Dada la normativa emitida por la Secretaria de Energía de la Nación (SE), en cuanto a seguridad en tanques de almacenamiento de combustible líquido, surge la necesidad de desarrollar metodologías y sistemas, que permitan efectuar la inspección de espesores, para determinar la tasa de corrosión y el estado de conservación en estos tanques, en tiempos y a costos razonables.

Debido al gran porte de los tanques, el proceso manual implica una gran cantidad de horas en montaje de infraestructura, andamiaje y horas hombre con trabajo en altura, elevando el costo de dicho estudio y el riesgo de accidentes humanos.

El estado del arte en inspección remota con móviles, señala que se obtuvieron buenos resultados con ruedas y/o orugas magnéticas para tracción y adherencia, y ultrasonidos para medición de espesores.

En el presente trabajo, se plantea el estudio de las opciones tecnológicas y la definición de los parámetros de diseño, de un móvil que permita realizar la inspección remota de espesores. El móvil deberá ser capaz de mantenerse adherido a la superficie externa del tanque, a su vez debe poder trasladarse, y sortear obstáculos propios de la construcción y uso del tanque. El móvil deberá transportar el equipo de medición y el mecanismo de aproximación de la sonda de medida. El sistema de control debe posicionar al móvil según una grilla de medición, establecida por la normativa vigente. En caso de detectar algún valor de espesor fuera de norma, el móvil deberá posicionarse y medir fuera de grilla, para identificar el área de la zona fuera de norma.

Se espera lograr el desarrollo local de la tecnología, que puede ser transferible a empresas que efectúan este tipo de estudios, reduciendo costos y tiempos operativos permitiendo inspeccionar mayor cantidad de tanques en un mismo lapso de tiempo y con menor riesgo humano.

Palabras Claves: *Móvil, Remoto, Espesores, Combustible, Inspección*

1. INTRODUCCIÓN

Dada la normativa emitida por la Secretaria de Energía de la Nación (SE), en cuanto a seguridad en tanques de almacenamiento de combustible líquido, surge la necesidad de desarrollar metodologías y sistemas, que permitan efectuar la inspección de espesores, para determinar la tasa de corrosión y el estado de conservación en estos tanques, en tiempos y a costos razonables.

Debido al gran porte de los tanques, el proceso manual implica una gran cantidad de horas en montaje de infraestructura, Figura 1 andamiaje y horas hombre con trabajo en altura, elevando el costo de dicho estudio y el riesgo de accidentes humanos.



Figura 1 : Tareas relacionadas al Trabajo Manual de inspección de tanques

En el presente trabajo, se plantea el estudio de las opciones tecnológicas y la definición de los parámetros de diseño, de un móvil que permita realizar la inspección remota de espesores. El móvil deberá ser capaz de mantenerse adherido a la superficie externa del tanque Figura 2, a su vez debe poder trasladarse, y sortear obstáculos propios de la construcción y uso del tanque.



Figura 2 : Inspección Remota con móvil escalador

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. Sistema de adhesión

Este sistema permite mantener adherido el móvil a la superficie bajo inspección, existen variadas opciones tecnológicas, una de ellas la electro-adhesión que ha tomado auge en los últimos años haciendo uso de las fuerzas electrostáticas de Coulomb, mediante la aplicación de un voltaje elevado, y el uso de films dieléctricos metalizados Figura 3, se puede lograr adhesión sobre paredes de diversos materiales [1] con consumos de energía muy bajos del orden de 0.02mw/N de peso. El inconveniente que se presenta al trabajar con carga electrostática es el riesgo de descarga en forma de chispa por lo que resulta inaceptable cuando el sistema debe usarse con combustibles y/o sus vapores.

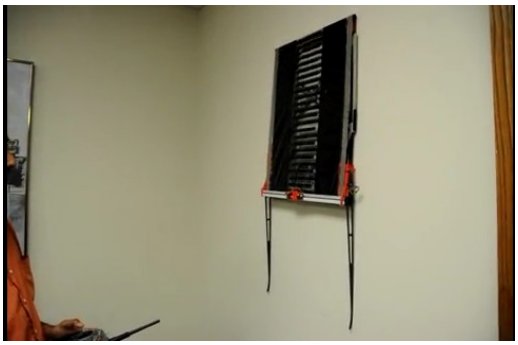


Figura 3: Móvil Escalador por electro-adhesión



Figura 4: Móvil Escalador Bípedo por vacío

Otro método de adhesión usado es de succión por la aplicación de vacío Figura 4 mediante sopapas [12], el vacío necesario se genera por Venturi, con aire comprimido o mediante una bomba de vacío externa o a bordo del móvil.

El desarrollo de fibras adherentes derivadas del estudio de la naturaleza [14] como los pies de GECKO una lagartija nocturna de climas cálidos, ha permitido desarrollar móviles para escalado de superficies verticales Figura 5 pero con capacidad para pequeñas cargas no mayores a 100 grs donde los consumos de energía para adhesión son nulos.

La fuerza de adhesión obtenida a partir de campo magnético [3,4,7,9,10,11,13] es la metodología más aplicada, cuando se trata de móviles para inspección en tanques metálicos o tuberías con paredes de acero, ya que las propiedades ferromagnéticas de las mismas permiten su uso, la energía del campo magnético puede obtenerse de electroimanes o imanes permanentes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

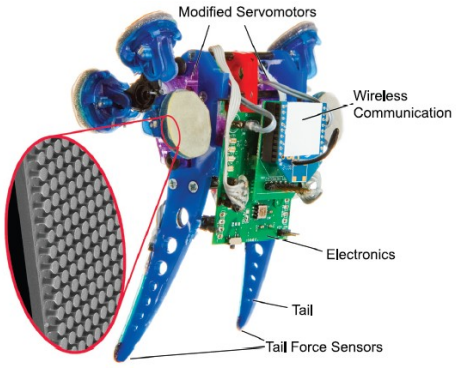


Figura 5: Móvil Escalador 3 pies por lado con almohadillas de microfibras adherentes

El uso de imanes permanentes Figura 6 implica un costo más elevado pero reduce el las dimensiones de la batería a bordo o, cables de conexión para generar el campo electromagnético de adhesión, lo que permite reducir drásticamente el consumo de energía del móvil, por ello se ha elegido a los imanes permanentes como tecnología de adhesión para el presente proyecto.



Figura 6: Móvil Escalador por adhesión magnética con imanes permanentes

3. Sistema de tracción y accionamiento

Existen diversas formas de tracción y accionamiento combinadas con el uso de imanes permanentes como medio de adhesión en [7] se plantea el uso de ruedas como el móvil de la Figura 6, con una disposición alternada de los imanes permanentes respecto del plano radial central de la rueda permite que siempre estén adheridos 3 imanes de cada rueda lo que le permite

ISBN: 978-987-1676-63-7

avanzar sin perder fuerza de adhesión y reducir el torque necesario al momento de iniciar el movimiento con partida detenida.

Las ruedas magnéticas omnidireccionales Figura 7, mejoran la maniobrabilidad [8] y permiten sortear obstáculos o pasar por deformaciones de la superficie a inspeccionar, manteniendo la adhesión durante maniobras en trayectorias no rectas y en zonas no planas de las superficies.

.



Figura 7: Rueda Omnidireccional de Móvil Escalador por adhesión Magnética

El sistema de oruga Figura 8 es una opción que resulta adecuada a la hora de incrementar la fuerza de adhesión [3] sin incrementar el torque para tracción ya que en el sistema de oruga la velocidad relativa es cero en los tramos adheridos y los tramos en los extremos de la oruga son los que varían su adhesión cuando hay desplazamiento, esta es la configuración elegida para el presente trabajo.

Se espera que la fuerza de adhesión permita mantener posicionado al móvil en un punto de medición sin necesidad de mantener accionados los motores por ello no es necesario el uso de motores paso a paso, se usaran motores de corriente continua con reductor para el movimiento del móvil.

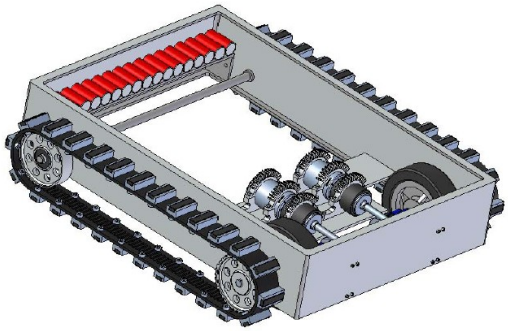


Figura 8: Móvil con oruga magnética

4. Análisis de Fuerzas

4.1 Análisis Estático

Para este análisis se consideran según [3], la fuerza de gravedad G, las fuerzas de adhesión F*mi* , fuerza de apoyo en la superficie N*i* y fuerza de fricción F*f*

En el caso de la Figura 9 se considera que el robot esta adherido a la pared vertical y si se desplaza respecto de la misma lo hace sin resbalar

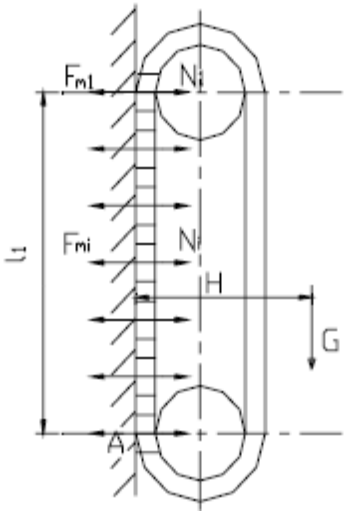


Figura 9: Móvil con oruga magnética adherido a pared ferromagnética vertical

En cuando el móvil avanza sin deslizarse la cinta de la oruga gira respecto del punto A y se mantiene el balance de fuerzas dado por

$$\sum_{i=1}^{n} Fmi = \sum_{i=1}^{n} Ni \qquad (1)$$

Cuando se levanta o despega de la superficie vertical el primer elemento magnético de la oruga, en el punto A el equilibrio de fuerzas está dado por:

$$\sum M_A = (F_{m1} - N_1) I_1 \text{ - } GH/2 = 0 \qquad (2)$$

Donde *l1* es la distancia entre punta A y el primer elemento que se levanta y *H* es la distancia del centro de masa del robot respecto de la superficie a la que están adheridos los otros elementos magnéticos de la oruga.

De (2) tenemos :

$$F_{m1} = \frac{GH}{2l_1} + N_1 \tag{3}$$

Si el primer elemento magnético se adhiere a la superficie :

$$N_1 \geq 0 \tag{4}$$

Entonces (3) se puede reescribir como:

$$F_{m1} \geq \frac{GH}{2l_1} \tag{5}$$

Cada unidad magnética de la oruga deberá cumplir con (5) para que el móvil permanezca adherido a la pared vertical.

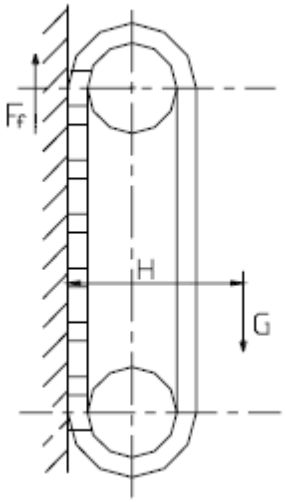


Figura 10 : Móvil con oruga magnética resbalando hacia abajo

En el caso de la figura 10 la fuerza de adhesión es menor a la necesaria, para que esto no ocurra aparece la primer restricción:

$$2 \cdot F_{f \geq} G \tag{6}$$

Donde μ es el coeficiente de fricción

$$F_f = \sum_{i=1}^{n} N_i \cdot \mu = \sum_{i=1}^{n} F_{mi} \cdot \mu = n\, F_m \cdot \mu \tag{7}$$

De (6) y (7) obtenemos

$$F_m \geq \frac{G}{2n \cdot \mu} \tag{8}$$

De (5) y (8) la fuerza de adhesión de cada elemento magnético de la oruga resulta:

$$F_m \geq max \left\{ \frac{GH}{2l_1}, \frac{G}{2n \cdot \mu} \right\} \tag{9}$$

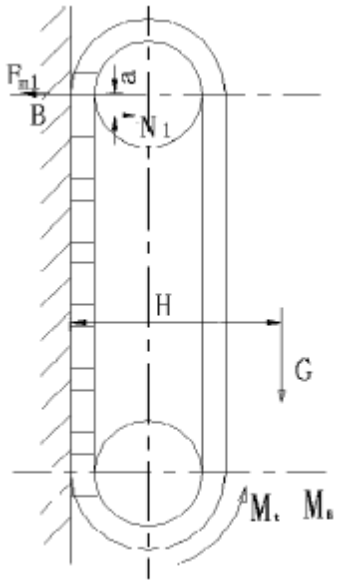


Figura 11 : Móvil desplazándose hacia abajo con oruga magnética adherida

La Figura 11 representa el caso en que existe adhesión suficiente, pero el torque de los motores que accionan la oruga no es suficiente, y se produce un desplazamiento del móvil hacia abajo, pero sin deslizamiento. El punto B de la figura 11 es el centro de rotación *Mb* es el torque de frenado y *Mt* es el torque dado por la transmisión, entonces tenemos:

$$M_B = M_b + M_t + F_{m1} \cdot a \; - GH/2 = 0 \tag{10}$$

$$M_b + M_t = GH/2 - F_{m1} \cdot a \tag{11}$$

Donde a es la distancia de N_1 y Fm_1

4.2 **Análisis Dinámico**

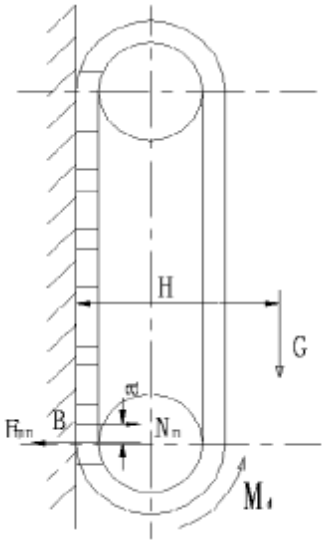


Figura 12 : Móvil desplazándose hacia arriba con oruga magnética adherida

Para que el móvil pueda desplazarse hacia arriba el torque de mando o drive debe ser tal que

$$M_d - F_{mn} \cdot a - GH/2 = 0 \tag{12}$$

Despejando $$M_d = F_{mn} \cdot a + GH/2 \tag{13}$$

Donde a es la distancia de N_n y Fm_n

Cuando el móvil se desplaza hacia abajo y elegimos al punto B como centro de rotación tenemos

$$M_B = M_t + F_{m1} \cdot a - M_d - GH/2 = 0 \quad (14)$$

$$M_d = M_t + F_{m1} \cdot a - GH/2 \quad (15)$$

A través de las expresiones (11), (13) y (15) pueden definirse los parámetros del motor

5. Sistema de Control

Se prevé usar encoders para realimentar posición y velocidad del sistema de tracción y también se incorpora el uso de un acelerómetro que permita mantener la trayectoria del móvil sobre la grilla de medición predefinida por norma. También se incorpora el uso de una cámara que permita al operador remoto tener visión cercana de los posibles obstáculos o deformaciones de la superficie que pudiese encontrar el móvil en su trayectoria. El Controlador central del móvil será una placa Raspberry PI 2 con procesador quad core, con 1GB de RAM, compatible con Windows 10, la cual es de bajo costo u$s 35 aproximadamente, esta placa de control habilita al robot para almacenar datos en memoria SD, comunicación Wifi, También una entrada de video RCA y salida HDMI, además de los pines I/O de propósitos generales, también posee dos canales SPI que puede usarse como canales de comunicación con alguna periférico como el acelerómetro también conectarse via usb con una placa arduino como placa esclava para interface I/O si fuese necesario.

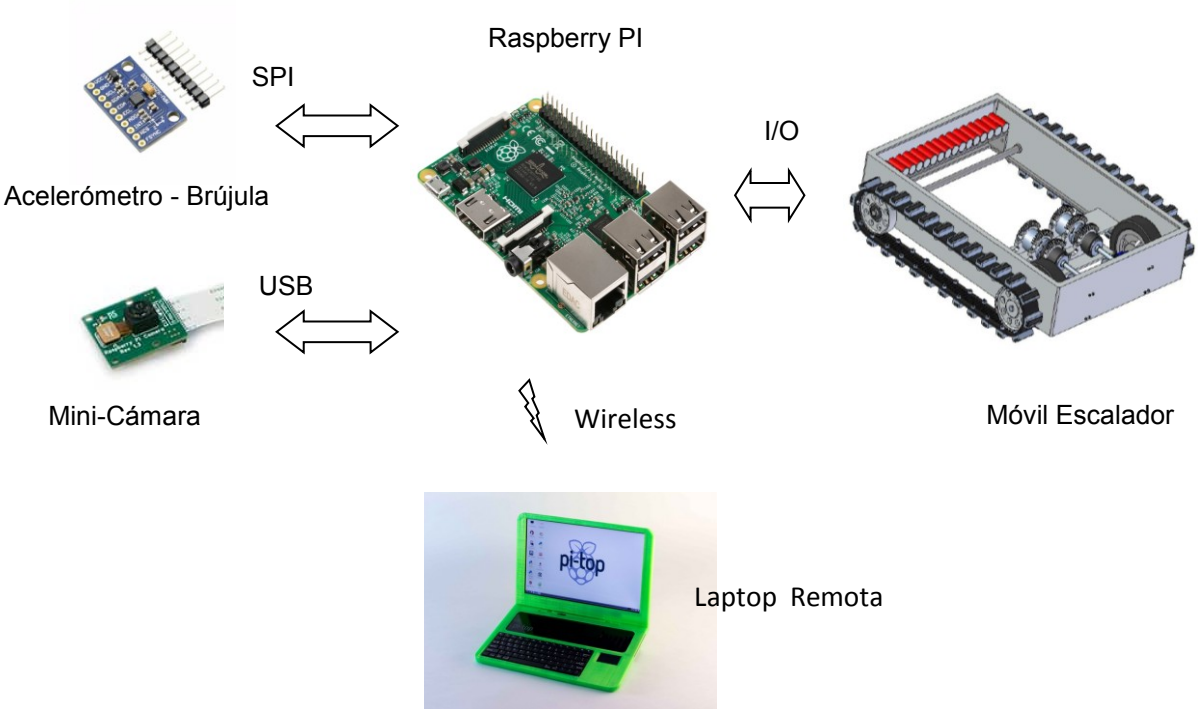


Figura 13 Esquema General de los componentes del sistema de control

5. CONCLUSIONES

A través del estudio de las opciones tecnológicas disponibles y el estado del arte, se han definido, qué tipo de sistema de adhesión y tracción se usará, y un análisis estático y dinámico de las fuerzas involucradas permite dimensionar los parámetros de los motores a usar, en la etapa de diseño e implementación del prototipo de móvil, también se ha planteado la estructura y los componentes necesarios para efectuar el control electrónico del móvil en forma remota.

4. REFERENCIAS

[1] Koh K., Sreekumar M., Ponnambalam S. *Experimental Investigation of the Effect of the Driving Voltage of an Electroadhesion Actuator* Journal on Materials Vol. 7 , Nº 7, pp 4963-4981, 2014

[2] Kalra L. Gu J. Meng M. *A Wall Climbing Robot for Oil Tank Inspection* Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Kunming, China pp. 1523-1528 December 17 - 20, 2006

[3] Shen W. Gu J. Shen Y. *Proposed Wall Climbing Robot with Permanent Magnetic Tracks for Inspecting Oil Tanks* Proceedings of the IEEE International Conference Mechatronics & Automation Vol 4. pp 2073-2077, 29 july -1 august, 2005

[4] Fernandez R. Gonzalez E. Felix V. *A Wall Climbing Robot for Tank Inspection. An Autonomous Prototype* IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1424 – 1429, 7-10 Nov. 2010

[5] Menegaldo L. Santos M. Ferreira G. Siqueira R. Moscato L., *SIRUS: A mobile robot for Floating Production Storage and Offloading (FPSO) ship hull inspection* 10*th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control* pp. 27-32 Trento, Italy, 2008

[6] Fernández R. González E. Feliú V. Rodríguez A. *A wall climbing robot for tank inspection. An autonomous prototype* IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, AZ, USA, pp. 1424-1429, 2010

[7] Eich M. Vögele T. *Design and control of a lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection* Proceedings on Control & Automation Mediterranean Conference, Corfu, pp. 1200-1205, 2011

[8] Tavakoli M. Viegas C. Marques L. Pires J. De Almeida A. *Magnetic omnidirectional wheels for climbing robots*, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 266-27, Tokyo, 2013

[9] Khirade N. Sanghi R. Tidke D. *Magnetic Wall Climbing Devices - A Review* Proceeding on International Conference on Advances in Engineering & Technology pp. 55-59 2014

[10] Solano J. Ramírez A. Vargas E. *Robot Móvil Orientado a Inspección No Destructiva en Tanques Ferromagnéticos* 4º Congreso Mexicano de Robótica DF, Mexico , 2002

[11] Fischer W. Tâche F. Siegwart R. *Magnetic Wall Climbing Robot for Thin Surfaces with Specific Obstacles* Journal Tracts in Advanced Robotics Springer Vol. 42 pp. 551-561, 2008

[12] Silva M. Machado J. Tar J. *A Survey of Technologies for Climbing Robots Adhesion to Surfaces* IEEE Proceedings on International Conference on Computational Cybernetics, pp. 127-132, Stara Lesna, Slovakia 2008

[13] Nagaya K. Yoshino T. Katayama M. Murakami I. Ando Y *Wireless Piping Inspection Vehicle Using Magnetic Adsorption Force IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 3, pp. 472-479, June 2012.

[14] Murphy M. Kute C. Mengüç Y. Sitti M. *Waalbot II: Adhesion Recovery and Improved Performance of a Climbing Robot using Fibrillar Adhesives* SAGE The International Journal of Robotics Research ,13 October, 2010

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE UN MODULO ROBOTICO DE INSPECCION PARA AMBIENTES SUBACUATICOS

E. Matías Robador [1,2], **Sol Pedre**[1, 2], **A. Tobías Quispe Mamaní** [1,2] **y Luis A. Rovere** [1,2]

[1] Instituto Balseiro – Universidad Nacional de Cuyo
Av. Bustillo 9500, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina
correo-e: robador88@gmail.com
[2] Grupo de Robótica CAREM - CAB
Centro Atómico Bariloche – CNEA
Av. Bustillo 9500, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina

RESUMEN

El presente trabajo es la continuación de [1]. Allí se realizó el diseño conceptual de un módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos. Dicho robot está pensado para la inspección visual del interior de recipientes a presión de reactores nucleares. Esta tarea se realiza con el objetivo de verificar el estado físico de los componentes internos del recipiente y detectar posibles fallas. Tradicionalmente, esto se efectúa de forma manual mediante cámaras durante el recambio de combustibles, lo que presenta inconvenientes, como la falta de precisión en el control de la cámara y el empleo de muchos operarios con la consiguiente exposición a la radiación, [2].

En [1] se concluyó que lo más conveniente es utilizar como propulsores unas pequeñas bombas hidráulicas, y direccionar el sentido de los jets o chorros de agua con servomotores. Se construyó el primer prototipo y se realizaron pruebas experimentales. Si bien éstas fueron satisfactorias para validar la idea conceptual del sistema de propulsión, mostraron varias fallas del mismo y aspectos por mejorar, como por ejemplo la necesidad de reemplazar algunos dispositivos por otros con homologaciones de impermeabilidad al agua.

El objetivo de este trabajo es diseñar, fabricar y caracterizar un sistema de propulsión con los nuevos componentes. Esto incluye el diseño del circuito hidráulico por el que salen los jets o chorros de agua; junto a una estructura que sirva de sostén para todas las piezas del sistema; la calibración de cada uno de los mecanismos de direccionamiento de los jets para darle mayor confiabilidad y repetitividad al sistema; el desarrollo de un circuito electrónico para controlar todos los dispositivos; la obtención de las curvas características de las nuevas bombas hidráulicas y por último; la realización de pruebas experimentales cualitativas con todo el sistema ensamblado.

Finalmente, se listan los posibles caminos a seguir en el proceso de optimización del robot completo.

Palabras Claves: *Robot subacuático, aplicaciones nucleares, propulsión por microbombas.*

Área Temática: Mecatrónica y Automatización

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedente: El robot Robotino

El presente trabajo es la continuación del realizado en [1]. Allí se realizó el diseño conceptual de un módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos. Este robot está pensado para poder inspeccionar ambientes cerrados abajo del agua, tales como tanques, cisternas, piletas, etc.; pero específicamente tiene su motivación en la inspección visual del interior de recipientes de reactores nucleares. Esto se realiza con el objetivo de verificar el estado físico de los componentes internos del recipiente y detectar posibles fallas, como ser fisuras o zonas de corrosión. Se logró construir el primer prototipo, al que se lo nombró *"Robotino"*, por un juego de palabras entre robot y submarino, con el que se realizó una serie de pruebas experimentales cualitativas. El objetivo de estas pruebas fue comprobar que la idea conceptual de propulsión mediante chorros de agua era viable.

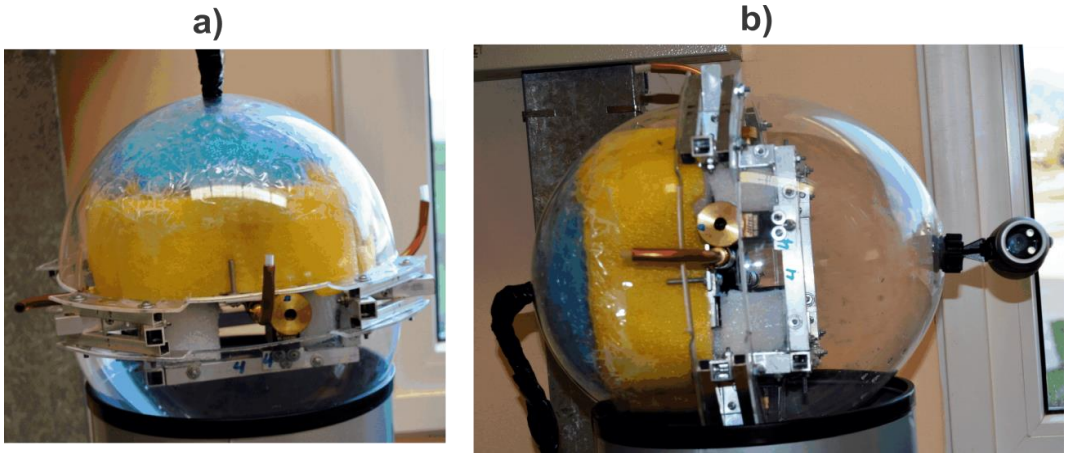


Figura 1: Fotografías del "Robotino". a) En posición vertical (normal) y b) en posición horizontal.

1.2. Sistema de propulsión de Robotino

El proyecto [1] se centró en el diseño mecánico del robot; específicamente, en el sistema de propulsión del mismo. Allí se concluyó que lo más conveniente para la aplicación pensada es utilizar como propulsores unas pequeñas bombas hidráulicas y direccionar el sentido de los chorros de agua con servomotores y un mecanismo de engranajes; ubicando los componentes de forma tal que los chorros de agua se disponen en forma simétrica, con una carcasa externa esférica, como se muestra en la Figura 2.

Dicho proyecto contaba con un presupuesto acotado. Por ello, el sistema de propulsión se realizó con componentes de fácil adquisición en el mercado local, que no eran impermeables de fábrica. Se selló de forma manual utilizando Fastik® y otros selladores de poliuretano.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 2: Imágenes renderizadas del sistema de propulsión y de la configuración final propuesta.

Las bombas son las comúnmente usadas en los limpia-parabrisas de los vehículos. El sistema de propulsión individual diseñado finalmente puede observarse en la Figura 3.

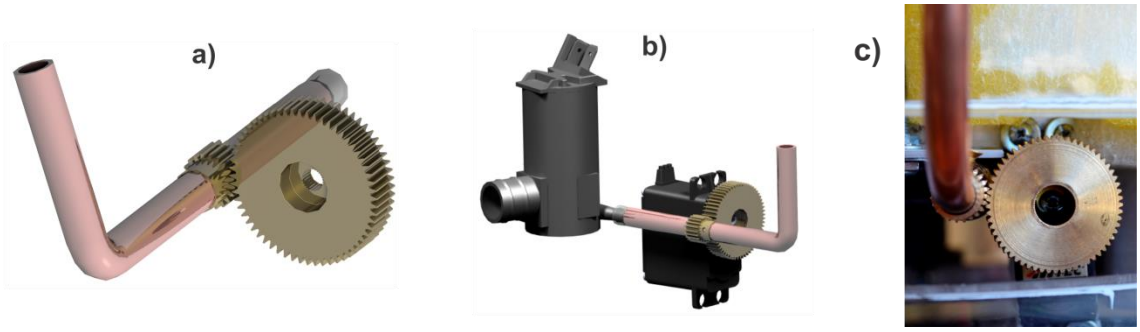


Figura 3: Sistema de propulsión: imágenes renderizadas del mecanismo de giro solo (a) y de todo el sistema (b); y una fotografía del dispositivo construido (c).

Se fabricaron cuatro sistemas como los de la Figura anterior y se ensamblaron a una carcasa esférica mediante una estructura compacta de perfiles de aluminio.

Si bien los resultados fueron satisfactorios, se pudieron detectar varios errores en el conjunto. Por ejemplo, la falta de precisión en la alineación de los ejes de los engranajes y la flexibilidad de los soportes, que condujeron a un problema de repetitividad del sistema; es decir, la corona y el piñón no engranaban perfectamente y por ello, la señal de control enviada a los servos no siempre coincidía con la posición angular deseada para el tubo por el que sale el chorro de agua.

Además, el principal problema fue que luego de un tiempo, los sellos implementados cedieron y algunas bombas y servos empezaron a fallar, como se muestra en la Figura 4, donde se abrió un servo que no funcionaba. Allí puede verse el motor de corriente continua con sus partes oxidadas.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 4: Fotografía de uno de los servomotor es abiertos.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo general de este nuevo proyecto es mejorar el robot submarino desarrollado en el trabajo anterior, corrigiendo los errores identificados y abarcando los aspectos que no se tuvieron en cuenta previamente. En particular, en este trabajo se explica la optimización del sistema de propulsión. Desde el diseño hasta la fabricación de un nuevo sistema con dispositivos que cuentan con homologaciones internacionales de impermeabilidad al agua, sujetos a soportes rígidos que permitan sólo los movimientos deseados para el mecanismo de giro y aseguren un perfecto engrane entre corona-piñón, para darle mayor confiabilidad y repetitividad al sistema.

2. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

2.1. Componentes impermeables

En la Figura 5 se muestran los componentes adquiridos para el nuevo sistema de propulsión. Las bombas son marca Micropumps™ y los servomotores son marca Hitec™, ambos son de dimensiones reducidas ((25 x 26 x 40) mm las bombas y (31 x 15 x 31) mm los servos).



Figura 5: Componentes impermeables para el nuevo sistema de propulsión.

Estos dispositivos poseen un grado de protección internacional IP67, [3]. De esta manera se soluciona el problema que se presentó en el prototipo anterior con los sellos utilizados.

2.2. Circuito hidráulico

En base al diseño mostrado en las Figuras 2 y 3, se ve que es necesaria una curva de 90° que re-direccione el jet o chorro de agua a un plano normal a el eje de salida de la bomba.

Se encontró en [4] la expresión (1) para el factor de pérdida de carga en codos de 90° para flujo turbulento:

$$K \approx 0.388\ \alpha\ (R/d)^{0.84}\ Re^{-0.17} \tag{1}$$

Donde $\alpha = 0.95 + 4.42\ (R/d)^{-1.96} \geq 1$ y $Re = (\rho\ v\ d)/\mu$ es el número de Reynolds (ρ, v y μ son la densidad, viscosidad y velocidad del fluido, respectivamente y d es el diámetro interno de la curva).

Para el diseño de la curva se pensó elegir un radio de curvatura tal que minimice las pérdidas de carga en el circuito. El valor óptimo se obtuvo derivando la expresión anterior respecto al parámetro R, igualándola a cero y despejando, como se indica en (2).

$$\frac{dK}{dR} = 0 \rightarrow R_{ópt} \approx \left(\frac{4.9504}{0.798}\right)^{1/1.96} \times d \cong 2.5375d \tag{2}$$

Hay que mencionar que esta relación es sólo indicativa para elegir un valor adecuado de R.

Este valor surge de la combinación de dos efectos distintos: por un lado, los efectos de fricción en las paredes, o “pérdidas de Moody”, que aumentan al aumentar la longitud del codo y por otro lado; las pérdidas debido a la separación del flujo en las paredes y a la formación de flujos secundarios inducidos por la aceleración centrípeta, que disminuyen con R/d. El valor encontrado es el punto en el que los dos efectos se igualan y se tiene el mínimo de pérdidas totales.

Para tener uniformidad en los cuatro sistemas de propulsión, se optó por fabricar la curva con una impresora 3D, utilizando un material termoplástico: PLA (ácido poliláctico).

El diámetro interior d del codo de 90° se fijó a partir de las dimensiones del piñón, para poder unirlos solidariamente como se muestra en la Figura 6 (a). Antes de la curva, fue necesario agregar un tramo de conducto recto al circuito. Este tramo es muy importante tanto desde el aspecto mecánico, como hidráulico, ya que sirve como punto de apoyo para que toda la pieza gire dentro de un buje y quede bien alineado el eje de rotación con el eje de salida de la bomba; y aparte sirve para que el flujo que sale pueda entrar de forma uniforme a la curva de 90°.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El último componente del circuito fue una tobera de 30° que sirve para reducir el área de salida del chorro y acelerar el fluido, y con ello lograr una mayor fuerza de propulsión. Ya que ésta última depende del cuadrado de la relación entre el caudal de la bomba, Q, y el diámetro de salida, D, como se indica en la Ecuación (3), según lo indicado en [4].

$$F_{prop} \cong \dot{m}v = \rho Q v = \rho \frac{Q^2}{A} = \rho \frac{4Q^2}{\pi D^2} \quad (3)$$

En la Figura 6 (b) se muestran las dimensiones del circuito diseñado finalmente.

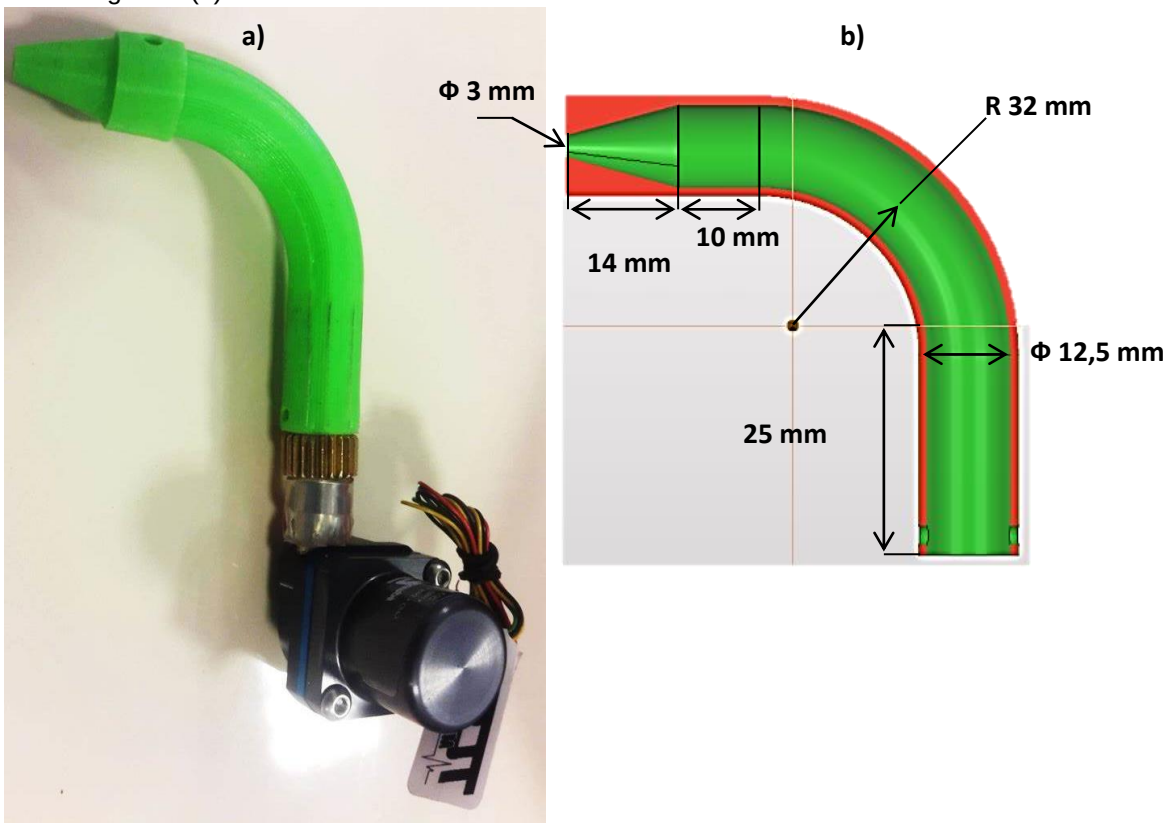


Figura 6: a) Fotografía del sistema hidráulico completo: Microbomba, con la salida conectada a la curva impresa en 3D. b) Dimensiones de la pieza, compuesta por un tramo recto, una curva de 90° y una tobera al final.

2.3. Soporte mecánico del sistema

Se diseñó una pieza que sirve de sostén tanto para la bomba, como para el servo y que a la vez cumple la función de buje del tubo de salida del chorro de agua. Se fabricaron cuatro de éstas en impresoras 3D. En la Figura 7 se muestran dos piezas fabricadas (arriba) y el sistema de propulsión armado, con los dispositivos ensamblados (abajo).

ISBN: 978-987-1676-63-7

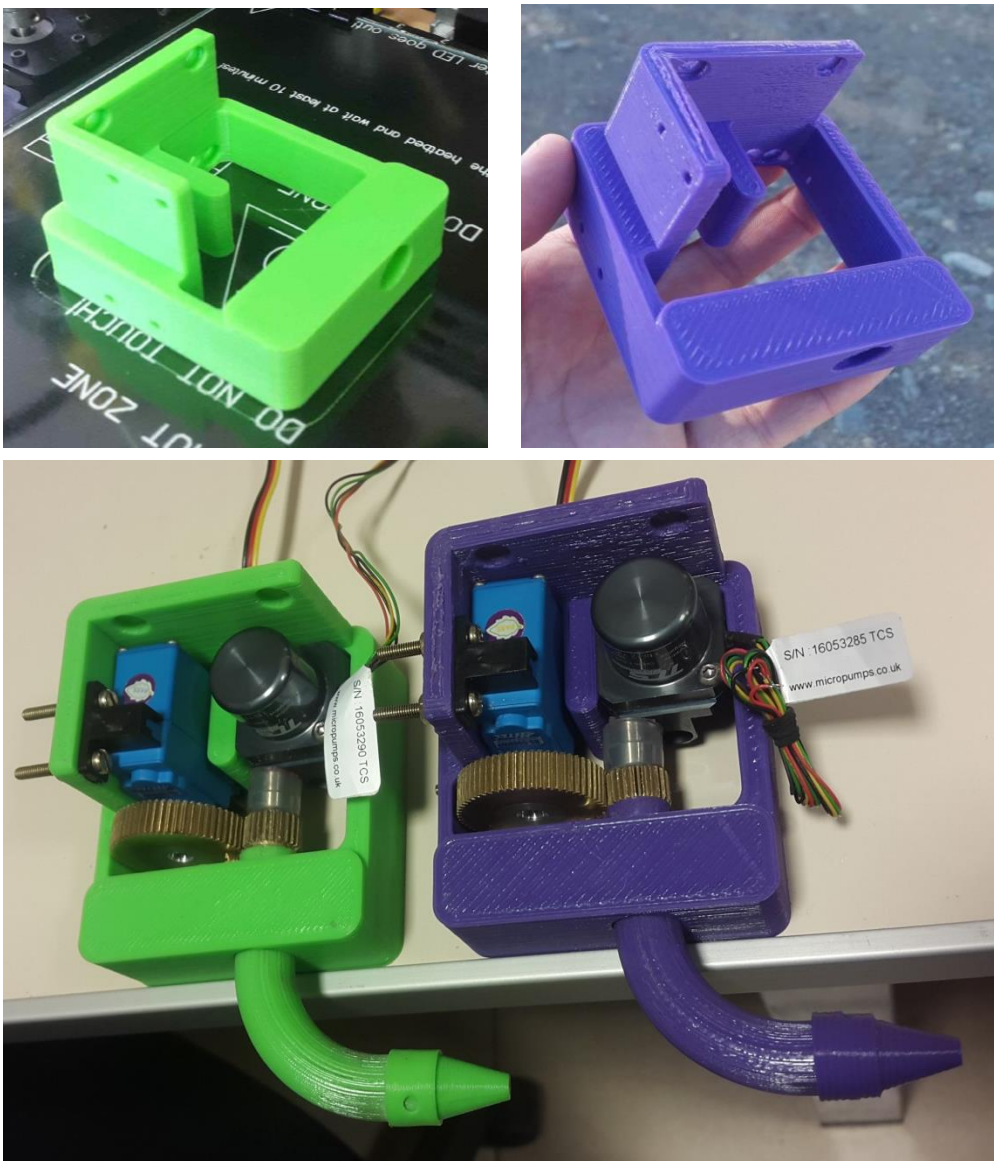


Figura 7: Fotografías del soporte mecánico de las piezas (arriba) y del sistema de propulsión con todos los componentes ensamblados (abajo).

3. CONTROL DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

El control implementado para comandar tanto las bombas como los servos fue muy similar al realizado antes en [1]. Se efectuó utilizando un microcontrolador de Arduino™. Se realizó un código en lenguaje C para controlar los movimientos del robot. Las órdenes se enviaron desde el CPU al Arduino a través del puerto USB. Los circuitos eléctricos realizados fueron relativamente sencillos; básicamente, se controló la velocidad de las bombas y la posición angular de los servos utilizando el método de PWM. Al final, para reducir la posibilidad de fallas se realizó un circuito impreso o PCB (por sus siglas en inglés *Printed Circuit Board*) con métodos domésticos.

En la Figura 8 se muestra el circuito eléctrico esquemático implementado, realizado en el programa Eagle™.

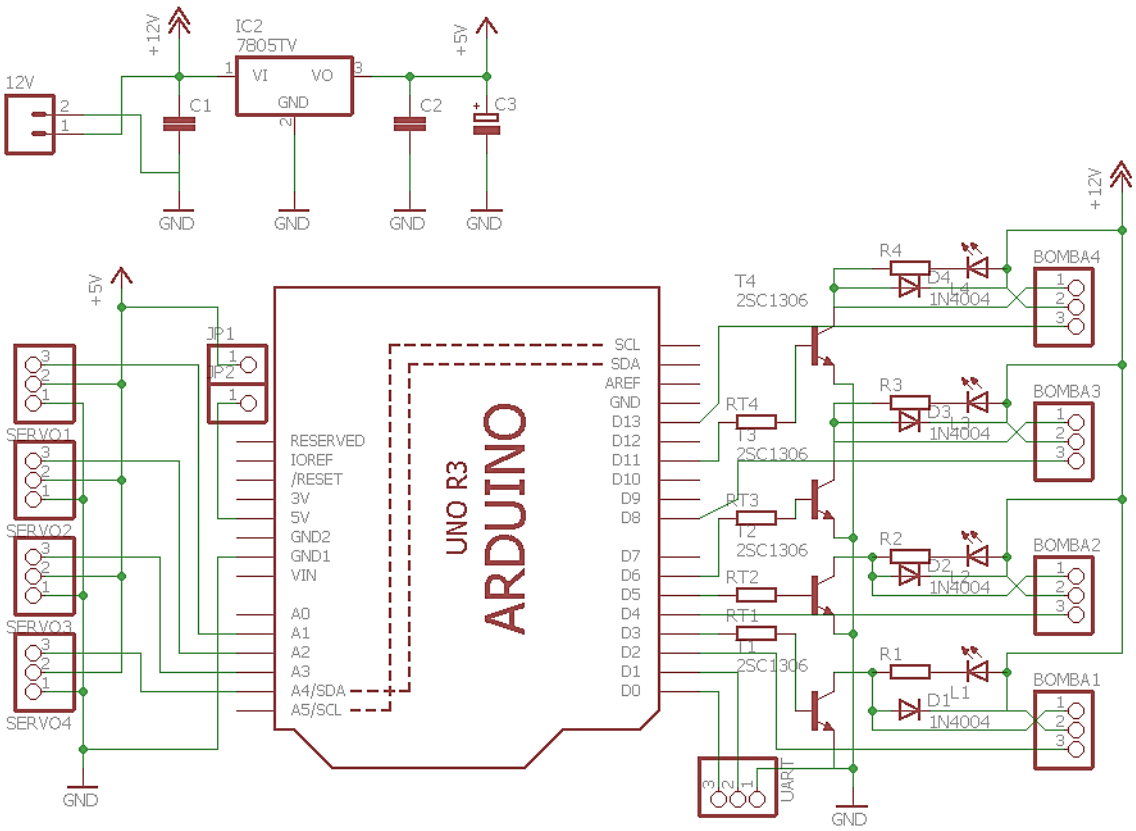


Figura 8: Circuito esquemático implementado para controlar el sistema de propulsión del robot.

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.1. Calibración del mecanismo de giro

Se calibró la posición angular de la tobera en el plano normal al eje de salida de la bomba, en función de la señal de PWM enviada al servomotor; para cada sistema de propulsión en particular. Esto se realizó partiendo de la posición neutral del servo (90°), que se corresponden con una señal de pulsos de 1500 μs de duración, según las especificaciones del fabricante. Se hizo coincidir esa posición del servo con la tobera ubicada a 180°. Luego, se hizo girar el servo en sentido horario y anti-horario hasta sus extremos y se registró la posición de la tobera y la señal de PWM enviada (en micro-segundos), para que el servo alcance esas posiciones. Finalmente, se tomaron dos puntos de interés para cada lado de la posición neutral, como se muestra en la Figura 9 de forma esquemática (a la izquierda el giro del servo es en sentido anti-horario y horario a la derecha).

ISBN: 978-987-1676-63-7

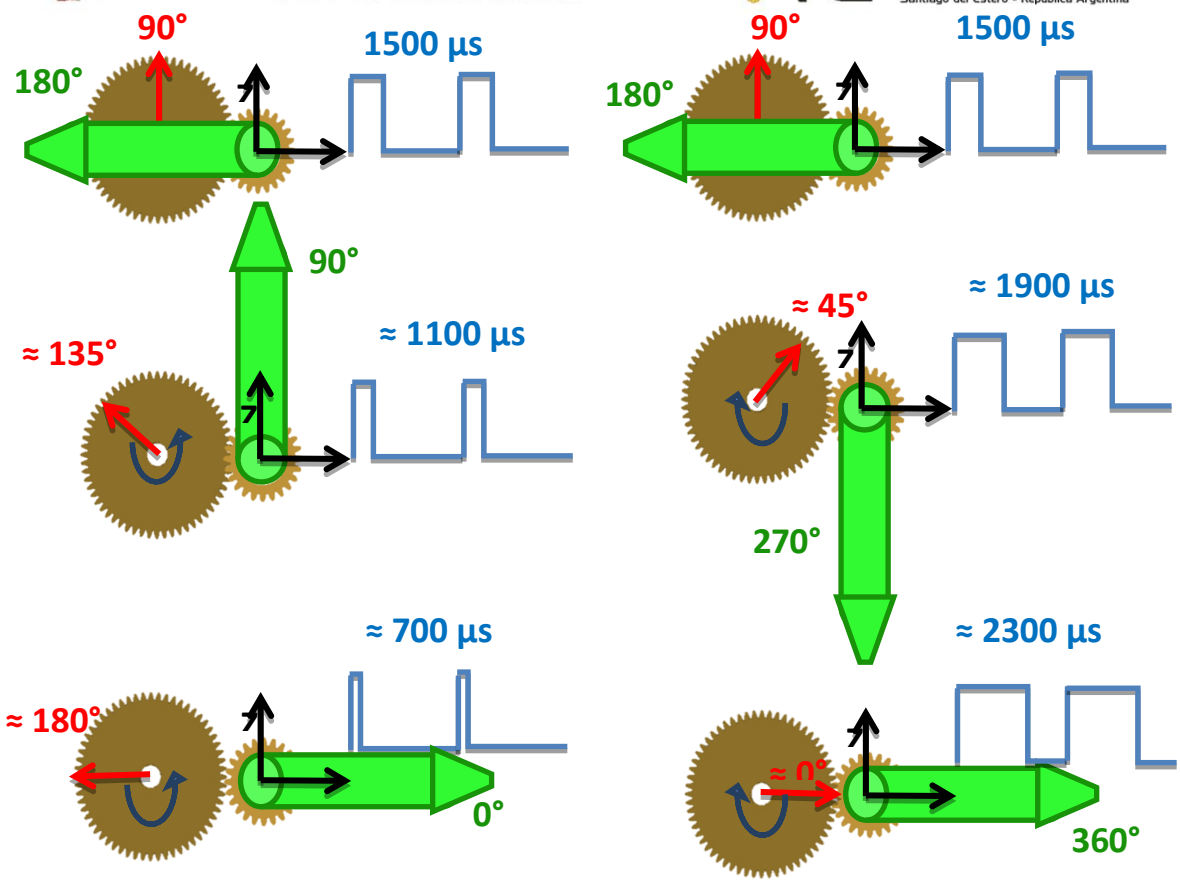


Figura 9: Diagrama esquemático del proceso de calibración de la posición angular de la tobera (en verde) respecto a la señal de PWM enviada (en azul). Se indica también la posición aproximada del servo (en rojo).

Este procedimiento se repitió para cada uno de los sistemas de propulsión, y se obtuvo una relación lineal entre la posición de la tobera y el ancho de pulsos enviado. Esto se realizó con el fin de obtener un sistema con mayor confiabilidad y repetitividad en el posicionamiento angular de la tobera por la que sale el chorro de agua.

4.2. Pruebas cualitativas

Con el objetivo de validar cualitativamente todo lo realizado hasta aquí en el proceso de optimización del sistema de propulsión. Se atornillaron los cuatro soportes en las caras de un recipiente de plástico. Se colocó flotadores en el interior del recipiente para equilibrar el peso de los componentes y tener un módulo con flotabilidad levemente positiva; es decir, que al introducirlo en el tanque de agua flote sobre la superficie de la misma, para poder observar el funcionamiento del robot. Se impermeabilizaron las conexiones con selladores de poliuretano y se introdujo todo el conjunto en un tanque de agua de 1000 litros, como se muestra en la Figura 10.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se verificó el correcto funcionamiento de las bombas y los servos. Estas pruebas permitieron comprobar cualitativamente los movimientos de avance, retroceso y giro en el plano paralelo a la superficie del agua; y los movimientos verticales de flotación e inmersión de todo el sistema.

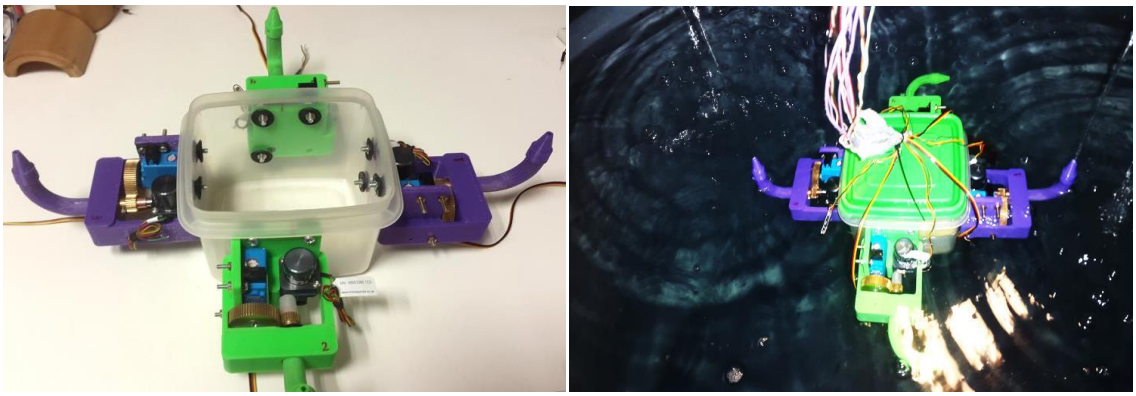


Figura 10: Fotografías del módulo fabricado para validar el diseño cualitativamente. Ensamblaje (izquierda) y en funcionamiento dentro del tanque de agua (derecha).

4.3. Caracterización de la bomba centrífuga sumergible

Para poder controlar la propulsión del robot de forma adecuada es necesario conocer ciertas características del funcionamiento del componente principal del sistema: la bomba centrífuga.

Primero se midió el caudal en función del voltaje de alimentación en todo el rango de operación y se obtuvieron los caudales máximos y mínimos que entrega la bomba: $Q_{mín} = (668 \pm 3)\text{ml/min}$ y $Q_{máx} = (241 \pm 1) \cdot 10\text{ml/min}$ para 4 y 10,5 V respectivamente. Como se muestra en la Figura 11.

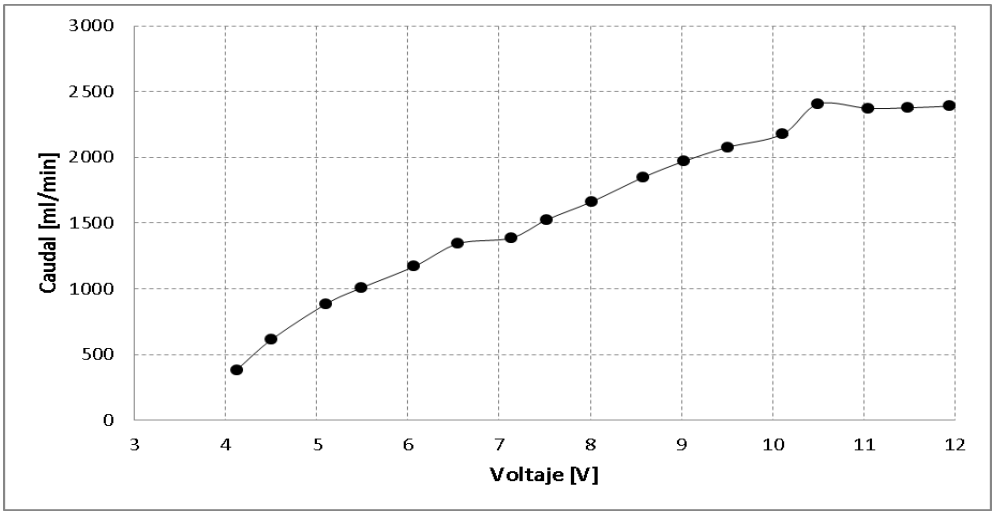


Figura 11: Curva característica de la bomba centrífuga: Caudal vs Voltaje

De la curva anterior se ve que para voltajes mayores a 10,5 V el caudal se mantiene prácticamente constante alrededor de $Q_{máx}$. Esto es así porque se alcanzó el máximo de corriente permitido.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Luego se realizó otro experimento que permitió obtener la curva característica de Presión vs Caudal de la bomba. Como medida de seguridad, se fijó el voltaje en 9 V teniendo en cuenta la prueba anterior. Se comparó los resultados empíricos con las curvas brindadas por el fabricante (a 6 V y 12 V), como se muestra en la Figura 12.

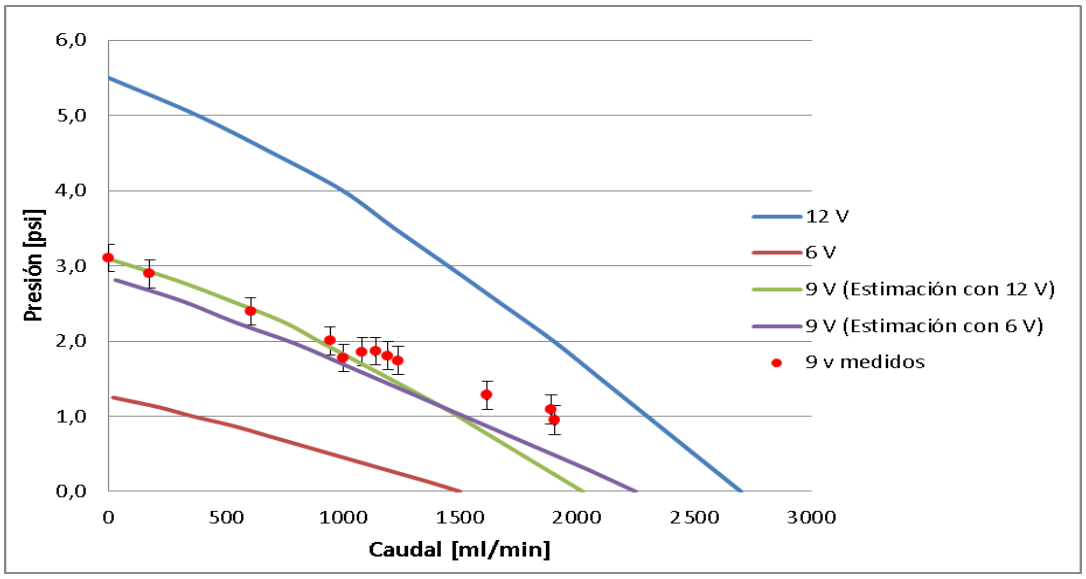


Figura 12: Curva de Presión vs Caudal de la bomba centrífuga.

Por último, se obtuvieron las curvas de potencia consumida y entregada por la bomba, y la eficiencia en función del Caudal. Se determinó que la potencia consumida se mantiene alrededor de $P_e = (2{,}9 \pm 0{,}2)\text{W}$ y el punto de mayor eficiencia alrededor de $\eta_{máx} \cong 0{,}87 \pm 0{,}10$ para un caudal de $Q_{\eta\_máx} = (120 \pm 1) \cdot 10\text{ml/min}$. Como se muestra en la Figura 13.

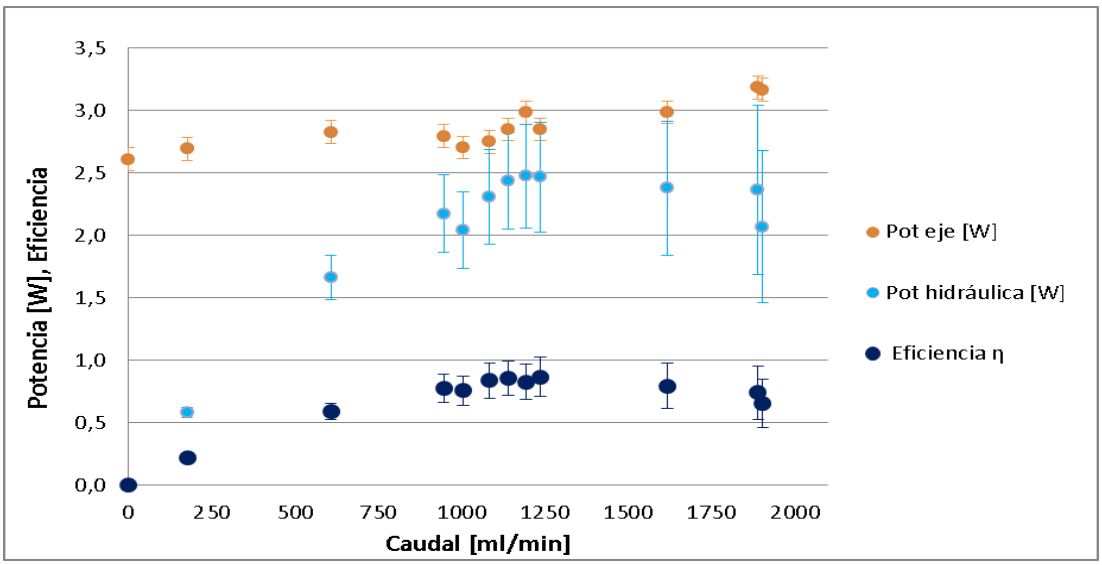


Figura 13: Potencia consumida por el motor eléctrico, Potencia hidráulica y Eficiencia vs Caudal.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. CONCLUSIONES

Como conclusión general puede decirse que se logró realizar una optimización del sistema de propulsión basado en impulsión mediante chorros de agua del robot subacuático Robotino.

Este proceso de optimización se realizó mediante varias mejoras implementadas, respecto al sistema de propulsión anterior, que se describen a continuación:

- Se cambiaron los componentes principales del sistema (bombas hidráulicas y servomotores) por dispositivos de prestaciones similares, pero con certificaciones de impermeabilidad frente a la inmersión en agua.
- Se rediseñó el circuito hidráulico de salida del jet, considerando minimizar las pérdidas de carga en el codo de 90° y aumentar la velocidad de salida del chorro con una tobera, para obtener un mayor empuje. El codo y la tobera se imprimieron en 3D con material PLA.
- Se rediseñó y fabricó en 3D el soporte de todas las piezas, considerando solucionar problemas mecánicos de funcionamiento que se presentaron anteriormente.
- Se calibró el mecanismo de giro, buscando mayor confiabilidad y repetitividad en la posición angular del circuito hidráulico de descarga, en función de la señal de PWM.

Luego se realizaron pruebas cualitativas en un tanque de agua de 1000 litros que verificaron el correcto funcionamiento de todo el sistema y probaron la viabilidad de la idea conceptual del sistema de propulsión mediante chorros de agua.

Por último, se logró obtener la curva característica de Presión vs Caudal de la bomba hidráulica centrífuga adquirida. Esto se realizó con un voltaje fijo de 9 voltios y los resultados obtenidos se consideran satisfactorios debido que se acercaron lo suficiente a las estimaciones realizadas previamente y se ubicaron entre las curvas de 6 y 12 voltios dadas por el fabricante.

Además, se logró determinar los caudales máximos y mínimos que entrega la bomba en todo su rango de voltaje de operación, junto con las curvas de potencia consumida y entregada por la bomba; y con ellas se calculó la eficiencia.

Algunos lineamientos posibles para continuar con la optimización del robot completo serían:

- Analizar la señal de velocidad de giro de la bomba (RPM) e implementar un control a lazo cerrado para regular el caudal que entrega la misma.
- Diseñar y fabricar una cámara impermeable donde se puedan alojar baterías y toda la electrónica para evitar el cableado de alimentación.
- Desarrollar un sistema dedicado exclusivamente a regular el nivel de flotabilidad.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. REFERENCIAS

[1] Robador, E. M., Pedre, S., Quispe Mamaní, A. T., Rovere, L., *Diseño conceptual de módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos*, IV CAIM 2014: Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, ISBN 978-987-45571-0-0, Resistencia, Chaco del 2 al 5 de Setiembre de 2014.

[2] Cho, B-H., Byun, S-H., Yang, J-B, Song, S-I., Oh, J.M., *Kepro VT: Underwater robotic system for visual inspection of nuclear reactor internals.* Nuclear Engineering and Design 231 (3), 327-335, 2004.

[3] Colaboradores de Wikipedia. *Grado de protección IP* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016 [fecha de consulta: 12 de mayo del 2016]. Disponible en

<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Grado_de_protecci%C3%B3n_IP&oldid=89375975>.

[4] White, F. M. *Fluid Mechanics*. 4° edición. WCB/McGraw-Hill, 2008.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la cátedra de la materia Laboratorio III del Instituto Balseiro y al grupo de Robótica del proyecto CAREM de la CNEA por el apoyo constante en todas las etapas de este proyecto. Así también, a las autoridades del Instituto Balseiro por el presupuesto destinado a la adquisición de los nuevos componentes.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN DE UNA INTERFAZ PASIVA DE BAJA FRECUENCIA PARA UNA APLICACIÓN DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Diego A. Vicente, Martín S. Baudino, Fernando D. Mazzaferro y Pablo M. Azcona

Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 Nº390, General Pico, La Pampa, Argentina
correo-e: vicente@ing.unlpam.edu.ar.

RESUMEN

El mantenimiento de máquinas por monitoreo de condición requiere la medición y el seguimiento de determinadas variables físicas como temperatura, presión, vibración, etc, para anticiparse a la falla. Sin embargo el monitoreo automático de ciertos parámetros, en algunos elementos de máquina, puede ser sumamente dificultoso. Los espacios reducidos y el continuo movimiento de las partes, a veces, hacen imposible la inserción de sensores cuya transmisión de información se hace mediante cables.

En este sentido el trabajo presenta la evaluación preliminar de una interfaz pasiva de baja frecuencia (PaLFI), como elemento base para el desarrollo de un sistema automático embebido para el monitoreo de temperatura en cojinetes de biela, en grandes bombas de desplazamiento positivo. La PaLFI se compone básicamente de dos elementos: una estación base o lector y un circuito etiqueta o transponder, que se comunican mediante la técnica de identificación por radio frecuencia (RFID). La estación base posee una bobina que irradia energía, mientras que la etiqueta, por medio de un circuito resonante, captura parte de la energía radiada y la utiliza para alimentar circuitos digitales que luego transmiten información a la estación base.

En general las aplicaciones típicas de la PaLFI se caracterizan por la gran proximidad entre el lector y la etiqueta, la utilización de bajas tasas de transferencia de datos y la utilización de etiquetas pasivas en entornos semi-estáticos. Sin embargo el presente trabajo presenta la evaluación de este sistema para una aplicación dinámica, como el monitoreo de temperatura en los cojinetes de biela. En el concepto que se propone, la etiqueta está solidaria a la biela y se encarga de hacer las mediciones de temperatura, mientras mantiene un movimiento relativo a la estación base. La estación base, solidaria a la carcasa de la bomba, recibe la información de la etiqueta y la transmite al sistema de monitoreo.

Palabras Claves: *monitoreo de temperatura, sistema embebido, identificación por radiofrecuencia.*

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de máquinas por monitoreo de condición requiere la medición y el seguimiento de variables físicas tales como temperatura, presión, vibración, etc, para anticiparse a la falla.

Sin embargo el monitoreo automático de ciertos parámetros en algunos elementos de máquina puede ser sumamente dificultoso. Los espacios reducidos y el continuo movimiento de las partes, a veces, hacen imposible la inserción de sensores cuya transmisión de información se hace mediante cables. Este es el caso del monitoreo de condición en los cojinetes de biela en máquinas alternativas.

En este tipo de máquinas se ha demostrado que la medición de temperatura en los cojinetes de biela resulta muy valiosa a la hora de determinar la condición de estos elementos [1]. Una técnica que se ha utilizado durante décadas implica la instalación de un dispositivo montado con una soldadura de aleación eutéctica, que se funde cuando alcanza una temperatura predeterminada. De esta manera, cuando la temperatura local alcanza el punto de fusión de la aleación, se libera un resorte que actúa sobre un vástago y acciona un interruptor [1, 2].

Por otro lado los sensores de temperatura inalámbricos, basados en radar, han ganado espacio en aplicaciones relacionadas a compresores alternativos de baja velocidad. A diferencia de los sistemas eutécticos, que proveen información binaria (todo/nada), estos sensores permiten relevar la evolución de la temperatura en los cojinetes.

Generalmente estos sistemas consisten de un dispositivo estacionario y uno que se mueve solidario al elemento de la máquina que está en movimiento.

El proceso de medición comienza con la antena del dispositivo estacionario emitiendo un pulso de interrogación. Cuando este pulso alcanza a la antena del dispositivo móvil, se inducen ondas superficiales elásticas que recorren un sustrato piezoeléctrico, utilizado como elemento sensor. Sobre este elemento existen nodos reflectores espaciados y cuando las ondas superficiales alcanzan la posición de uno de los nodos se genera un pulso electromagnético que luego es recogido por la antena estacionaria. La velocidad de propagación de las ondas, sobre el elemento sensor, depende de la temperatura. Por ello, a partir de un sistema de procesamiento de señales, se evalúa la forma y el espaciamiento de la respuesta de impulsos para determinar la temperatura en el cojinete [1].

Como se puede ver, este sistema determina la temperatura a partir de una medición indirecta, por lo que se requiere un proceso de ajuste y calibración exhaustivo para correlacionar la respuesta de impulsos, provenientes del sustrato, con la temperatura del cojinete.

Como una alternativa a aquellos sistemas, aquí se presenta un concepto para el desarrollo de un prototipo inalámbrico automático para el monitoreo de temperatura en cojinetes de biela, a

partir de una medición directa. En particular el trabajo presenta la evaluación preliminar de una interfaz pasiva de baja frecuencia (PaLFI) como elemento base para la implementación final.

La PaLFI se compone básicamente de dos elementos: una estación base o lector y un circuito etiqueta o transponder, que se comunican mediante la técnica de identificación por radio frecuencia (RFID). La identificación por radio frecuencia es una tecnología que utiliza ondas de radio para enviar y recibir información entre un lector RFID y sus correspondientes etiquetas.

En el concepto que se propone la etiqueta, solidaria a la biela, posee un microcontrolador que se ocupa de relevar la información proveniente de las termocuplas, encargadas de medir la temperatura en cada uno de los cojinetes. La estación base, solidaria a la carcasa de la bomba, recibe la información de la etiqueta y la transmite al sistema de monitoreo.

Este trabajo está ordenado de la siguiente manera: en primer lugar se presenta una descripción breve y general de los sistemas RFID y en particular de la PaLFI. A continuación se introduce el esquema general del concepto, describiendo las particularidades del mismo en relación a la inclusión de la PaLFI y sus características. Seguidamente se exhiben y se discuten los principales resultados experimentales, sobre los que se basó la evaluación de la inserción de la interfaz RFID en el concepto propuesto. Finalmente se presentan las conclusiones de la evaluación.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ RFID UTILIZADA

La identificación por Radio Frecuencia (RFID) es una tecnología que utiliza ondas de radio para enviar y recibir información. Un sistema RFID típico consiste de un lector o estación base (EB) y un transponder o etiqueta (E).

La E de un sistema RFID puede ser activa o pasiva, dependiendo básicamente de la fuente de energía de la que se alimenta [3]. En los sistemas activos la etiqueta se alimenta desde una batería, mientras que en los pasivos la etiqueta se alimenta de la energía radiada por el lector.

Las bandas de frecuencia más comúnmente usadas son 125-135 kHz (baja frecuencia), 13,56 MHz (alta frecuencia), 860–960 MHz (ultra alta frecuencia) y 2,45-5,8 GHz (microondas) [4]. Aunque los sistemas de microondas poseen mayor alcance, generalmente estos requieren sistemas activos, ya que no son capaces de proveer la energía suficiente para el funcionamiento de los CI presentes en la etiqueta. Además las ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, en particular las microondas, poseen mayor grado de atenuación en sustancias conductoras y no conductoras. La tasa de atenuación a 100 kHz es notablemente menor que a 1 GHz, por lo que en términos generales se puede establecer que los sistemas de baja frecuencia prácticamente no son atenuados por el agua y sustancias no conductoras [4].

En este caso particular se evalúo la interfaz eZ430-TMS37157 de Texas Instruments [5]. En la Figura 1.a se muestran el lector (estación base) y la etiqueta de esta interfaz, mientras que en

ISBN: 978-987-1676-63-7

la Figura1.b se muestra un diagrama de bloques de un sistema sensor basado en esta interfaz y además se identifican los principales componentes de la E.

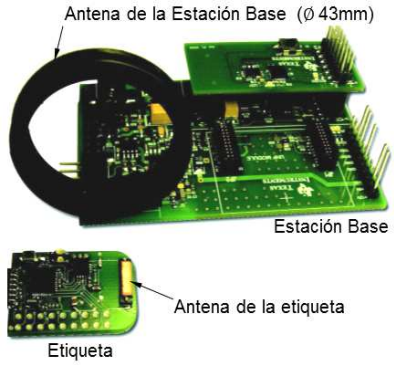


Figura 1.a: Interfaz RFID utilizada

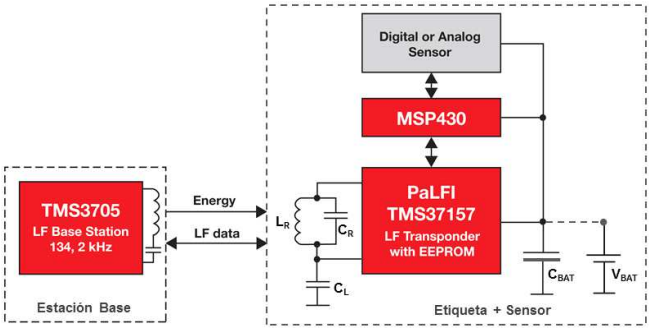


Figura 1.b: Diagrama de bloques del sistema

En este caso, además del circuito resonante, la etiqueta posee dos componentes fundamentales: el TMS37157, y un microcontrolador MSP430. El TMS37157 es un transponder RFID de baja frecuencia (134.2kHz), que además posee una interfaz SPI “Serial Peripherals Interface’’ facilitando su interconexión con el microcontrolador. De esta manera el lector accede a la memoria del TMS37157 a través de la interfaz RFID y por otro lado el microcontrolador, presente en la misma etiqueta, lo hace a través la interfaz SPI.

Además el TMS37157 posee algunas funciones particulares de manejo de energía, que permiten que los CI, presentes en la etiqueta, puedan ser alimentados a partir de la energía captada por la interfaz RFID (etiqueta pasiva), o bien a través de una batería externa V_{BAT} (etiqueta activa) [6]. La posibilidad de que la E pueda ser alimentada a través de una batería externa, cuando esto es necesario, le confiere al sistema mayor flexibilidad. Por ejemplo, esto facilita su uso en aplicaciones donde existe comunicación entre la E y la EB, pero la energía captada es insuficiente para alimentar al microcontrolador y los demás CI de la E, durante el ciclo de operación. También permite que los CI de la E permanezcan activos o se activen ante cualquier evento, sin necesidad de la intervención de la EB.

Por último, esta etiqueta puede operar en conjunto con un lector o estación base EB que puede tener diferentes características en cuanto a la geometría y dimensiones de las antenas, así como también en cuanto a la intensidad del campo radiado [7]. Las distancias de comunicación entre la E y la EB y la cantidad de energía captada por la E, dependerán en gran medida de las características de la antena utilizada y de la energía radiada. En este trabajo particular se utilizó la EB eZ430-TMS37157 EVM Reader con una antena ϕ 43 mm (Figura 1.a) cuyas principales características se pueden encontrar en [8]. Para una antena determinada la intensidad del campo depende la corriente de excitación. En este sentido la EB se puede alimentar a través de un puerto USB (5 V, 0,5 A) o con una fuente externa de 9 a 15 V y hasta 1 A.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. ESQUEMA PRELIMINAR PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN COJINETES

En la Figura 2 se muestra la bomba alternativa Siam Triplex, típicamente utilizada en la industria del petróleo. La figura se focaliza en la zona que alberga el conjunto formado por el cigüeñal, la biela, la cruceta y el cilindro, ya que es la zona de interés a los efectos de esta aplicación.

En la Figura 3 se muestra un esquema del prototipo que se propone para medir temperatura en los cojinetes de una biela. En términos generales la etiqueta se encuentra solidaria a la biela y está unida a los termopares de cada uno de los cojinetes. De esta manera el microcontrolador de la etiqueta es el encargado de hacer las lecturas de las termocuplas. La EB, solidaria a la carcasa de la bomba, se encarga de manejar la comunicación con la E y sacar la información de temperatura desde el interior de la bomba.

En este caso la E posee además un CI acondicionador de señal para termocuplas, el ADS1018 [9]. Las termocuplas están conectadas a este CI, el cual acondiciona y adquiere la señal de las mismas y transfiere la información al MSP430.

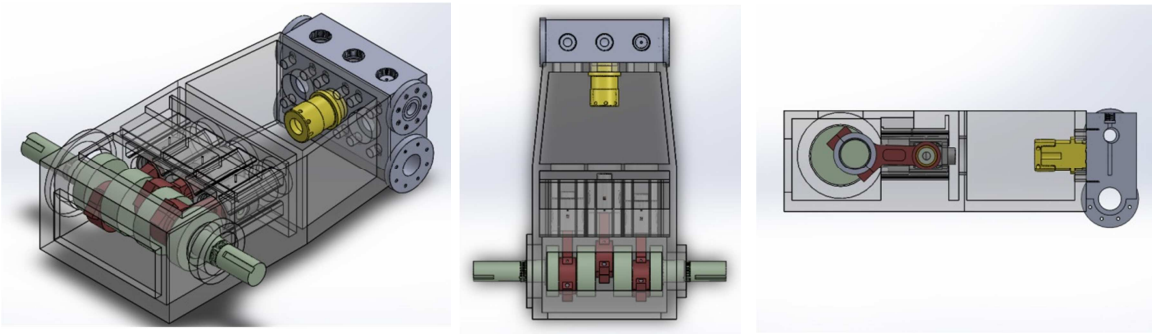


Figura 2. Bomba de desplazamiento positivo Siam Triplex

La determinación de la posición más conveniente de la E y la EB, en el interior de la bomba, se hizo considerando los resultados que se presentan en la sección que sigue. Estos resultados se refieren a la capacidad de captación de energía y comunicación, según la posición relativa entre la E y la EB. Con estos resultados, en combinación con un análisis cinemático y de factibilidad práctica, se determinó que la ubicación más conveniente de la E y la EB es la que se indica en la Figura 3. Cabe aclarar que, en la implementación final, tanto la E como la EB deberán estar embebidas en bloques de resina, adosados a la biela y a la carcasa respectivamente.

De esta manera, durante la operación de la bomba la E posee movimiento relativo respecto a la EB. Además la transmisión de energía desde la EB a la E y la comunicación entre ambas, dependen fundamentalmente del acoplamiento magnético entre ellas. Por esto, en cada revolución del cigüeñal, el tiempo disponible para la comunicación depende de la velocidad de la bomba, de la trayectoria que describe la E respecto de la EB y del acoplamiento magnético en cada punto de la trayectoria.

ISBN: 978-987-1676-63-7

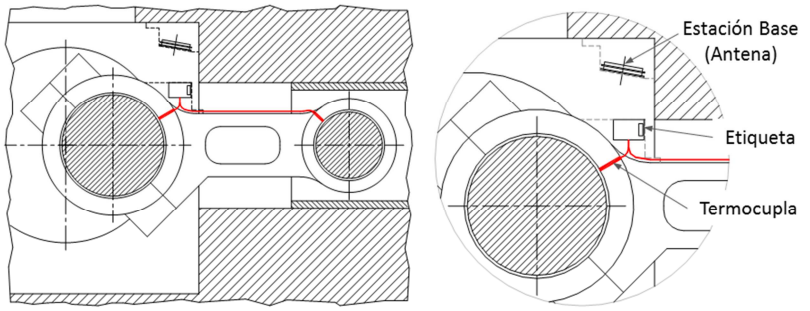


Figura 3. Esquema de la disposición de la E y la EB en el interior de la bomba

Sin embargo, puesto que usualmente las aplicaciones típicas de la PaLFI son de tipo estáticas, la información presente en la hojas de datos y demás documentos provistos por el fabricante [6,7] solo se refieren a la distancia máxima sobre el eje y, considerando $x_0 \cong z_0 \cong 0$ y $\alpha \cong \beta \cong \gamma \cong 0$, según las definiciones de las Figuras 4.a y 4.b. Por lo tanto, la documentación existente no contiene gran parte de la información necesaria para la evaluación del dispositivo, en el contexto de la aplicación en cuestión.

Es por ello que fue necesario realizar algunos ensayos experimentales, tendientes caracterizar el sistema PaLFI según los requerimientos de la aplicación. A continuación se presentan algunos de los resultados más importantes, sobre los cuales se apoya la evaluación preliminar del prototipo que se propone para medir temperatura.

4. RANGO DE COMUNICACIÓN Y TIEMPO DE CARGA

La comunicación entre la EB y la E requiere la carga previa del capacitor C_L a través del circuito tanque del TMS37157 (ver Figura 1.b). De esta manera, en cada comunicación, la EB irradia energía de carga e inmediatamente después envía el comando que contiene la información.

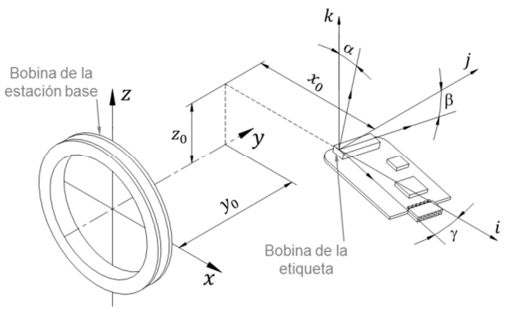


Figura 4.a: Posición y la orientación de la E, respecto de la EB.

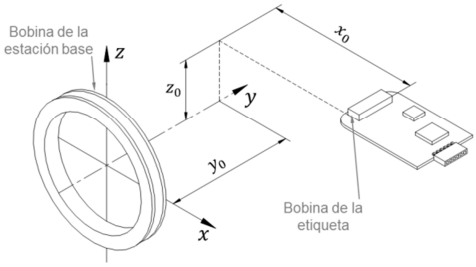


Figura 4.b: Posición de la E, respecto de la EB con la mejor orientación.

El tiempo de carga de C_L depende de la intensidad del campo y del acoplamiento magnético entre las antenas de la EB y la E, por lo que dependerá de la posición (x, y, z) y de los ángulos (α, β, γ) que definen la orientación ente ambas, como se indica en la Figura 4.a.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Independientemente de esto la EB irradia energía durante un intervalo fijo configurable, el cual debe ser suficiente para cargar C_L hasta alcanzar una tensión adecuada V_{CL}. El fabricante recomienda un tiempo de carga mínimo de 25 ms para las aplicaciones típicas, considerando que la fuente de alimentación de la EB es de 5 V y puede entregar hasta 0,5 A de pico.

Sin embargo, en este caso el tiempo de carga se configuró en 10 ms y se utilizó una fuente de alimentación de 12 V y 1 A de pico, de modo de aumentar la intensidad de la energía radiada.

La Figura 5.a presenta el gráfico de las regiones espaciales correspondientes a los rangos de tensión V_{CL} obtenidos experimentalmente para diferentes posiciones (x, y), con $z = 0$, de la E respecto de la EB. Además se consideró la mejor orientación entre las antenas como se indica en la Figura 4.b. Aunque en la aplicación particular que aquí se presenta, la orientación de la E varía según $\gamma = \gamma(t)$ con $\alpha = \beta = 0$, como se verá más adelante, la variación de γ es lo suficientemente pequeña de modo que no modifica los resultados de la Figura 5.a.

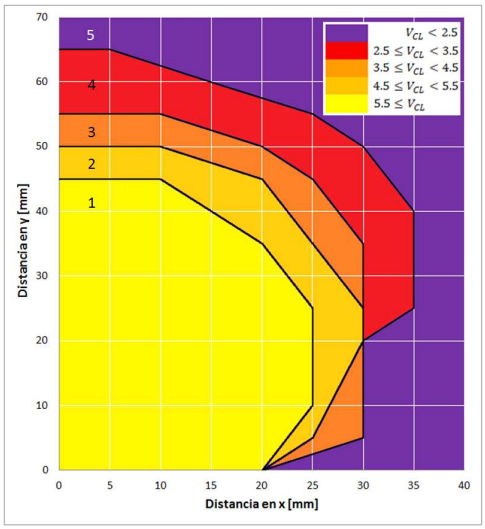


Figura 5.a: Zonas de igual rango de V_{CL}

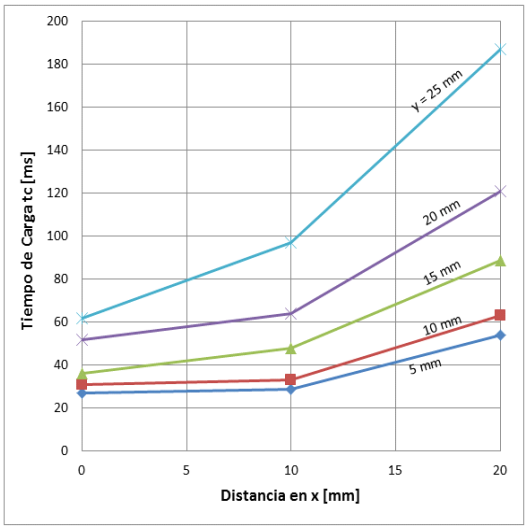


Figura 5.b: Tiempo de carga de C_{BAT}

De esta manera en cualquier posición de la región 1, la tensión de carga resulta $V_{CL} \geq 5.5V$; en cualquier posición de la región 2 el rango de la tensión de carga resulta $4.5 \leq V_{CL} \leq 5.5$. Experimentalmente se verificó que a partir de una tensión $V_{CL} \geq 2.7$ V, la comunicación resulta exitosa. Por lo tanto para cualquier posición (x, y) de la E en las regiones 1, 2, 3 y 4, en las condiciones antes mencionadas ($z = 0$, $\alpha = \beta = \gamma = 0$ y tiempo de carga de 10 ms), se verificó la correcta comunicación entre la E y la EB. No obstante en las regiones donde la tensión de carga es mayor la comunicación será más segura.

Por otro lado, como se comentó en la sección 2, los CI de la E pueden alimentarse a través de la energía radiada por la EB o a través de una batería externa. Para que los CI de la E se puedan alimentar con la energía radiada, la EB envía un comando de carga y la E se dispone a captar la energía almacenándola en el capacitor C_{BAT} (ver Figura 1.b). La intensidad de la energía captada, y por lo tanto el tiempo necesario para cargar C_{BAT}, dependen de la posición y

ISBN: 978-987-1676-63-7

la orientación de la antena de E respecto de la de EB. En la Figura 5.b se presentan los resultados obtenidos respecto del tiempo requerido para cargar C_{BAT}, hasta una tensión de 3,5 V, según la posición (x, y) de la E respecto a la EB, con $z = 0$, $\alpha = \beta = \gamma = 0$. En este caso el tiempo de carga incluye también la fase de carga del capacitor C_L (10 ms), presente al inicio del comando de carga.

5. EVALUACIÓN DEL CONCEPTO Y DISCUSIÓN

En la Figura 6.a se presenta la trayectoria de la etiqueta respecto del centro de rotación del cigüeñal, para las posiciones de la E y la EB indicadas en la Figura 3. La proyección sobre el eje y de la trayectoria de la etiqueta $R_y(t)$ para una revolución del cigüeñal se muestra en la Figura 7. En este caso se consideró una velocidad de rotación de 350 rpm, la que representa el 87% de la velocidad máxima de está bomba.

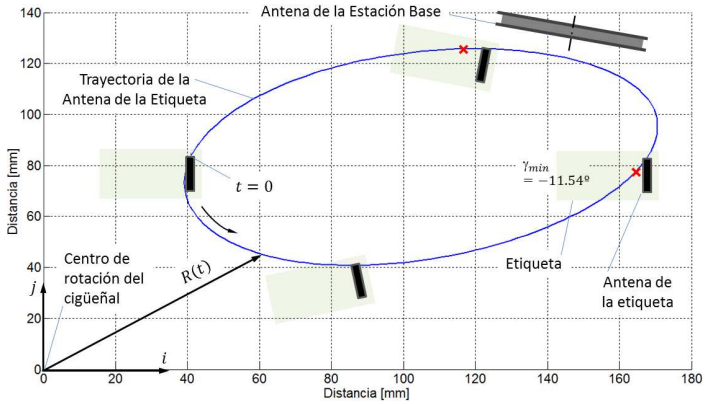


Figura 6: Trayectoria de la E respecto del centro de rotación del cigüeñal.

De acuerdo al gráfico de regiones de la Figura 4.a resulta que la zona de comunicación entre la E y la EB, durante una revolución, queda confinada a la porción de la trayectoria $R = R_x i + R_y j$ comprendida entre los puntos (165 i, 80 j) y (116 i, 125 j) indicados con una cruz. Esto resulta en una ventana de comunicación de 47 ms aproximadamente, como se indica en la Figura 7.
En la Figura 6 también se indica la desviación máxima de γ durante la ventana de comunicación, la cual es $-11.54°$. Experimentalmente se verificó que esta desviación no modifica los gráficos de rangos de V_{CL}, por lo que no modifica la ventana de comunicación.

Por otro lado, para acceder a la información de la memoria EEPROM de la E, en este caso el valor de la última medición de temperatura en uno de los cojinetes, la EB envía un comando de Lectura General. El comando consiste de la fase de carga de C_L, necesaria para alimentar al TMS37157, seguida de la dirección del espacio de memoria a leer. Dado que la fase de carga se configuró en 10 ms, como se comentó antes, el envío del comando de lectura requiere menos de 15 ms.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En respuesta al comando de lectura la etiqueta envía un paquete de 96 bits que insume un tiempo menor a los 15 ms [6].

De esta manera todo el ciclo de lectura/respuesta requiere menos de 30 ms, por lo que la ventana resultante de 47 ms es suficiente para todo el ciclo de comunicación entre la EB y la E.

Sin embargo, es claro que el envío del comando de la EB debe estar sincronizado con la posición angular del cigüeñal, por lo que en estas condiciones la implementación final requiere la medición absoluta de esta variable.

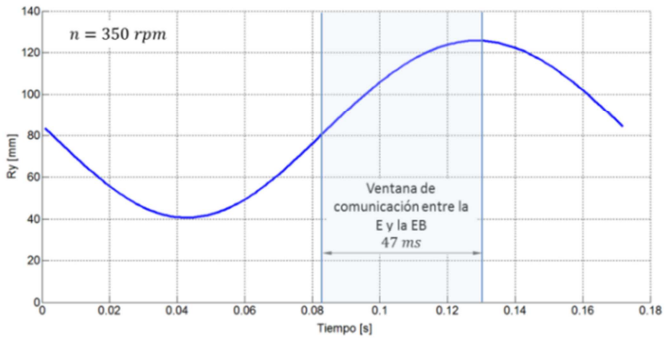


Figura 7: Componente según j de la trayectoria de la E en función del tiempo.

Por otro lado, con el propósito de implementar una E pasiva, la energía captada por la misma debe ser la suficiente para alimentar sus componentes durante el ciclo de medición. Considerando que C_{BAT} es de 10 µF, cuando este se carga hasta 3,5 V almacena $61x10^{-6}$ J. No obstante, dado que tanto el microcontrolador como el CI acondicionador (ADS1018) pueden operar hasta que la tensión cae por debajo de 2 V, entonces solo se dispone de $41x10^{-6}$ J.

El CI acondicionador operando a 3300 muestras/s requiere menos de $1x10^{-6}$ J para hacer la medición de las dos termocuplas [9]. El microcontrolador en modo activo, operando a un 1MHz (1MIPS) y con una tensión de alimentación promedio de 2,7 V, consume menos de 1 mW [10]. De esta manera puede operar durante 40 ms (ejecutar 40000 instrucciones) antes de que la tensión en C_{BAT} caiga por debajo de los 2 V. Además mientras opera el microcontrolador el CI acondicionador espera en modo bajo consumo y viceversa. Por lo tanto, si C_{BAT} se carga hasta la tensión máxima de 3,5 V, la energía almacenada será suficiente para energizar los CI de la E durante el ciclo de medición de temperatura.

Sin embargo, en la Figura 5.b se puede ver que para cargar C_{BAT} hasta una tensión de 3,5 V se requieren 48 ms aproximadamente, si la E permanece en la posición (10, 15) mm respecto de la EB. Considerando la ventana de 47 ms y comparando las posiciones relativas de la E respecto de la EB, con los gráficos de la Figura 5.b, es claro que en una revolución del cigüeñal no es posible captar la energía suficiente para cargar C_{BAT} hasta su máximo.

No obstante, si la EB envía 2 o 3 comandos de carga en ciclos consecutivos, la E puede cargar C_{BAT} hasta su tensión máxima 3,5 V, reuniendo así la energía suficiente para afrontar el ciclo de

ISBN: 978-987-1676-63-7

medición de temperatura en ambos cojinetes. La Figura 8 muestra que el protocolo de comunicación de la interfaz, permite la acumulación de carga en C_{BAT}, cuando la EB envía comandos de carga en ciclos consecutivos. En este caso se colocó la E en una posición arbitraria y se simuló la ventana de comunicación. De esta manera, se envió el comando de carga durante 3 ciclos consecutivos y se relevó la evolución de la tensión en el capacitor C_{BAT}. En la figura también se muestra la evolución de la tensión en el capacitor C_L. Como se ve, en este caso, ya en el segundo ciclo se alcanza la carga máxima en C_{BAT}.

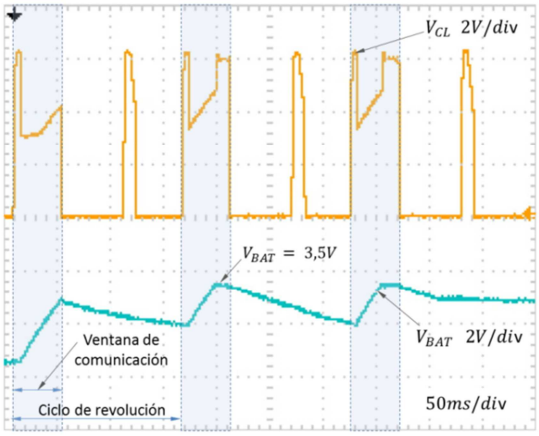


Figura 8. Evolución de la tensión en C_{BAT} luego de 3 ciclos de carga consecutivos

De esta manera se puede concluir que la interfaz evaluada permite la implementación de una solución donde la E no requiere la alimentación mediante batería externa. Esto resulta muy conveniente desde el punto de vista de la implementación final, ya que de esta manera se elimina un aspecto importante a considerar, la autonomía del sistema.

Sin embargo, la ajustada ventana de comunicación que se puede lograr entre la E y la EB, requiere una sincronización relativamente precisa entre el inicio de la comunicación y la posición angular del cigüeñal de la bomba. Aunque tecnológicamente es factible obtener una medida de la posición angular del cigüeñal, indudablemente esto le agrega complejidad y le resta robustez a la implementación final.

Para evitar la necesidad de sincronización, una alternativa a evaluar en el futuro, es la de combinar la EB con otras antenas [7, 11] y aumentar la intensidad de la energía radiada mediante el módulo RI-RFM-007B [7]. De esta manera la zona de comunicación entre la E y la EB podría aumentar lo suficiente como para cubrir toda la trayectoria de la E en el ciclo de revolución del cigüeñal.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el concepto de un prototipo para medición de temperatura en cojinetes de biela en bombas de desplazamiento positivo. A diferencia de otras soluciones, en

ISBN: 978-987-1676-63-7

este caso se propone la medición directa de la temperatura por medio de termocuplas insertadas en cada uno de los cojinetes. El concepto está edificado sobre la base de una interfaz RFID en el que la E, solidaria a la biela, se encarga de relevar la información de temperatura. La EB, solidaria a la carcasa de la bomba, recibe la información de la E y la transmite al sistema de monitoreo. En particular, en este trabajo se presentó la evaluación de la interfaz eZ430-TMS37157. Entre los resultados más salientes se destaca que, aunque la interfaz evaluada ofrece las condiciones necesarias para la implementación de una E pasiva, la comunicación entre la E y la EB requiere la sincronización con la posición angular del cigüeñal. Esta condición le confiere complejidad y por lo tanto le resta robustez a la implementación final. Una alternativa a evaluar, con el objeto de independizar la comunicación entre la E y la EB de la posición angular del cigüeñal, es combinar la EB con otras antenas y aumentar la intensidad de la energía radiada.

7. REFERENCIAS

[1] Brian Howard. *Wireless Connecting Rod Temperature Measurements for Reciprocating Compressor Monitoring*. GE-Energy, General Electric, GER4606 (06/10). 2010.

[2] Munroe, William O. *Temperature Detecting Actuator For Bearings*. Amot Controls Corporation, assignee. Patent 3.401.666. 1968.

[3] Dante I. Tapia et al. *Identificación por Radiofrecuencia: Fundamentos y Aplicaciones*. 1as Jornadas Científicas sobre RFID. Ciudad Real 21 a 23 de noviembre de 2007.

[4] K. Finkenzeller. *The RFID Handbook, Fundamentals and applications in Contactless Smart Cards Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. J. Wiley & Sons. 2010.

[5] eZ430-TMS37157 Development Tool. *User's Guide*. Texas instruments. 2010.

[6] TMS37157. *Passive Low Frequency Interfaz device with EEPROM and 134.2 kHz Transponder Interfaz*. Texas instruments. 2009.

[7] Kostas Aslanidis and Andre Frantzke. *TMS37157 Passive Low-Frequency Interfaz IC Performance With Neosid Antennas*. Texas Instruments. 2011.

[8] K. Aslanidis, J. Wyatt. *LF HDX System Parameter Calculation for TMS37157 (PaLFI)*. Texas Instruments. 2010.

[9] ADS1018. ADS1018 *Ultrasmall, Low Power, SPITM-Compatible, 12-bit Analog-to-Digital Converter Interbal Reference and Temperature Sensor*. Texas Instruments. 2015.

[10] MSP430F2274-EP. Mixed signal Microcontroller. Texas Instruments. 2011.

[11] RI-ANT-G01E, RI-ANT-G02E, RI-ANT-G04E, *Series 2000 Antennas*. Texas Instruments. 2002.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MODELADO Y SELECCIÓN DE UN ACTUADOR PIEZOELECTRICO PARA UN POSICIONADOR NANOMÉTRICO

Diego A. Vicente [1], Rogelio L. Hecker [1,2] y Gustavo M. Flores [1]

[1] Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 Nº 390, General Pico, La Pampa, Argentina
correo-e: vicente@ing.unlpam.edu.ar.
[2] CONICET

RESUMEN

En general, los sistemas de posicionamiento convencionales no permiten afrontar aplicaciones en las que se requieren posicionamientos de unos pocos micrómetros con resoluciones nanométricas. Algunas aplicaciones con tales requerimientos se pueden encontrar en el ámbito de la microfabricación, la microscopia, la biotecnología y la nanotecnología. En estos casos debe recurrirse a sistemas de posicionamiento que generan el desplazamiento a partir de la deformación elástica controlada de ciertos componentes estructurales denominados *flexure stage* o vínculos flexibles.

Una aplicación típica de un *flexure stage* es la compensación de los errores de un sistema de posicionamiento convencional, en lo que se conoce como sistema dual. En este caso el sistema convencional es de recorrido amplio con errores moderados y sobre el mismo se encuentra montado un sistema de bajo recorrido pero con alta resolución y precisión de posicionamiento, que actúa simultáneamente compensando el error del anterior.

En este trabajo se presenta la selección y el modelado electromecánico de un actuador piezoeléctrico, que debe proveer movimiento en un *flexure stage* que formará parte de un sistema dual. También se presenta la integración del modelo en el lazo de control de posición del *flexure stage* y los resultados más importantes obtenidos a partir de la simulación de dicho lazo.

En un sistema dual el lazo de control de la estructura flexible debe tener un ancho de banda suficientemente alto como para seguir y compensar las componentes de error de alta frecuencia del sistema convencional. De esta manera el lazo de control fue simulado y evaluado a partir de una señal de entrada representativa del error medido sobre el sistema convencional. Los resultados obtenidos resultaron sumamente útiles para determinar, en forma preliminar, el ancho de banda requerido, así como también las características eléctricas de la fuente de alimentación utilizada para comandar el actuador piezoeléctrico.

Palabras Claves: *sistemas de posicionamiento, actuador piezoeléctrico, flexure stage, control de posición.*

1. INTRODUCCIÓN

En general, los sistemas de posicionamiento convencionales no permiten afrontar aplicaciones en las que se requieren posicionamientos de unos pocos micrómetros con resoluciones nanométricas.

Algunas aplicaciones con tales requerimientos se pueden encontrar en el ámbito de la microfabricación, la microscopia, la biotecnología y la nanotecnología. En estos casos debe recurrirse a sistemas de posicionamiento que generan el desplazamiento a partir de la deformación elástica controlada de ciertos componentes estructurales denominados *flexure stage* o vínculos flexibles. Un *flexure stage* es una estructura mecánica elástica en la que se utiliza un actuador piezoeléctrico (AP) para generar la deformación necesaria para alcanzar el nanoposicionamiento.

Una aplicación típica de un *flexure stage* es la compensación de los errores de un sistema de posicionamiento convencional, en lo que se conoce como sistema dual [1]. En este caso el sistema convencional es de recorrido amplio con errores moderados y sobre el mismo se encuentra montado un sistema de bajo recorrido pero con alta resolución y precisión de posicionamiento, que actúa simultáneamente compensando el error del anterior. En este caso, el lazo de control de la estructura flexible debe tener un ancho de banda suficientemente alto como para seguir y compensar las componentes de error de alta frecuencia del sistema convencional.

Varios caminos se han investigado para lograr sistemas de nanoposicionamiento con alto ancho de banda, entre los que se puede destacar la optimización del diseño mecánico y la exploración e implementación de varios algoritmos de control [2].

Desde el punto de vista mecánico generalmente se trata de lograr que la estructura sea rígida y compacta y así lograr que la frecuencia del primer modo resonante sea suficientemente alta. Por ejemplo esta metodología de diseño se puede ver en [2].

Sin embargo el comportamiento dinámico del *flexure stage* y en consecuencia su primer modo resonante, no solo dependerá del sistema mecánico, sino del conjunto que surge de la combinación de los parámetros del sistema mecánico con los parámetros electromecánicos del AP. El hecho de considerar al sistema mecánico en forma aislada del AP puede conducir a un sistema mecánico excesivamente rígido que puede reducir en gran medida el desplazamiento del actuador piezoeléctrico [2].

De esta manera es claro que en las etapas preliminares de diseño, se requiere de la integración del modelo mecánico de la estructura flexible con el modelo electromecánico del AP.

En este trabajo se presenta la formulación y desarrollo del modelo de un *flexure stage*, a partir de la integración del modelo de la estructura flexible con el modelo del AP. Posteriormente el modelo es utilizado en el proceso de diseño del *flexure stage* para verificar que la respuesta dinámica del conjunto satisfaga los requerimientos. A continuación, sobre la base del modelo, se propone un

ISBN: 978-987-1676-63-7

esquema de lazo cerrado, para el control de la posición del *flexure stage.* Seguidamente se presentan los resultados de simulaciones realizadas, con propósito de obtener una evaluación preliminar del desempeño del esquema de control que se propone, el ancho de banda requerido y la demanda de potencia eléctrica. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo aquí desarrollado.

2. MODELO ELECTROMECANICO DEL FLEXURE STAGE

2.1 Ecuaciones fundamentales del Actuador Piezoeléctrico

Considerando un actuador piezoeléctrico de n discos y asumiendo que las propiedades eléctricas y mecánicas están uniformemente distribuidas a lo largo de la pila de n discos, entonces las ecuaciones constitutivas del actuador resultan [3]:

$$Q = c(1-\kappa^2)V_a + nd_{33}k_a\Delta \quad (1)$$

$$f = -nd_{33}k_aV_a + k_a\Delta \quad (2)$$

Dónde: Δ es el desplazamiento del piezoeléctrico (extensión del piezoeléctrico) $[\mathrm{m}]$, Q es la carga total almacenada en el piezoeléctrico $[\mathrm{Coulomb}]$, V_a es la tensión en bornes del piezoeléctrico $[\mathrm{V}]$ y f es la fuerza aplicada sobre el piezoeléctrico $[\mathrm{N}]$. Además, c es la capacitancia del piezoeléctrico $[\mathrm{Coulomb/V}]$, cuando no existe carga externa $(f = 0)$, k_a es la rigidez del piezoeléctrico $[\mathrm{N/m}]$, cuando la tensión en bornes del piezoeléctrico es nula $(V_a = 0)$ y nd_{33} es la relación lineal entre la tensión y el desplazamiento $[\mu\mathrm{m/V}]$. Finalmente κ es el factor de acoplamiento electromecánico; es una medida de la eficiencia de la conversión de la energía mecánica en eléctrica y viceversa y se puede calcular como sigue:

$$\kappa^2 = \frac{n^2{d_{33}}^2k_a}{c}$$

Despejando el desplazamiento del piezoeléctrico en la Ecuación (2) resulta:

$$\Delta = nd_{33}V_a + \frac{f}{k_a} \quad (3)$$

En esta forma resulta claro que el desplazamiento del piezoeléctrico tiene dos componentes, una que depende de la tensión en bornes del piezoeléctrico y otra que depende de su elasticidad y de la fuerza aplicada sobre el mismo.

2.2 Modelo mecánico del flexure stage

En la Figura 1 se muestra un esquema del modelo dinámico considerado. Como se puede ver, la estructura mecánica del *flexure stage* se consideró como un sistema masa resorte, en el que la

ISBN: 978-987-1676-63-7

constante k [N/m] es la elasticidad de los elementos flexibles y m [kg] es la masa equivalente de los elementos flexibles más la masa transportada, en el caso que la hubiere. El coeficiente b [Ns/m] representa la fricción viscosa y el amortiguamiento estructural presentes en el sistema.

Acoplado a la masa de la estructura se encuentra el AP y, como se puede ver, todo el conjunto está montado sobre un sistema no inercial que representa a la mesa del eje posicionamiento de recorrido amplio.

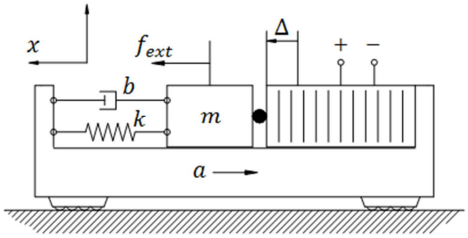


Figura 1: Esquema del modelo dinámico del flexure stage

Considerando que el actuador piezoeléctrico ejerce una fuerza f_p sobre la masa del sistema y que además actúa una fuerza externa f_{ext}, entonces el comportamiento dinámico del elemento móvil del *flexure stage* se puede describir como sigue:

$$f_p + f_{ext} - b\dot{\Delta} - k\Delta = m\ddot{\Delta} \tag{4}$$

Cabe destacar que la f_{ext} es la resultante de las componentes provenientes de toda interacción física del *flexure stage* con el medio y de los efectos inerciales causados por la aceleración a del eje de recorrido amplio.

Puesto que la deformación del *flexure stage* está dada por la acción del actuador piezoeléctrico, es claro entonces que una expansión o compresión Δ en el *flexure stage* estará dada por una compresión o expansión de igual magnitud del actuador piezoeléctrico. Asimismo la magnitud de la fuerza f_p aplicada sobre el flexure stage será la misma que soporta el actuador piezoeléctrico. De esta manera combinando las Ecuaciones (2) y (4), resulta:

$$V_a = \frac{1}{nd_{33}k_a}\left(m\ddot{\Delta} + b\dot{\Delta} + (k_a + k)\Delta\right) - \frac{f_{ext}}{nd_{33}k_a} \tag{5}$$

Asumiendo que el sistema está en reposo en el instante inicial, esto es: $\ddot{\Delta} = \dot{\Delta} = 0$ en $t = 0$, entonces aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (5) y despejando el desplazamiento se tiene:

$$\Delta(s) = \frac{nd_{33}k_aV_a(s) + F_{ext}(s)}{ms^2 + bs + k_a + k} \tag{6}$$

Donde $\Delta(s)$, $V_a(s)$ y $F_{ext}(s)$ son las transformadas de Laplace de las funciones $\Delta(t)$, $V_a(t)$ y $f_{ext}(t)$ respectivamente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por otro lado, como se mencionó, la expansión Δ del piezoeléctrico posee dos componentes, una que depende de la tensión en bornes del mismo y otra que depende de la fuerza a la que está sometido y de la rigidez del mismo. Combinando las Ecuaciones (3) y (4) y considerando únicamente la situación de equilibrio estático cuando la fuerza externa es nula, resulta la siguiente expresión para la expansión del piezoeléctrico:

$$\Delta = \frac{nd_{33}V_a}{1+\frac{k}{k_a}} = \frac{\Delta_{nom}}{1+\frac{k}{k_a}} \tag{7}$$

La Ecuación (7) indica que el desplazamiento del AP se reduce, respecto del nominal, en un factor que depende del cociente k/k_a. A medida que aumenta la rigidez k del *flexure stage,* el desplazamiento útil se reduce. No obstante si se elige un valor muy pequeño para la rigidez del *flexure stage*, el primer modo resonante puede aparecer a baja frecuencia limitando el ancho de banda del lazo de control de posición. Esta relación de compromiso debe ser considerada a la hora de diseñar la estructura flexible, así como también a la hora de seleccionar el actuador piezoeléctrico.

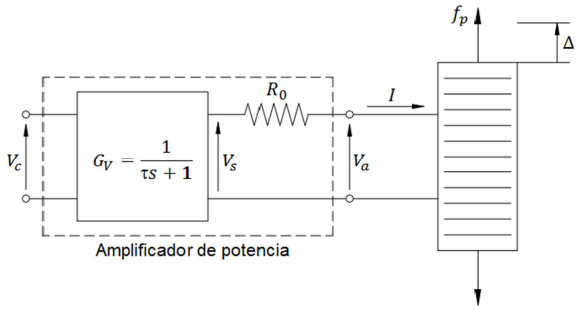


Figura 2: Esquema eléctrico (drive de tensión-piezoeléctrico)

2.3 Modelo electromecánico del flexure stage

En la Figura 2 se muestra esquemáticamente el modelo del amplificador de potencia que se utiliza para energizar al actuador piezoeléctrico. El modelo del amplificador básicamente se compone de un bloque cuya función transferencia (FT) es $G_V(s) = 1/\tau s + 1$ y una resistencia de salida R_0.

La tensión de control V_c, presente a la entrada del amplificador, se transforma en la tensión de salida V_s luego de atravesar el bloque $G_V(s)$, por lo que se cumple la siguiente relación:

$$V_s = IR_0 + V_a \tag{8}$$

Donde I [A] es la corriente de carga del AP. Por otro lado, derivando la Ecuación (1) respecto del tiempo y aplicando la transformada de Laplace, se tiene una expresión para la corriente de carga:

$$I(s) = c(1-\kappa^2)sV_a(s) + nd_{33}k_a s\Delta(s) \tag{9}$$

Considerando las Ecuaciones (6), (8) y (9) y la FT $G_V = V_s/V_c$ se puede construir el diagrama de bloques del sistema de todo el conjunto electromecánico, el cual se muestra en Figura 3.a.

Pasivando la fuerza externa ($F_{ext} = 0$) y combinando las Ecuaciones (6), (8) y (9) se puede obtener la función de transferencia de la tensión V_s al desplazamiento Δ del AP:

$$G_\Delta(s) = \frac{\Delta(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{c(1-\kappa^2)\left\{R_0 m s^3 + \left[R_0 b + \frac{m}{c(1-\kappa^2)}\right]s^2 + \left[R_0\left(k_a + k + \frac{(nd_{33}k_a)^2}{c(1-\kappa^2)}\right) + \frac{b}{c(1-\kappa^2)}\right]s + \frac{k_a + k}{c(1-\kappa^2)}\right\}} \quad (10)$$

Finalmente la función de transferencia del sistema electromecánico completo, desde la tensión de control V_c hasta el desplazamiento Δ, resulta:

$$G_{em}(s) = G_V(s)G_\Delta(s) \quad (11)$$

La Ecuación (10) muestra claramente que la dinámica del *flexure stage* depende tanto de los parámetros del sistema mecánico, como de los parámetros del AP. Por esto el diseño de la estructura mecánica no puede hacerse en forma aislada del AP.

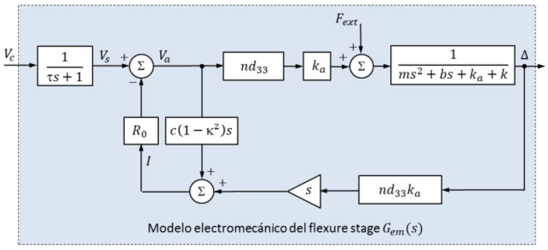


Figura 3.a: Diagrama de bloques del modelo lineal del sistema electromecánico

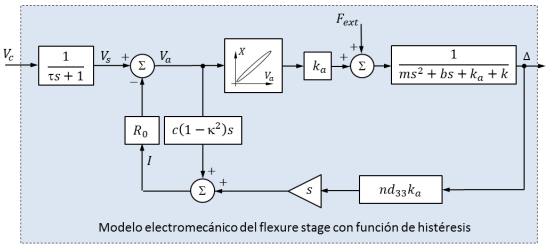


Figura 3.b: Diagrama de bloques del sistema electromecánico considerando histéresis en el comportamiento del AP

Aunque el presente trabajo se enfoca en el modelo electromecánico lineal del *flexure stage*, los actuadores piezoeléctricos presentan un comportamiento con histéresis [4-6]. Generalmente el modelo de un AP se compone fundamentalmente de dos submodelos independientes en cascada: uno que contiene el comportamiento no lineal del AP (submodelo de histéresis) y otro que contiene el comportamiento lineal proveniente fundamentalmente de la dinámica vibratoria del AP (submodelo de vibración) [4,6]. Experimentalmente se ha mostrado que la histéresis que existe entre la carga eléctrica Q y el desplazamiento Δ es lo suficientemente estrecha tal que puede considerase como una relación lineal [2,5].

De acuerdo a esto una manera práctica de incluir el efecto de histéresis se presenta en la Figura 3.b. En este caso se considera la histéresis entre la tensión y el desplazamiento del AP, mientras que la relación entre la carga eléctrica y del desplazamiento se asume lineal.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. DISEÑO MECÁNICO Y SELECCIÓN DEL ACTUADOR PIEZOELECTRICO

En la Figura 4 se muestra la estructura mecánica del *flexure stage* desarrollado. La estructura consiste de una base móvil que se acopla mediante cuatro brazos flexibles. En la figura también se puede ver el canal longitudinal donde se alojará el AP.

El material seleccionado para el *flexure stage* es una aleación de aluminio con un módulo de elasticidad de 7×10^{-6} $\mathrm{N/m^2}$, coeficiente de Poisson de 0,34 y una densidad de 2700 $\mathrm{kg/m^3}$. En general, para este tipo de aplicaciones se busca una aleación con alto módulo de elasticidad respecto de su densidad, para mejorar la dinámica de posicionamiento.

En cuanto a las consideraciones de diseño, en este caso se priorizó obtener una estructura con una rigidez que reduzca lo menos posible el recorrido nominal del piezoeléctrico seleccionado y que además garantice que el primer modo de vibración del conjunto sea entre 4 y 5 veces el ancho de banda del lazo de control. Como se discutió antes, estos dos requerimientos se contraponen según lo indica la Ecuación (7).

De acuerdo a las componentes de mayor frecuencia presentes en el error de seguimiento del eje de recorrido amplio, se determinó que el ancho de banda del lazo de control de posición deberá estar por encima de los 500 Hz. Además, considerando la amplitud máxima del error, resulta que el recorrido útil del *flexure stage* debería ser al menos de 24 µm.

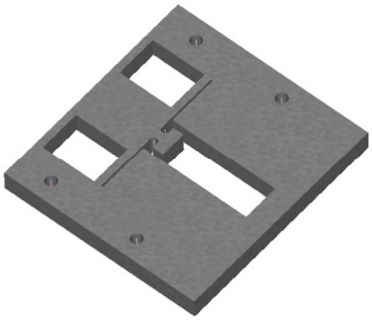


Figura 4. Modelo en 3D del flexure Stage.

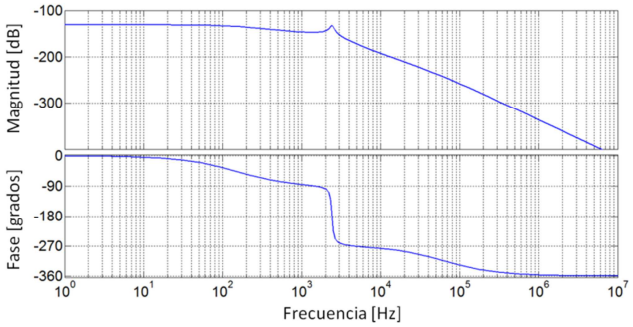


Figura 5: Respuesta en frecuencia del sistema electromecánico $G_{em}(\omega)$.

De esta manera se preseleccionaron varios AP candidatos que fueron cotejados con el diseño mecánico, en un proceso iterativo a partir del cual se arribó a la solución final.

En este caso se obtuvo una estructura con una rigidez de 15×10^{-6} N/m y una masa equivalente de 32 gramos. Por otro lado en la Tabla 1 se presentan los principales parámetros del AP seleccionado para formar parte del conjunto.

En estas condiciones el conjunto electromecánico alcanza un desplazamiento útil de 28 µm y la frecuencia del primer modo de vibración se encuentra por encima de los 2400 Hz, aun considerando una masa de carga de 0,5 kg. Este último valor es suficientemente por lo que no

perjudicará el ancho de banda del lazo de control, establecido en principio en al menos 500 Hz como se mencionó. En la Figura 5 se muestra la respuesta en frecuencia del conjunto $G_{em}(\omega)$.

Tabla1. Principales parámetros del AP seleccionado

Capacitancia del actuador	$c = 13 \times 10^{-6}\ \mu F$
Desplazamiento/Tensión	$nd_{33} = 32/100\ \mu m/V$
Rigidez del actuador	$k_a = 100 \times 10^{-6}\ N/m$
Fuerza máxima del actuador	$f_{pmax} = 3800\ N$
Frecuencia de resonancia	$f_{res} = 40\ kHz$

4. CONTROL DEL FLEXURE STAGE

En la Figura 6.a se presenta el lugar de las raíces de la dinámica dominante del sistema correspondiente a la función de transferencia del sistema electromecánico $G_{em}(s) = \Delta(s)/V_c(s)$ y en la Tabla 2 se presenta el detalle de la ubicación de los polos dominantes.

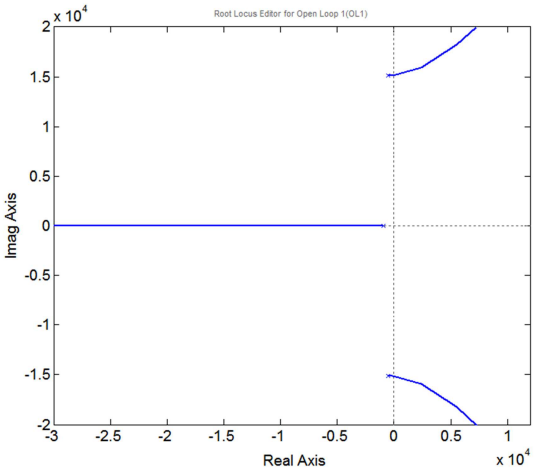


Figura 6.a: Lugar de las raíces de la dinámica dominante del sistema $G_{em}(s) = \Delta(s)/V_c(s)$

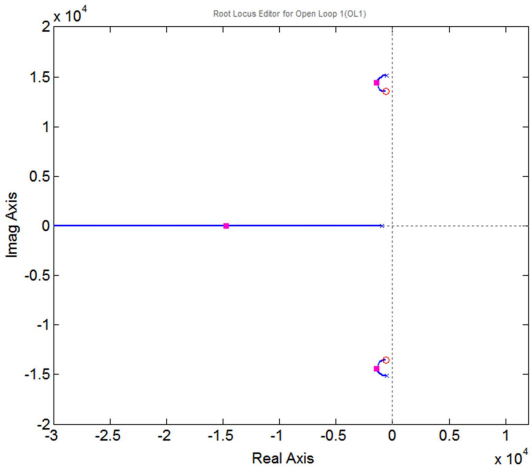


Figura 6.b: Lugar de las raíces del lazo de control, según el controlador que se propuso.

De esta manera con el propósito de impedir que los polos complejos conjugados crucen al semiplano positivo y además para amortiguar el efecto dinámico asociado con estos, se consideró un controlador compuesto por un par de ceros complejos conjugados, cuya FT se presenta a continuación:

$$G_c(s) = K((5.476 \times 10^{-9})s^2 + (6.20 \times 10^{-6})s + 1)$$

En la Figura 6.b se presenta el lugar de las raíces del sistema incluyendo el controlador considerado. Aunque en la figura se ve que el sistema se mantendrá estable independientemente de la ganancia K del controlador, en este caso se optó por seleccionar un valor moderado. Lo que

se busca es tener un ancho de banda aceptable para la aplicación en cuestión, pero que no excite la dinámica estructural de alta frecuencia, ni haga que el sistema se vuelva inestable a causa del comportamiento no lineal del AP.

Tabla 2. Ubicación de los polos y ceros de la respuesta dominante del sistema electromecánico

Sistema electromecánico $G_{em}(s)$	Sistema a lazo cerrado $G_{cl}(s)$	
Polos	Polos	Ceros
$-513 \pm 1{,}52 \times 10^4 i$	$-1{,}42 \times 10^3 \pm 1{,}44 \times 10^4 i$	$-572 \pm 1{,}35 \times 10^4 i$
-916	$-1{,}47 \times 10^4$	

Siguiendo el criterio utilizado en [2], el valor de K se eligió de modo de proveer el máximo amortiguamiento de la resonancia. En la Tabla 2 se indica la ubicación de los polos dominantes de la FT de lazo cerrado $G_{cl}(s)$; en estas condiciones el ancho de banda alcanzado es de 1440 Hz aproximadamente.

Por otro lado con el objeto de compensar el retardo de fase propio del lazo control de posición, se consideró un filtro de la dinámica inversa del mismo. En este caso la FT nominal $G_{clN}(s)$ que se invirtió coincide con $G_{cl}(s)$ hasta los 1000 Hz aproximadamente. En la Figura 7 se muestra el diagrama de bloques del esquema de control que se propone.

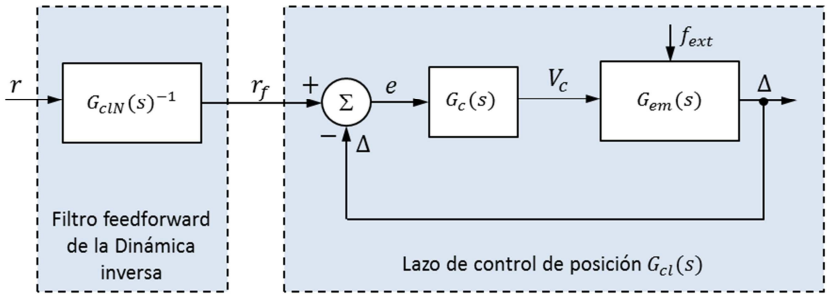


Figura 7: Diagrama de bloques del esquema de control implementado.

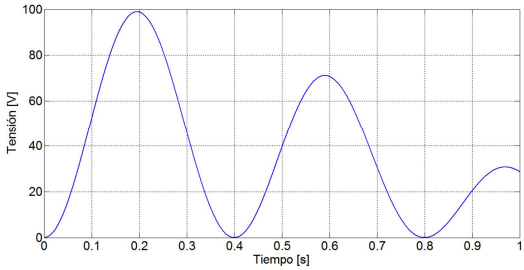
5. RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados más importantes de la simulación realizada con el propósito de evaluar, en forma preliminar, el desempeño del *flexure stage* en combinación con el esquema de control que se propuso. En este caso la simulación se realizó sobre la base del modelo presentado en la sección 2, en conjunto con el controlador propuesto en la sección 4. Los parámetros del modelo se sintonizaron de acuerdo a los valores indicados en la sección 3.

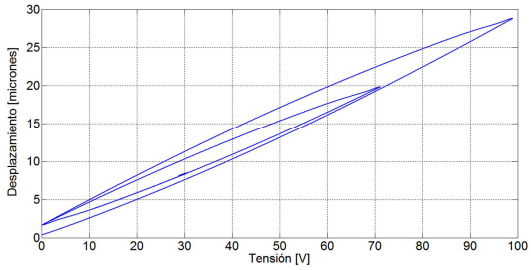
Además, con el propósito de obtener una primera impresión acerca del comportamiento del lazo de control frente al comportamiento no lineal del actuador piezoeléctrico, el modelo electromecánico

se combinó con el modelo de histéresis presentado en [6], según el esquema de la Figura 3.b. En la Figura 8 se presenta el comportamiento de la función de histéresis implementada.

Con el objeto de evaluar el desempeño del controlador en el seguimiento de referencias se consideró la siguiente señal referencia: $r = Asen(\omega t)$, con $A = 12$ micrones y $\omega = 628$ rad/s.



Tensión aplicada en bornes del piezoeléctrico



Desplazamiento vs tensión

Figura 8: Función de histéresis utilizada

Los valores de A y ω se eligieron de esta manera luego de evaluar las características de la señal error del sistema de posicionamiento de recorrido amplio, el cual presenta amplitudes máximas del orden de 10 a 12 micrones, mientras que las componentes armónicas de amplitud considerable se mantienen por debajo de los 100 Hz.

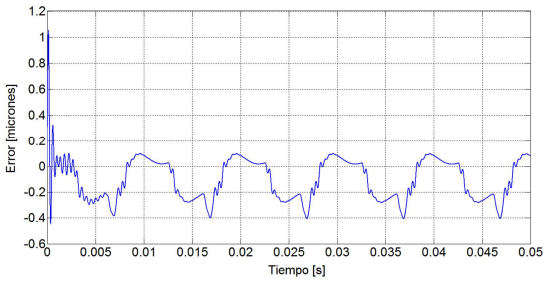


Figura 9.a: Error se seguimiento.

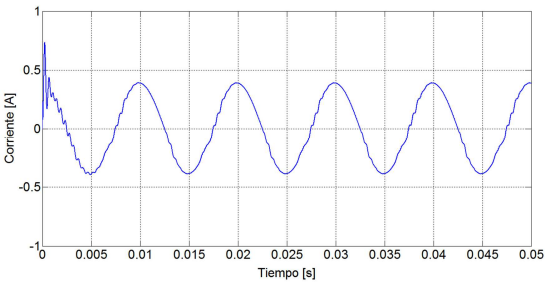


Figura 9.b: corriente de carga y descarga del piezoeléctrico.

En la Figura 9.a se presenta el error de seguimiento que se registró en el sistema a lazo cerrado. La figura muestra que el error posee un máximo de 1 micrón aproximadamente, durante el transitorio, mientras que una vez alcanzado el estado estacionario se mantiene entre $-0{,}4$ y $+0{,}1$ micrones.

Por otro lado la Figura 9.b muestra la evolución de la corriente de carga y descarga del piezoeléctrico, la cual alcanza un máximo de 0,75 A aproximadamente durante el transitorio y luego se mantiene en $\pm 0{,}4$ A. No obstante el valor medio cuadrático de la misma es de 0,28 A. En este sentido, los limites indicados para del amplificador son 2 A máximo (durante menos de 5 ms) y una corriente media de 0.7 A, por lo que los valores obtenidos se mantienen muy por debajo de los límites indicados por el fabricante del amplificador [7].

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el modelo de un *flexure stage* como resultado de la integración del modelo de la estructura flexible con el modelo del AP. Aunque el modelo se desarrolló sobre la base de un comportamiento lineal del AP, las funciones histéresis, que describen su comportamiento no lineal, pueden ser insertadas en el modelo. En el trabajo se propuso un esquema para incluir la función de histéresis que relaciona la tensión y el desplazamiento del AP, mientras que la relación entre la carga eléctrica y el desplazamiento se considera lineal.

El modelo demuestra que la dinámica *flexure stage* depende tanto de los parámetros mecánicos de la estructura flexible, como de los parámetros electromecánicos del AP. Por ello el modelo se utilizó en el proceso de diseño mecánico y selección del AP, de modo de obtener un *flexure stage* que satisfaga los requerimientos en cuanto a la respuesta dinámica.

Por último, modelo presentado también se utilizó para el diseño y simulación de un esquema de control de posición a lazo cerrado. Los resultados de la simulación indican que, con el esquema presentado, la amplitud del error de seguimiento es del orden del 3,3% de la señal referencia aproximadamente. Además en estas condiciones la corriente de carga y descarga del AP es considerablemente menor al límite indicado por el fabricante del amplificador de potencia.

7. REFERENCIAS

[1] A.T. Elfizy, G.M. Bone, M.A. Elbestawi. *Design and control of a dual-stage feed drive*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, 153–165, 2005.

[2] Yuen Kuan Yong, Sumeet S. Aphale, and S. O. Reza Moheimani. *Design, Identification, and Control of a Flexure-Based XY Stage for Fast Nanoscale Positioning*, IEEE Transactions On Nanotechnology, Vol. 8, No. 1, 2009.

[3] A. Preumont *Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*. Departamento de ingeniería Civil, Universidad de Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá, 2006.

[4] Jingyang Peng y X. Chen. *A survey of Modeling and Control of Piezoelectric Actuators*. Modern mechanical Engineering, Vol 3, 1-20, 2013.

[5] Michael Goldfarb y Nikola Celanovic. *Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation*. IEEE Control Systems Magazine, Vol 17, No. 3, 69-79, 1997.

[6] Jonq J. Tzen, S. L. Jeng y W. H. Chieng. *Modeloing of piezoelectric actuator for compensation and controller design*. Precision Engenieering, Vol 27, 70-86, 2003.

[7] PZ201E User manual. *E-617 High Power Piezo Amplier*. Physik Instrumente, 2010. www.physikinstrumente.com

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ROBOT ESCALADOR: TRES ESTRATEGIAS DE CONTROL

Alfredo E. Puglesi [1], **Martín A. Abrahamsohn** [1] **y María Susana Bernasconi** [1]

[1] Laboratorio de Control – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo
Centro Universitario (M5502JMA), Ciudad de Mendoza, Argentina
apuglesi@uncu.edu.ar, mabrahamsohn@gmail.com, msbernasc@uncu.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo y resultados de un proyecto que aborda tres diferentes estrategias de control sobre un robot, la primera está basado en PLC, la segunda en el paquete Matlab® / Simulink® /Stateflow® comandando una placa Arduino, y tercera, solo con el programa embebido sobre la mencionada placa. Se exponen aspectos constructivos, de programación y características técnicas del hardware, evaluando sus ventajas y desventajas de cada uno, a través de sus respectivos desempeños.

El robot utilizado es del tipo escalador neumático, diseñado, desarrollado y construido también en el Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería de la UNCuyo con fines didácticos y con la posibilidad, dada su naturaleza intrínsecamente antiexplosivo, de brindar asistencia a operarios que realizan trabajos en altura como torres separadoras de hidrocarburos en refinerías o similares, ambientes que eventualmente pueden estar en presencia de gases combustibles.

De esta forma se evita transportar manualmente objetos pesados al ascender y descender, lo cual puede poner en riesgo la vida y salud del operario,

Respecto del funcionamiento del robot, las tres estrategias de control pueden representarse por máquinas de estados que comandan el desplazamiento ascendente y descendente, así como la selección de los modos de operación, tanto manual como en automático.

Como metodología, este proyecto se dividió por partes, comenzando por una descripción de los elementos principales constituyentes del robot, destacándose: cilindros neumáticos, válvulas direccionales con mando por solenoides y misceláneos mecánicos incluyendo articulaciones. Luego se desarrollan las tres diferentes estrategias de control.

Finalmente y a partir de la experiencia obtenida, se concluye remarcando las prestaciones que cada estrategia aporta, siendo éste sólo un punto de partida, factible de mejorar.

Palabras Claves: *robótica, mecatrónica, PLC, Arduino, Matlab*

1. INTRODUCCIÓN

Al decir de reconocidos desarrolladores en mecatrónica, el estudio de robots escaladores es un campo fascinante, y por lo tanto abarca muchas aristas para investigar y desarrollar por parte de los especialistas, cada uno buscando y preponderando ciertas características particulares.

Este Proyecto no es la excepción, éste se concibe con fines educativos y posible prestación de ayuda a operario en altura en las áreas de la refinación y la petroquímica en presencia de humo o gases nocivos / explosivos eventualmente presentes en la en la industria del petróleo, para ello cuenta con una “mochila” a sus “espaldas”, portando herramientas u otros elementos que sean necesarios hacerle llegar al operario en cuestión. Se enfatiza su carácter de proyecto integrador, tanto mecatrónico desde el punto de vista del desarrollo como del petrolero como usuario, sin por ello ser excluyente de aplicaciones similares en otros ambientes.

Con ese propósito se investigó, diseñó y construyó un robot escalador neumático con tres grados de libertad, el movimiento escalar se realizará sobre una cuerda colgante, que se sujetó en el punto superior, el otro extremo se puede mover libremente o anclar, indistintamente. La energía a utilizar procede de una fuente de aire comprimido. Se priorizó lograr desplazamientos ascendentes y descendentes rápidos, posibilitados por un cilindro de doble efecto como cuerpo principal y dos también de doble efecto que alternativamente se sujetan a la cuerda, todos ellos dotados de fines de carrera; se destaca que el robot también puede desplazarse horizontalmente.

Los dispositivos de mando son válvulas direccionales comandadas por electroválvulas que a su vez responderán a las tres estrategias planteadas en el Resumen.

A continuación se explicitan los aspectos mecánicos, los accionamientos neumáticos y las tres estrategias de control ensayadas, motivo de ésta presentación.

2. DESARROLLO MECÁNICO Y NEUMÁTICO

La primera tarea, fue el diseño mecánico, y a los efectos de construir una estructura que permita al robot desempeñarse de manera óptima con los accionamientos a dotarlo, consistentes en tres cilindros neumáticos, el primero formando parte del cuerpo y los otros dos los “agarres” a la cuerda en la parte inferior y superior del mismo, a saber:

- Un cilindro de doble acción de 20mm de diámetro por 200mm de carrera con su correspondiente válvulas direccional de 5 vías, 3 posiciones, centro obturado, biestable, mando por solenoide de 24 Vcc y dos fines de carrera, en ambos extremos, tipo reed-relay.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Dos cilindros de doble efecto con guias antigiro de 20mm de diámetro por 30mm de carrera, cada uno con su válvula direccional asociada de 5 vías 2 posiciones, monoestable por presión, mando por solenoide 24Vcc y fines de carrera tipo reed relay indicando vástagos extraídos.

2.1. Consideraciones cinemáticas

El movimiento del robot para escalar por la soga, se asemeja al movimiento de un gusano. Esto lo logra mediante movimientos repetitivos y secuenciados de sujeción, extensión y retracción.

Para un desplazamiento ascendente, por ejemplo, partiendo de una posición segura con los cilindros sujetando la cuerda y el robot retraído, la secuencia de movimientos es:

- El sujetador superior se suelta
- Se extiende el cilindro de avance
- Se activa el sujetador superior
- Se desactiva el sujetador inferior
- Se retrae el cilindro de avance
- Se sujeta el cilindro inferior
- Se repite la secuencia

Para el caso del desplazamiento descendente, la secuencia es la misma solo que invierte el trabajo de los cilindros inferior y superior. Por cada secuencia el robot avanza 200mm, esto queda definido por la carrera del cilindro que se emplea para el desplazamiento.

2.2 Consideraciones dinámicas

Con el filtro regulador, la presión de entrada al robot puede ser regulada en un rango de que va desde los 4 a los 8 bar, estableciéndose en 7 bar para alimentar el accionar de los cilindros.

La fuerza que puede producir un accionamiento neumático está basada en el área del cilindro, para nuestro caso todos los utilizados poseen un área de trabajo con un diámetro de 20mm. Para calcular la fuerza se puede recurrir a la sencilla Ecuación (1).

$$F = P \cdot A \cdot R = P \cdot \pi \cdot D^2 \cdot R/ 4 = 19{,}8 \text{ Kgf} \quad (1)$$

Donde:

F: es la fuerza desarrollada por el cilindro en Kgf

P: es la presión de entrada al cilindro en Kgf/cm^2

ISBN: 978-987-1676-63-7

D: es el diámetro interno del cilindro neumático en cm

R: rendimiento, estimado en un 90 % al ser cilindros nuevos.

De ser necesario portar mayores pesos, se recurre a cilindros de mayor diámetro. Esta fuerza es la que utilizará el cilindro de avance para trepar a través de la soga, también se tuvo que calcular las fuerzas de agarre de los cilindros sujetadores, punto que se desarrolla a continuación.

2.2.1 Consideraciones relativas al elemento de guía: cuerda

El material seleccionado como elemento de guía para el robot fue aquel determinado por el coeficiente de rozamiento adecuado, y también por la capacidad de carga del robot. Se contempló además que se debía contar con un material que posibilitara la mayor cantidad de ascensos y descensos y que brindara una elevada resistencia al desgaste.

A continuación se mencionan algunas de las características importantes que se deben tener en cuenta en los catálogos de fabricantes, para realizar una elección correcta en función del ambiente y de los pesos a transportar:

- Vida útil: corresponde al tiempo de almacenamiento (antes de la primera utilización) más el tiempo de utilización. La vida útil depende de la forma y frecuencia de utilización. Los rayos ultravioletas, la humedad, los rozamientos y los esfuerzos mecánicos disminuyen poco a poco las propiedades de la cuerda.
- Elongación: es la capacidad de la cuerda para cambiar su longitud y de esta forma absorber cualquier esfuerzo brusco. En cuerdas verticales para el transporte de materiales, este valor debe ser menor al 2%.
- Diámetro: medida del corte transversal de la cuerda, a mayor diámetro, la cuerda posee mayor resistencia. Se utiliza la nomenclatura de cordinos para cuerdas de menos de 8 mm de diámetro.
- Resistencia estática: es el peso estático máximo que puede resistir una cuerda sin romperse.
- Resistencia a la abrasión: es la propiedad de la cuerda para soportar la influencia del medio en su superficie.

2.2.2 Materiales y coeficientes de rozamiento

Se escogió soga de algodón retorcida de 8 mm, de tablas del fabricante, se supo que la resistencia a la rotura es de 200 Kgf y una vida útil en uso intensivo de 3 meses. A su vez la soga, en cada agarre, queda prensada entre dos placas metálicas recubiertas con caucho ranurado, pudiéndose comprobar que para esa superficie de contacto resultan apropiados un coeficiente de rozamiento

estático de 0,66 y coeficiente dinámico de 0,38. Al momento de la operación no se produjeron deslizamientos no deseados.

2.3 Diseño y mecanizado

Teniendo en cuenta las dimensiones de los cilindros, y la tarea a realizar por el dispositivo, se hicieron una serie de bocetos que se materializaron en la estructura que se va a describir en esta subsección. Para comenzar se decidió la disposición que deberían de tener los accionamientos para la funcionalidad deseada, (Figura 1):



Figura 1: Disposición de los cilindros

Se utilizó el software de diseño CATIA, considerando la distribución y tareas de cada uno de los accionamientos, se acordó el diseño de tres sub-estructuras: estructura principal, estructura trasera y estructura delantera, la primera de 5mm de espesor, las dos restantes de 10mm, todas en aluminio.

2.3.1 Estructura principal

Contiene al cilindro principal (avance - retroceso) y a las válvulas direccionales, también aloja la bornera de conexión eléctrica y los conectores neumáticos, a la vez que es solidario a la estructura inferior que contiene al primer cilindro de agarre. En la misma se realizaron todas las perforaciones para la fijación de los elementos.

2.3.2 Estructuras trasera y delantera

El cilindro de agarre trasero está contenido en una especie de caja, la cual sirve también para guiar la cuerda, y vincularse a la estructura principal de manera solidaria. Esta estructura se puede dividir en las siguientes piezas:

- Placa de presión: placa de aluminio revestida en caucho ranurado, contra la que el cilindro presiona la cuerda.
- Guía de cuerda parte inferior: placa exterior que posee una perforación levemente fresada por donde corre la soga.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Guía de cuerda parte superior: con vinculación a la estructura principal, similar a la placa guía inferior con la diferencia que cuenta con perforaciones donde van los soportes que permiten fijarla solidariamente al cuerpo.

En cuanto a la estructura delantera, es similar a la trasera con la diferencia que se fija al extremo del vástago del cilindro de avance. A continuación se muestra a la izquierda el diseño y a la derecha el prototipo ya ensamblado (Figura 2).

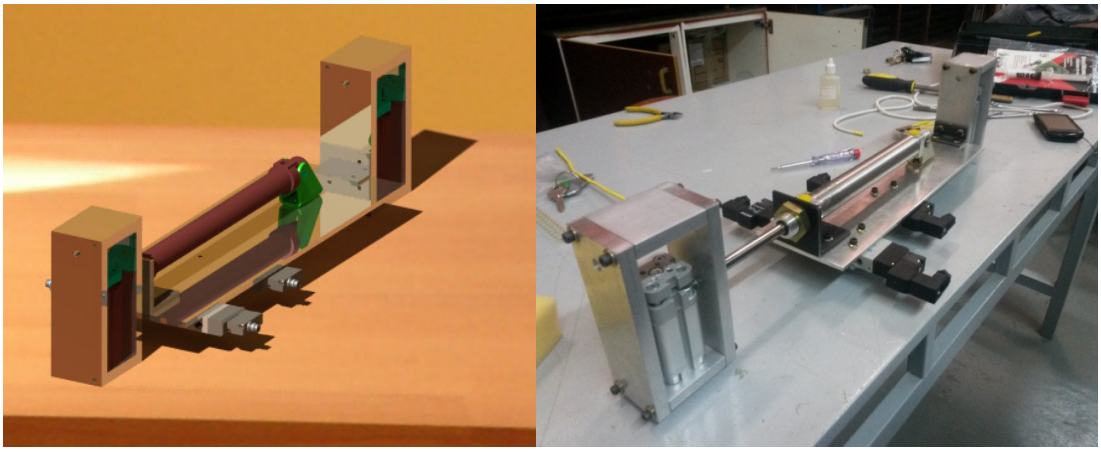


Figura 2: Diseño y prototipo ensamblado

3. DESARROLLO DE LAS ESTRAGIAS DE CONTROL

A continuación se presenta el esquema general de funcionamiento del proyecto (Figura 3). En las siguientes secciones los bloques que irán cambiando son los de "Interfaz con el usuario", y el bloque llamado "Interpretar" que es el procesador con el código asociado para comandar el robot.

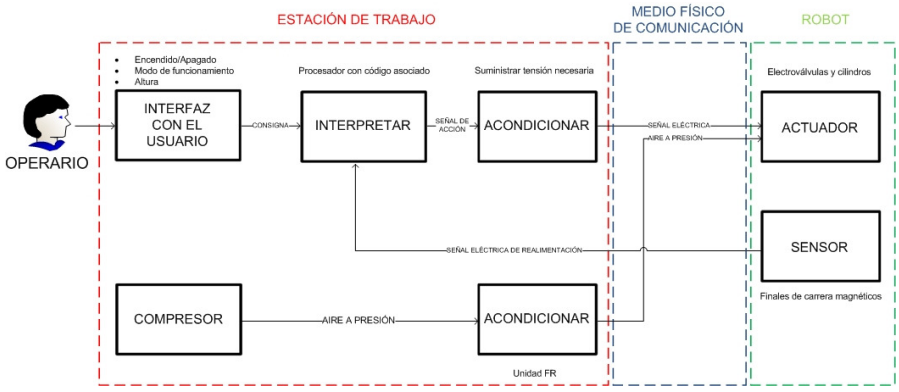


Figura 3: Esquema general de funcionamiento

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1 Primera estrategia: PLC ó autómata

Es un dispositivo desarrollado para controlar procesos automáticos secuenciales en la industria, y en tiempo real. Se utilizó un autómata Twido de 12 entradas y 8 salidas discretas programado en GRAFCET (Gráfica de Control por Etapas y Transiciones) mediante el software Twido Suite [1]. A su vez, la interacción con el operario se realiza mediante el SCADA P-CIM desarrollado por AFCON Ltd. [2] que corre sobre una PC y se comunica con el PLC vía protocolo Modbus con la opción de enlace inalámbrico. Siguiendo la secuencia explicitada en el punto 2.1, se asignaron al autómata las entradas (Tabla 1) y las salidas (Tabla 2) como se detalla a continuación:

Tabla 1: Asignación de entradas al PLC

Dirección	Descripción	Información adicional
%I0.0	Fin de carrera de cilindro inferior	Un valor alto indica que el cilindro se encuentra extraído
%I0.1	Fin de carrera de cilindro mayor	Un valor alto indica que el cilindro se encuentra retraído
%I0.2	Fin de carrera de cilindro mayor	Un valor alto indica que el cilindro se encuentra extraído
%I0.3	Fin de carrera de cilindro superior	Un valor alto indica que el cilindro se encuentra extraído

Tabla 2: Asignación de las salidas del PLC

Dirección	Descripción	Información adicional
%Q0.0	Electroválvula del cilindro inferior	Un valor alto activa la electroválvula y retrae el cilindro
%Q0.1	Electroválvula del cilindro mayor	Un valor alto activa la electroválvula y retrae el cilindro
%Q0.2	Electroválvula del cilindro mayor	Un valor alto activa la electroválvula y extiende el cilindro

ISBN: 978-987-1676-63-7

%Q0.3	Electroválvula del cilindro superior	Un valor alto activa la electroválvula y retrae el cilindro
%Q0.5	Relé del PLC y su correspondiente led de visualización (número 6)	Al encender el sistema se activa el relé 6 de modo que su led se ilumine y el operario disponga de una ayuda visual en el tablero
%Q0.6	Relé del PLC y su correspondiente led de visualización (número 7)	En modo automático se activa el relé 7 de modo que su led se ilumine y el operario disponga de una ayuda visual en el tablero
%Q0.7	Relé del PLC y su correspondiente led de visualización (número 8)	En modo manual se activa el relé 8 de modo que su led se ilumine y el operario disponga de una ayuda visual en el tablero

Se muestran imágenes del gabinete de campo conteniendo en su parte superior la posibilidad de comunicación inalámbrica con el SCADA, en la parte inferior el PLC y fuente de alimentación. A la derecha la interfaz del usuario desde el SCADA implementado (Figura 4):

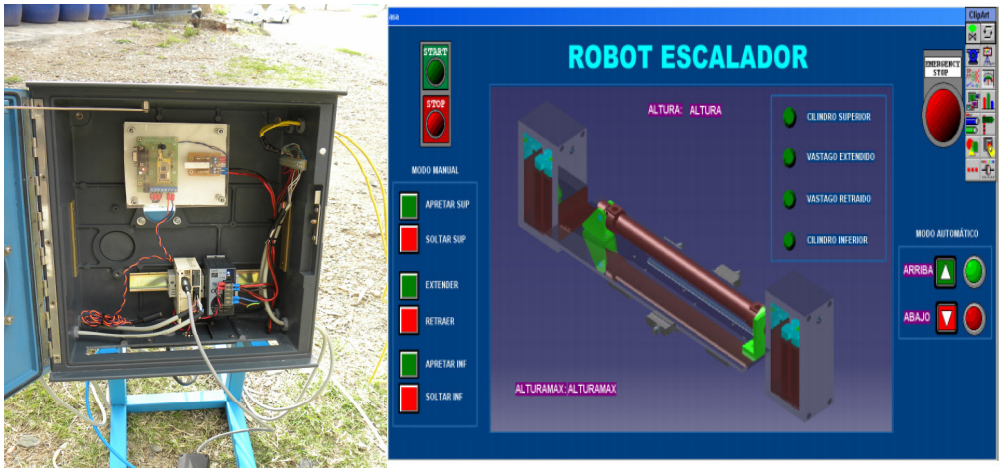


Figura 4: A la izquierda, gabinete con PLC y accesorios, a la derecha interfaz del usuario

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.2 Placa Arduino Mega 2560

En éste punto se tratarán las otras dos estrategias de control del robot escalador neumático. Las mismas hacen uso de una placa Arduino Mega 2560, como núcleo del proceso.

Según la página oficial de Arduino, se lo define como una plataforma de prototipos de electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Que se puede completar diciendo que es un hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra que permiten conectar de forma sencilla diferentes actuadores y sensores. Si bien existen diversos modelos de Arduino, todos los microcontroladores utilizados son AVR (una arquitectura desarrollada y fabricada por Atmel).

Completa éste dispositivo un software gratis, libre y multiplataforma que permite escribir, verificar y cargar en la memoria del microcontrolador el conjunto de instrucciones que desean ejecutar [3]. La vinculación con la computadora, se realiza mediante un conector USB, lo cual facilita la comunicación con el microcontrolador. La placa en cuestión cuenta con un microcontrolador ATmega 2560 que funciona a 16 MHz y dispone de 54 entradas/salidas digitales y 16 entradas analógicas. Además de la conexión USB dispone de 4 puertos UART.

Arduino se programa en un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, por siglas en inglés), llamado “sketch”. Esto es simplemente una forma de llamar al conjunto de herramientas de software que permiten escribir y editar el programa por parte del usuario y grabarlo en la memoria del microcontrolador de la placa [4]. A continuación se muestra una síntesis gráfica del mundo Arduino y de la placa específica usada, (Figura 5).

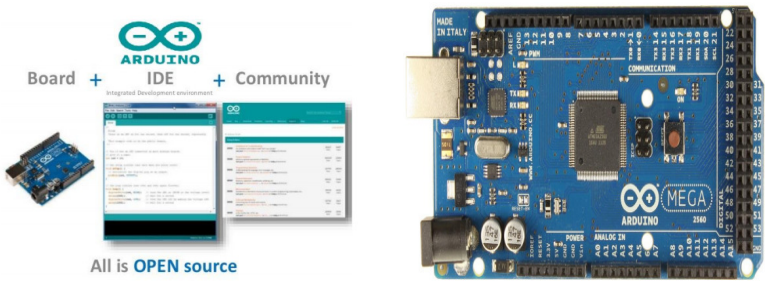


Figura 5: A la izquierda, el mundo Arduino y a la derecha la placa Mega 2560

3.2.1 Segunda Estrategia de Control: Arduino + Simulink + StateFlow

Por medio de esta estrategia, se busca modelar, simular y controlar como máquina de estado.

Como se sabe, Matlab® es un lenguaje de alto nivel, a su vez la herramienta Simulink® permite programar directamente por bloques y de forma gráfica, pasando a un segundo plano la

generación de código .m, entre esos bloques está el paquete de desarrollo Stateflow® con el que se puede implementar máquinas de estado y transferirlo a la placa Arduino de una forma totalmente transparente para el usuario, despreocupándose de la conversión entre los bloques de Simulink®, y comunicándose vía puerto USB corriendo un breve "sketch" sobre Arduino [5].

La librería de Stateflow® proporciona un entorno para modelar y simular lógica de decisión combinatoria y secuencial basado en máquinas de estado definidas por Mealy y Moore. Permite combinar representaciones gráficas, lo que incluye diagramas de transición de estado y diagramas de flujo, y con el fin de modelar la forma en que el sistema reaccionará ante los eventos en función de las condiciones de las señales de entrada y en consecuencia, actuar sobre las salidas en tiempo real, que al igual que en el caso de la programación del PLC, sigue la secuencia dada en el punto 2.1. Se muestra a continuación la integración de Stateflow® (a la derecha) como un bloque de Simulink®, y éste a su vez muestra a la izquierda sus relación con las entradas / salidas reales sobre Arduino vía comunicación USB, (Figura 6).

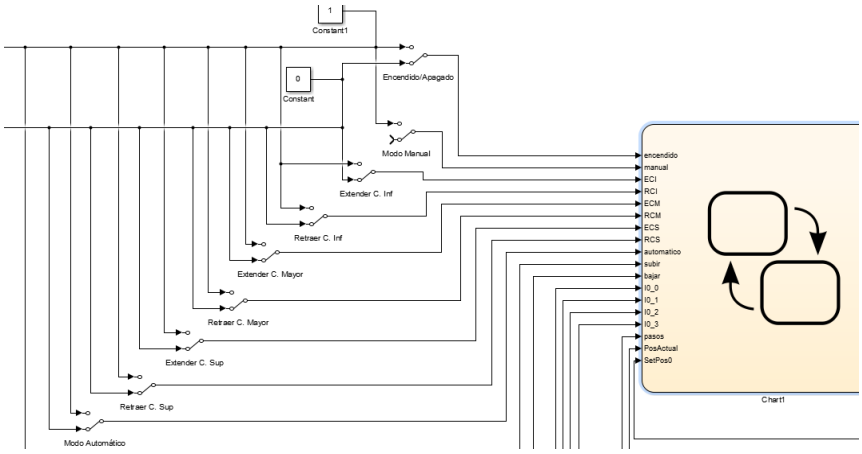


Figura 6: A la izquierda, entradas / salida de Simulink® y a la derecha el bloque Stateflow®

3.2.2 Tercera Estrategia de Control: Arduino embebido

Consistió en desarrollar un código en *"sketch"* con un funcionamiento similar al presentado en las etapas anteriores y siguiendo la secuencia indicada en el punto 2.1. En este caso el operario dispone de llaves y pulsadores reales, eligiendo el modo de operación (manual / automático) y aumentar o disminuir la altura objetivo del robot (Figura 7). De este modo se dispone físicamente de aquellos comandos que se presentaban de forma virtual a través del SCADA o de Simulink® Stateflow®.

ISBN: 978-987-1676-63-7

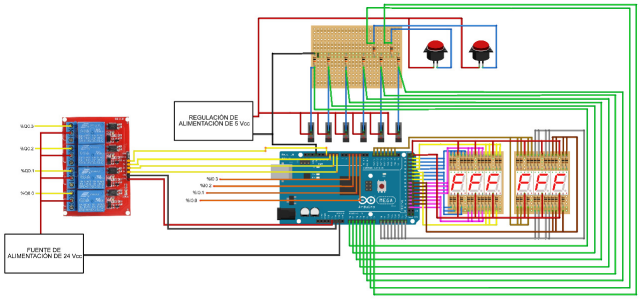


Figura 7: Arduino y comandos asociados

4. CONCLUSIONES

La primera estrategia basada en PLC / SCADA resultó sencilla de llevar a cabo dado el alto grado de desarrollo de las herramientas estándar de programación. Brinda una operación segura y robusta sobre el robot.

La segunda en torno a Matlab® / Simulink® / StateFlow® extiende las prestaciones del microcontrolador Arduino, creando sistemas integrados que permiten analizar los datos, representarlos, y utilizarlos para el control del robot. Su principal inconveniente reside en los tiempos de latencia debido a la comunicación USB y al procesamiento.

Respecto de la tercera con programa embebido sobre Arduino, resultó de gran potencial para resolver problemas de automatización y control, cuyas ventajas residen principalmente en el bajo costo de adquisición y en la noción de software y hardware libre.

5. REFERENCIAS

[1] Schneider Electric, *Manual de funcionamiento de TwidoSoft,* Versión 3.2l, Francia, 2008.

[2] Afcon Software and Electronics Ltd., *P-CIM Training Manual*, Israel 2007.

[3] Herrador, R.E., *Guía de usuario de Arduino*, Universidad de Córdoba, 2009.

[4] Torrente Artero, O., *Arduino Curso Práctico de formación*, Editorial RC Libros, 2013.

[5] Campa, G., *Learning basic mechatronics concepts using the Arduino board and MATLAB*, The MathWorks, 2014.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado de la UNCuyo por haber financiado éste Proyecto, como así también a los noveles Ingenieros Armando Cabrerizo, Agustín Meschini y Sebastián Rodríguez por el diseño y construcción del robot durante su Proyecto Final de Estudios en el año 2014.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

VARIADOR DE VELOCIDAD PARA MOTORES MONOFÁSICOS DE BAJA POTENCIA

Carlos F. Caro[1], Rubén A. Fernández[2], Alejandro Ferreiro[3], Carlos R. Juárez[3]

[1] SECyT – Universidad Nacional de Santiago del Estero - Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina. Correo-e: caroimp.sgo@gmail.com
[2] Centro de Sistemas de Control y Electrónica de Potencia – ITA – (FCEyT – UNSE). Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina. Correo-e: raf@unse.edu.ar
[3] Centro de Sistemas de Potencia y Energías Renovables – ITA – (FCEyT – UNSE) Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina.

RESUMEN

Santiago del Estero tiene una geografía dilatada, en la cual aún existen comunidades rurales con demandas energéticas concretas, latentes o potenciales, difíciles de satisfacer por variadas causas, como localización distante de redes de energía, baja densidad poblacional, reducida (o nula) actividad productiva. Entre las necesidades energéticas de estos sectores rurales, se destacan las aplicaciones mecánicas relativas al manejo de granos y fluidos, particularmente leche y agua. En estos casos, resulta adecuada la aplicación de motores de inducción de pequeña potencia. Hasta hace unos años no era posible la aplicación de estas máquinas en situaciones en las que es imperioso controlar la velocidad. Se superó esta restricción con la aparición de los semiconductores o dispositivos de estado sólido. En la actualidad, estos motores simples y de bajo costo, son utilizados en varios rubros, incluyendo el agro, la industria, y el hogar. Controlar su velocidad y torque (VyT) requiere un análisis de su diseño y características [1][2]. Las premisas esenciales que debiera satisfacer un sistema de control de VyT deben contemplar su operación en acoplamientos mecánicos, concretamente: a) arranques suaves, progresivos y sin cambios bruscos, evitando así golpes mecánicos; b) control en aceleración y frenado; c) limitación de la corriente de arranque, para reducir el consumo; d) ahorro de energía en funcionamiento con carga parcial; e) mantenimiento del torque en todo el rango de velocidad; f) mayor rendimiento. Para ello, se considera adecuada la aplicación de la técnica de variación proporcional de la tensión y de la frecuencia eléctrica aplicada. Cabe destacar la importancia de los variadores de velocidad en aplicaciones rurales, pues el ahorro de energía que permiten por la reducción de corrientes de arranque y el ajuste de VyT a distintas cargas, los hacen óptimos para ser usados en sistemas aislados con fuentes de generación no convencionales de pequeña potencia [3][4].

Palabras Claves: *áreas rurales, necesidades de energía, control de velocidad, motores monofásicos.*

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico realizado en los últimos años ha contribuido a mejorar el acceso a la energía a millones de personas, aunque todavía un 15% de la población mundial se encuentra sin acceso a la electricidad [1]. Las energías renovables juegan un papel cada vez más importante ofreciendo la oportunidad de acelerar la transición a servicios modernos de energía y de incrementar el acceso, es decir, son cruciales para el desarrollo sostenible, tanto desde el punto de vista social y ambiental, como del punto de vista económico. Particularmente, las tecnologías de generación distribuida permiten proporcionar servicios de energía esenciales en áreas remotas o aisladas eléctricamente, en otras palabras, donde la red eléctrica de distribución no llega, impulsando así el desarrollo de proyectos de generación aislada.

Íntimamente ligado al desarrollo de tecnologías de generación aislada a partir de energías renovables, está el mejoramiento de la eficiencia energética. Para estos sistemas de generación, es importante lograr la mayor eficiencia posible en las potencias consumidas. Con esta premisa, se propone un dispositivo que permita manejar eficientemente la conversión de energía eléctrica a mecánica mediante motores de inducción de pequeña potencia, pensando particularmente en aplicaciones rurales donde el control de velocidad y torque, y su ajuste a distintas cargas, es necesario [2].

La provincia de Santiago del Estero posee una geografía extensa con sectores eléctricamente aislados, entre los cuales se destacan las comunidades rurales. Las necesidades de energía eléctrica en estas áreas rurales son difíciles de satisfacer por encontrarse alejadas de la red de distribución, por lo cual existe un enorme potencial para la explotación de sistemas de generación a partir de energías renovables.

Puesto que las tecnologías de generación aislada brindan energía sólo para aplicaciones de potencias bajas, debido a los altos costos que implica su instalación, es esencial además tener presente que deben ser eficientes.

Respecto de las necesidades energéticas de estos sectores rurales, se menciona las aplicaciones mecánicas relativas al manejo de granos y fluidos, particularmente leche y agua. Entre ellas, en particular en la provincia mencionada, se encuentra el bombeo de agua para irrigación del terreno [3]. Una técnica tradicional de irrigación es la inundación del predio a cultivar con el fin de sobresaturar el suelo, pero esto genera desperdicio de agua, degradación y salinización del suelo, en especial en regiones con climas áridos. Por estas razones, es adecuada la aplicación de otras técnicas de irrigación, como riego por goteo o por microaspersores a través de conductos cerrados que evitan la infiltración y contaminación del agua. Pero para usar estas técnicas es necesario tener control sobre la presión del agua.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por otra parte, el bombeo de agua es esencial para el suministro de agua para el ganado en zonas áridas donde los sitios naturales para esto son escasos o nulos.

También existen otras aplicaciones que se encuentran en crecimiento sostenido como el caso de la acuicultura. Para esta aplicación son necesarias bombas de aireación, las cuales son esenciales para incrementar los niveles de oxígeno en el agua, lo cual contribuye considerablemente a la productividad. Una vez más se hace necesario el control sobre el sistema de bombeo.

Habitualmente, en los casos citados precedentemente, la impulsión de las bombas suele concretarse con motores eléctricos de inducción, y en el caso de pequeñas potencias los mismos son monofásicos. Por ello, es relevante desarrollar dispositivos que, con un costo atenuado y una adecuada eficiencia, permitan regular la velocidad de estos motores.

Hasta la llegada de los modernos controladores de estado sólido, los motores de inducción no eran las máquinas adecuadas para aplicaciones que requerían considerable control de velocidad. El rango normal de operación de un motor de inducción típico está confinado a menos de 5% de deslizamiento y la variación de la velocidad en este rango se puede considerar directamente proporcional a la carga sobre el eje del motor. Aun si el deslizamiento fuera mayor, la eficiencia del motor sería muy pobre puesto que las pérdidas en el cobre del rotor son directamente proporcionales al deslizamiento del motor.

Existen sólo dos técnicas para controlar la velocidad de un motor de inducción. Una de ellas consiste en variar la velocidad sincrónica n_{sinc} (de los campos magnéticos y del estator), siendo que la velocidad rotórica siempre es próxima a la anterior. La otra técnica consiste en variar el deslizamiento del motor para una carga dada.

La velocidad sincrónica de un motor de inducción está dada por la ecuación (1), en la cual *f* es la frecuencia eléctrica en ciclos/s, y *P*, el número de pares de polos.

$$n_{sinc} = 60.\frac{f}{P} \tag{1}$$

Por tanto las únicas maneras en que se puede variar la velocidad sincrónica de estas máquinas son: 1) cambiando la frecuencia eléctrica y 2) modificando el número de polos de la máquina. La diferencia entre la velocidad sincrónica n_{sinc} (que se verifica en el estator), y la rotórica n, se denomina deslizamiento *s* y suele expresarse en porcentaje - ecuación (2) -. El control del deslizamiento puede lograrse variando la resistencia del rotor o la tensión en bornes del motor [4]. Dependiendo del tamaño de la máquina, durante el funcionamiento en régimen esta diferencia es aproximadamente del 3-10%. El deslizamiento es una de las características más importantes de una máquina de inducción.

$$s = \frac{n_{sinc} - n}{n_{sinc}} \tag{2}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

El esquema básico del variador de velocidad propuesto se presenta en la Figura 1, y se puede dividir en: etapa de potencia, donde están involucradas la fuente de alimentación DC y el inversor; la etapa de control; y la etapa final de filtrado.

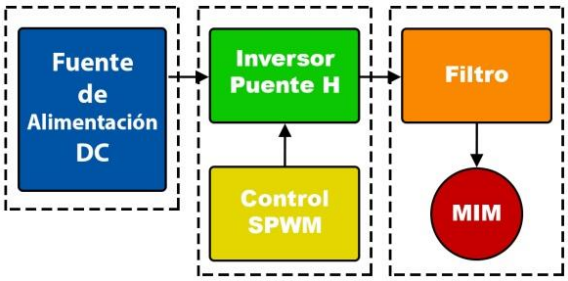


Figura 1. Esquema del variador de velocidad.

En este trabajo se presenta una síntesis del marco teórico del control de velocidad mediante la relación tensión/frecuencia, y las ventajas de utilizar este tipo de control. En este sentido, se muestra el esquema circuital de implementación del método, el que está basado en el control de la etapa de potencia por medio de un microcontrolador PIC. También se exponen las características del tipo de inversor elegido. A su vez, se realiza una comparación de las 2 técnicas más utilizadas de modulación. A continuación de esto, se explica la lógica del programa que será embebido en el microcontrolador PIC, el cual será programado con los parámetros necesarios para gobernar la conmutación de los semiconductores de tal manera de obtener a la salida, luego de un filtrado, una tensión alterna para alimentar al motor de inducción.

En los apartados finales, se presenta la simulación realizada del esquema circuital propuesto, y las conclusiones que surgen del análisis de esta simulación.

Cabe destacar que se encara el desarrollo de este dispositivo no sólo para suplir la necesidad del mismo en el mercado nacional, ya que no se comercializan variadores de velocidad para motores monofásicos de inducción en nuestro país, sino también porque puede ser construido a costos muy bajos en comparación con la erogación que implica importarlos.

2. CONTROL DE LA VELOCIDAD MEDIANTE RELACIÓN TENSIÓN/FRECUENCIA

Cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad base del motor es necesario reducir el voltaje aplicado a los terminales del estator para obtener una operación adecuada. El voltaje aplicado a los terminales del estator deberá disminuir en la misma proporción en que lo hace la frecuencia en él. Este proceso se llama degradación. Si esto no se hace, se saturará el acero del núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la máquina [4].

Para entender esto, recuérdese que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la ley de Faraday, cuya expresión correspondiente es la ecuación (3).

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$v(t) = -N.\frac{d\varphi}{dt} \tag{3}$$

donde: *N*, cantidad de espiras de la bobina.

Al aplicar al núcleo una tensión $v(t) = V_M.sen\omega t$, el flujo φ resultante puede encontrarse con (4), en la cual $\omega = 2\pi f$.

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_p}\int v(t)dt = \frac{1}{N_p}\int V_M.sen\omega t\, dt \;\rightarrow\; \varphi(t) = -\frac{V_M}{\omega.N_p}cos\omega t \tag{4}$$

Entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10%, mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementará cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización.

Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varía proporcionalmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante.

Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal. Cuanto mayor sea la frecuencia eléctrica sobre la velocidad base, mayor será el denominador de la ecuación. Puesto que el término del numerador se mantiene constante cuando se opera sobre la frecuencia nominal, disminuyen el flujo resultante en la máquina y el par máximo.

Esto también se puede apreciar si hacemos uso de las expresiones resultantes del análisis del circuito equivalente de la máquina asincrónica - ecuaciones (5) y (6) -.

$$E = 4.44\,\varphi.f.K_n \tag{5}$$

$$V \approx K.\varphi.f \tag{6}$$

expresiones en las cuales: K_n, es constante de proporcionalidad; *K,* constante general de proporcionalidad. El torque desarrollado por el motor es directamente proporcional al campo magnético producido por el estator. Por ello, al variar frecuencia y tensión proporcionalmente, el flujo, y por ello el torque, se pueden mantener constantes a lo largo del rango de velocidad nominal del motor, tal como se observa en la Figura 2.

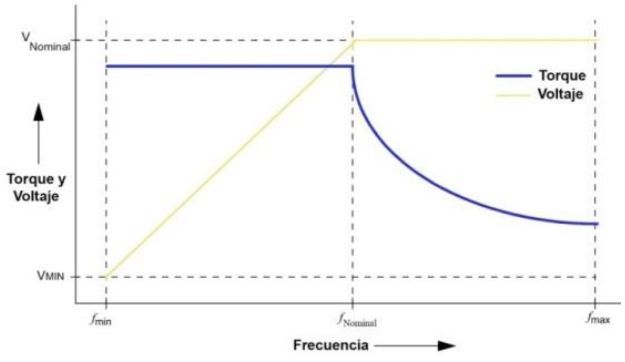


Figura 2. Gráfica de torque y tensión en función de la frecuencia.

En los apartados siguientes, se presentan el marco circuital de potencia y la técnica de modulación que se eligió para implementar este tipo de control de velocidad.

3. INVERSOR

Para que un convertidor de energía funcione como inversor, debe transferir potencia desde una fuente de corriente continua, conocida también como bus DC, hasta una carga AC. A la implementación circuital de este equipo se lo denomina inversor.

Estos pueden ser monofásicos o trifásicos y a su vez autónomos o no autónomos, y todos trabajan en conmutación, es decir que los semiconductores operan en corte y saturación.

La denominación de autónomo implica que son inversores cuya tensión y frecuencia de salida son propios y no están regidas por otras fuentes externas de energía, es decir que dichos parámetros son generados acorde al diseño adoptado y son los que se entregan a la carga. Todos los inversores autónomos alimentados con fuente de tensión continua necesitan de diodos de recuperación de energía reactiva cuando se alimentan cargas reactivas.

Un inversor monofásico en configuración puente, tal como se muestra en la Figura 3, está formado por cuatro semiconductores funcionando como interruptores conectados a una fuente de alimentación de corriente continua. Si los interruptores Q1 y Q4 se activan simultáneamente, la tensión de entrada aparece a través de la carga. Si Q2 y Q3 se activan al mismo tiempo, la tensión a través de la carga se invierte, generando una tensión en la carga como muestra la Figura 3.

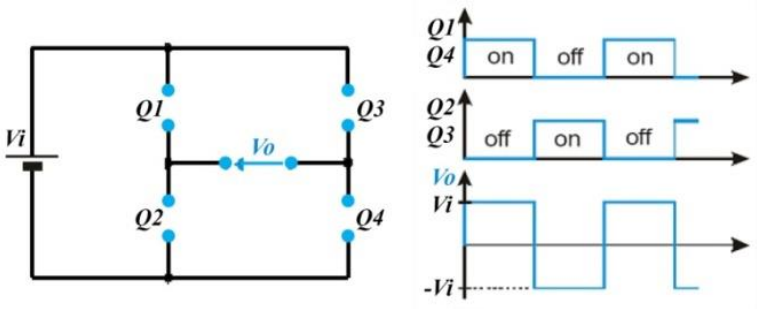


Figura 3. Inversor monofásico tipo puente y gráficas asociadas de los interruptores.

Características:

- Tensión máxima que deben soportar los interruptores de potencia: V_i, más las sobretensiones que originen los circuitos prácticos.
- Topología adecuada para tensión de entrada continua elevada, y potencia alta en la carga.
- Doble número de interruptores de potencia que en la topología medio puente, y de gobierno más complejo por no tener un terminal referido a masa para los dispositivos superiores (Q1 y Q3).

ISBN: 978-987-1676-63-7

- La tensión de salida máxima es la tensión V_i, de la fuente, a diferencia de la topología medio puente en donde la tensión máxima de salida es V_i / 2 [5].
- Para la misma potencia, las corrientes de salida y de cada interruptor son la mitad que aquellas para la topología medio puente [5].

Las características antes descriptas son las que permiten implementar la técnica de manera eficiente. A continuación, se presenta el marco teórico de la modulación.

4. MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO SENOIDAL

En esta clase de modulación se tiene que el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. Es un tipo de modulación comúnmente aplicado en el campo industrial y suele abreviarse SPWM.

Con la modulación senoidal se obtiene una reducción significativa del factor de distorsión y de las armónicas de menor orden. Las señales que se aplican a las compuertas de los dispositivos de conmutación, se generan al comparar una señal senoidal con una onda portadora triangular. Por tanto, para obtener una forma de onda senoidal basta con aplicar la forma de onda resultante de la comparación de esa onda triangular con la senoidal, y filtrar adecuadamente. Para el caso de los inversores de potencia, se aprovecha la señal resultante de dicha comparación para excitar los interruptores que forman la topología.

Con el objeto de realizar un estudio de la manera más global posible, normalizaremos los valores de las frecuencias y de las amplitudes de las señales que intervienen; así, se define la modulación de amplitud como la relación de amplitudes de la señal senoidal y de la triangular (moduladora y portadora). Además, definimos la modulación de frecuencia como la relación entre las frecuencias de la señal triangular y la señal senoidal:

$$m_a = \frac{V_{senoidal}}{V_{triangular}} \qquad - \qquad m_f = \frac{f_{triangular}}{f_{senoidal}}$$

4.1. SPWM Unipolar y Bipolar

En este apartado, se realizará la comparación de ambas técnicas. En la bipolar, se utiliza una única señal de referencia senoidal V_{sen}, y una señal portadora triangular V_{tri} que fija la frecuencia de conmutación; y en la unipolar, se utilizan dos señales de referencia senoidal V_{sen_p} y V_{sen_n}, y una señal portadora triangular V_{tri} que fija la frecuencia de conmutación. En la Tabla 1 vemos las distintas combinaciones para cada una de las técnicas. Las aclaraciones que se encuentran entre paréntesis dentro de la Tabla 1, corresponden a los interruptores de la topología puente, y a su vez, están referidas a la Figura 4, donde se presentan los esquemas básicos de cada una de las técnicas de modulación.

Tabla 1. Combinaciones según técnica de modulación.

Bipolar	$V_{sen}>V_{tri} \rightarrow V_o=+V_{DC}$ (Q1 y Q4 ON)	$V_{sen}<V_{tri} \rightarrow V_o=-V_{DC}$ (Q2 y Q3 ON)
Unipolar	$V_{sen\_p}>V_{tri} \rightarrow V_A=+V_{DC}$ (Q1 ON)	$V_{sen\_p}<V_{tri} \rightarrow V_A=0$ (Q2 ON)
	$V_{sen\_n}<V_{tri} \rightarrow V_B=0$ (Q4 ON)	$V_{sen\_n}>V_{tri} \rightarrow V_B=+V_{DC}$ (Q3 ON)

El esquema básico para producir una modulación bipolar y una modulación unipolar, respectivamente, se muestran en la Figura 4.

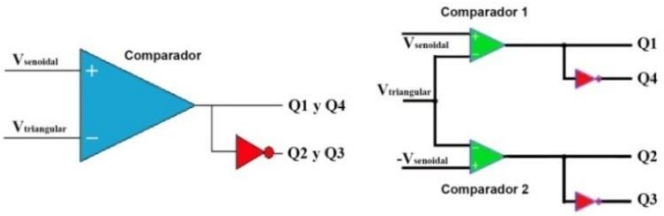


Figura 4. Esquemas básicos para modulación bipolar y unipolar, respectivamente.

En la Figura 5 se muestran las formas de ondas para la modulación SPWM bipolar y unipolar.

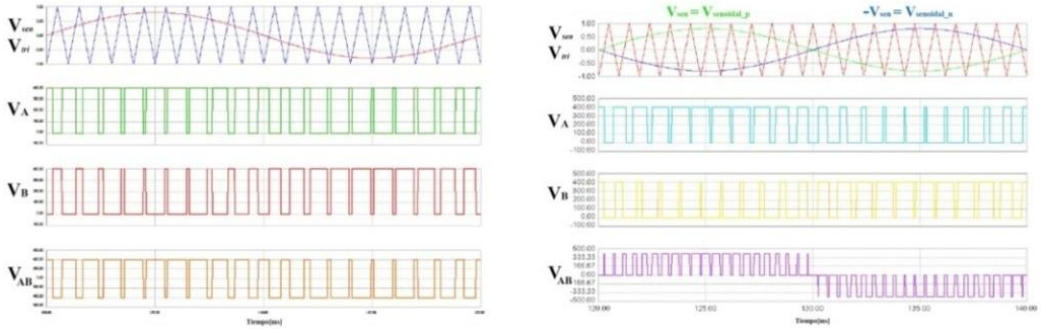


Figura 5. Formas de onda para modulación SPWM bipolar y unipolar, respectivamente.

En la Figura 6, se muestran las series de Fourier de las salidas de las modulaciones SPWM bipolar y unipolar, respectivamente.

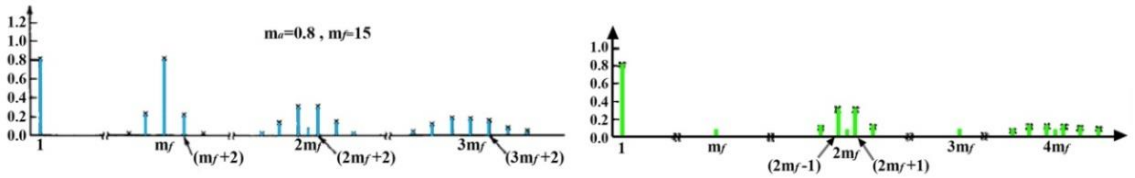


Figura 6. Contenido armónico de la modulación bipolar y unipolar, respectivamente.

En la bipolar, la forma de onda triangular está sincronizada con la de referencia, y se suele elegir una m_f que sea un entero impar, por lo que la salida SPWM muestra una simetría impar. En la unipolar, si se elige una m_f que sea un entero par, elimina los armónicos impares múltiplos de m_f. La principal ventaja que presenta el SPWM con modulación unipolar frente a la bipolar, es que reduce el número de armónicos. Concretamente, los armónicos de menor frecuencia están localizados alrededor del doble de la frecuencia de conmutación. Otra ventaja

ISBN: 978-987-1676-63-7

es que estresa en menor medida los componentes de filtrado a la salida del inversor, pues conmuta la salida entre 0 y $+V_{DC}$ durante el medio ciclo positivo, ó 0 y $-V_{DC}$ durante el medio ciclo negativo, en lugar de hacerlo entre $+V_{DC}$ y $-V_{DC}$ como sucede en la modulación bipolar [6]. Esto se ve en la Figura 5. Cabe resaltar que al aparecer los armónicos de la técnica unipolar a dos veces la frecuencia de conmutación, el proceso de filtrado es más simple, entendiéndose que los componentes de filtrado podrán tomar valores menores para lograr una misma atenuación en comparación con la bipolar, lo cual se traduce en menor espacio y menor costo.

5. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

La cuestión principal del control del puente H es poder variar tanto la tensión de salida como la frecuencia de salida de forma proporcional, y esto se realizaría mediante un potenciómetro conectado a una entrada analógica/digital (A/D) del microcontrolador, proporcionando así la variación de la referencia. El valor obtenido de la lectura de esta entrada A/D se utiliza para hacer los cálculos pertinentes para lograr escalar proporcionalmente la tensión y frecuencia de salida que se ven reflejadas en el puente H, es decir, el valor obtenido de la lectura permite modificar la secuencia de conmutación de los semiconductores.

Teniendo en cuenta todo lo visto, se diseñó un programa para ser grabado en el microcontrolador.

6. SIMULACIÓN

Una vez terminado el programa para el microcontrolador, se procedió a realizar la simulación en el software Proteus 8 versión para estudiantes.

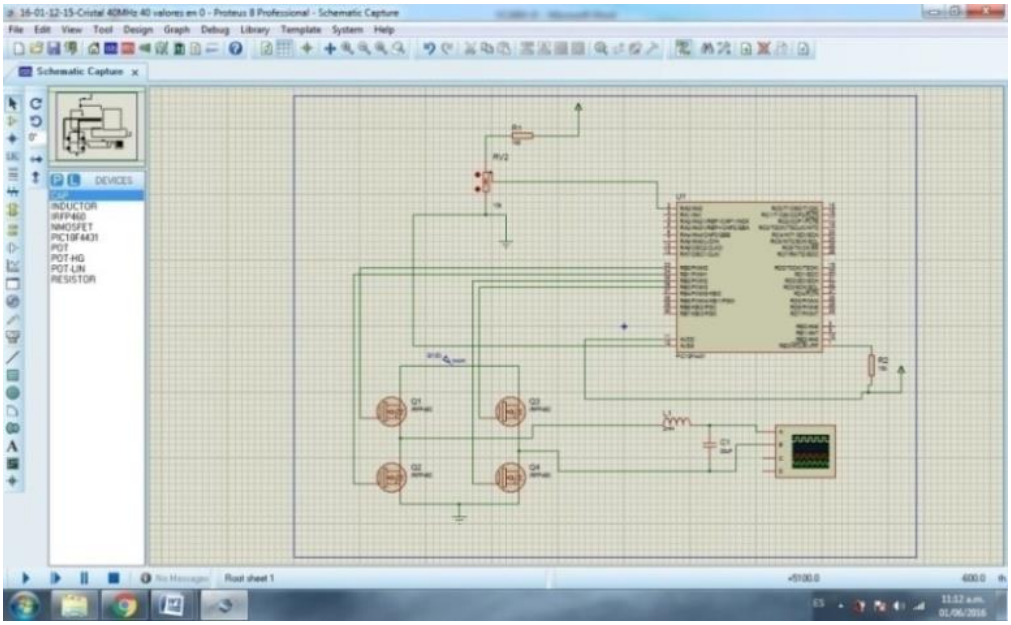


Figura 7. Captura de pantalla del área de trabajo del Proteus 8.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se armó el circuito de control por un lado, compuesto por el microcontrolador y el potenciómetro; y por el otro lado, el circuito de potencia, compuesto por el puente H (alimentado por las salidas PWM del microcontrolador) y el circuito filtro. Al final del circuito, se acoplaron las puntas del osciloscopio digital que provee el software. En la Figura 7 se muestra una captura de pantalla del área de trabajo del software.

Una vez conectado todo, y habiendo alimentado el circuito de control con 5 V y el de potencia con 400 V, se corrió el programa del microcontrolador para comenzar la simulación. En la Figura 8 se puede apreciar a la izquierda el circuito total con sus distintas partes, y a la derecha una serie de gráficas obtenidas del osciloscopio. La gráfica de la 1^{era} fila, 1^{era} columna corresponde al potenciómetro al 100 %, es decir, 220 V y 50 Hz a la salida; la gráfica de la 2da fila, 1^{era} columna corresponde a la transición del potenciómetro de 100 % a 50 %;la gráfica de la 1^{era} fila, 2da columna corresponde al potenciómetro al 50 %, es decir, 110 V y 25 Hz a la salida; la gráfica de la 2da fila, 2da columna corresponde a la transición del potenciómetro de 50 % a 10 %, es decir, a una salida de 22 V y 5 Hz.

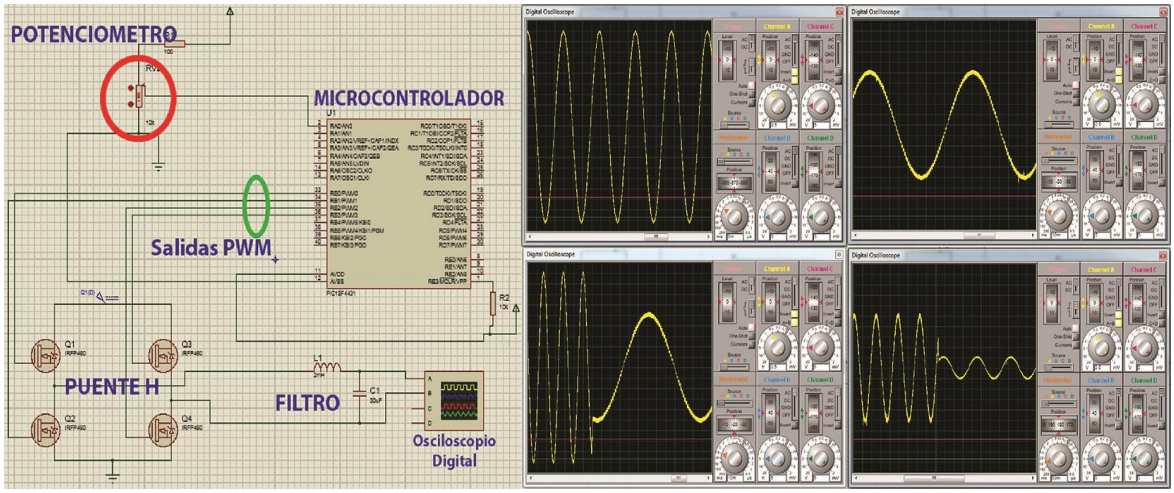


Figura 8. Circuito simulado y gráficas asociadas del osciloscopio.

7. CONCLUSIONES

Se presenta el desarrollo teórico de un variador de velocidad para motores eléctricos monofásicos de potencia reducida, y consecuentemente se ha realizado una simulación incluyendo el programa diseñado para el microcontrolador. Se puede apreciar en las gráficas que en efecto se alcanzó el objetivo de variar proporcionalmente tensión y frecuencia en forma simultánea a la salida del dispositivo diseñado.

Poseer este dispositivo con un costo moderado, permitirá lograr un funcionamiento más suave de los motores citados, en especial en el arranque, lo cual ha de prolongar su vida útil y la de los dispositivos mecánicos asociados a los cuales se aplique, ya que tenderían a minimizar sustancialmente esfuerzos asociados al arranque u operación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para lograr lo citado, se realizaría la programación en el microcontrolador de funciones de aceleración y desaceleración con rampa lineal de velocidad. De esta manera, no sólo se disminuyen las corrientes de arranque sino que también se evitarían variaciones bruscas en el torque y abruptos cambios en solicitaciones mecánicas.

Es importante destacar que el dispositivo permitirá también un manejo más eficiente de la energía provista por los sistemas de generación a partir de energías renovables, ya que para el arranque de un motor no se solicitarán picos altos de corriente, y además se podrá ajustar velocidad y torque en función de la carga que se necesite impulsar.

8. REFERENCIAS

[1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). *Renewables 2015 Global Status Report*. REN21, ISBN 978-3-9815934-6-4, 2015.

[2] Saravanallango G., Rajasekar N. *An improved energy saving v/f control technique for solar powered single-phase induction motor*. Energy Conversion and Management, Vol. 50, Issue 12, pp. 2913–2918, 2009.

[3] van Campen B., Guidi D.,Best G.. *Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles*. Documento de Trabajo sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales, No. 3. FAO, Roma, 2000.

[4] Chapman, S. *MáquinasEléctricas*. McGraw Hill, Buenos Aires, 2000.

[5] Mohan, N., Undeland, T., Robbins, W. *Power Electronics. Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Sons, EEUU, 1995.

[6] Wu, B. *High Power Converters and AC Drives*. IEEE Press & Wiley Interscience, EEUU, 2006.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE EXPERIENCIA DE CINEMATICA PARA LABORATORIO REMOTO EN EL AREA DE FISICA BASICA

Carlos M. Olivares [1], Carlos R. Juárez [2]

[1] Depto. Acad. de Física y Química – FCEyT – UNSE - correo-e: ingolivaresmariano@gmail.com
[2] Laboratorio de Física – FCEyT UNSE correo-e: cjuarez@unse.edu.ar
Univ. Nacional de Santiago del Estero - Av. Belgrano (s) 1912, C.P.:4200
Santiago del Estero, Argentina

RESUMEN

El estudio de ciencias en el ciclo básico universitario se enfrenta muchas veces a la dificultad de atender cantidades de estudiantes cada vez mayores con una planta de laboratorio que no necesariamente crece al mismo ritmo. Esto significa que es frecuente que muchos estudiantes tengan que hacer al mismo tiempo una práctica de la cual se dispone un solo conjunto de dispositivos para realizarla.
En el mundo existen antecedentes de laboratorios remotos en donde se integran dispositivos físicos y de control usando diferentes plataformas [1]. Esta integración de dispositivos físico es la principal diferencia que distingue a un laboratorio remoto de un laboratorio virtual [2].
Es por ello que en este trabajo se propone como opción una experiencia docente automatizada y controlable remotamente para implementar una práctica a distancia de cinemática en el curso de laboratorio de física básica. La misma permite la realización de mediciones haciendo uso de un dispositivo montado al efecto mediante una conexión a internet.
Se efectúa la medición de la posición de un carrito sobre una pista inclinada mientras éste desciende acelerándose por acción de la gravedad. Se emplea para medir la posición un sensor ultrasónico, y para remontarlo un motor de corriente continua, controlado por un sistema compuesto por un ordenador más una interfaz de comunicación. Además, se dispondrá de una cámara de video donde se pueda seguir visualmente y en tiempo real los desplazamientos ocurridos.
Una vez finalizadas las mediciones los datos medidos se remiten electrónicamente al usuario que previamente debe estar registrado en una base de datos formando parte del curso al que corresponde la práctica.
Se prevé la posibilidad de incrementar la accesibilidad al laboratorio por parte de los estudiantes del propio curso con la posibilidad de brindar un servicio a instituciones externas que lo requieran.

Palabras Claves: Laboratorio remoto, Física Básica, Cinemática.

1. INTRODUCCION.

El estudio de ciencias en el ciclo básico universitario se enfrenta muchas veces a la dificultad de dar servicio a cantidades de estudiantes cada vez mayores con una planta de laboratorio que no necesariamente crece al mismo ritmo. Esto significa que en un Laboratorio Convencional (*LC*) es frecuente que muchos estudiantes tengan que hacer al mismo tiempo una práctica de la cual se dispone un solo conjunto de dispositivos para realizarla.
La ampliación de las plantas de laboratorio representa para las instituciones un costo que no siempre está al alcance dependiendo de si existen o no fuentes de financiamiento para adquisición de equipos.
Posibles soluciones para esta problemática son los Laboratorios Virtuales (*LV*) y los Laboratorios Remotos (*LR*).
Cada uno de estos modelos tiene sus particulares características.

Los *LC* fueron y son de fundamental importancia en el estudio de las ciencias. La principal ventaja de un *LC* es su interactividad y la posibilidad de poner a nuestros estudiantes en contacto con la naturaleza de los fenómenos en estudio en primera persona. La intermediación es mínima y esta está representada por la supervisión y puesta a punto de un docente. Como desventajas podemos mencionar, como ya se dijo, su costo de adquisición y mantenimiento además de sus limitaciones en cuanto a accesibilidad por cuestiones de espacio y tiempo. Respecto a este último debe tenerse en cuenta que la respuesta para obtener resultados es generalmente lenta antes de continuar con el proceso de análisis e interpretación.

En un momento surgieron como una solución los *LV* en los cuales mediante un simulador se puede estudiar un fenómeno físico determinado. En ellos los experimentos son efectuados por un programa prediseñado en un entorno de applets de Java u otros permitiendo modificar algunos parámetros de caracterización del experimento y visualizándolos mediante imágenes y animaciones. El entorno es favorable en el sentido de que los estudiantes pierden el miedo a equivocarse y producir un daño a la totalidad o a una parte de costosos equipos, tal como podría suceder en un *LC*. Además permite la ejecución de una práctica de laboratorio haciendo uso de un navegador convencional desde cualquier lugar y en cualquier momento.

Si bien la accesibilidad de los *LV* es mayor que las de los *LC* y reduce los costos de instalación y mantenimiento de las prácticas a estudiar, la interactividad con el modelo real es nula ya que el comportamiento del experimento está, en buena medida, preestablecido de manera ideal y prácticamente no hay lugar para los imprevistos que son típicos en el mundo real, generando una tendencia hacia la pasividad en los estudiantes.

A mitad de camino entre estos dos modelos, y buscando integrar las ventajas de ambos, se encuentran los *LR*.

En el mundo existen antecedentes de laboratorios remotos en donde se integran dispositivos físicos y de control usando diferentes plataformas [1]. Esta integración de dispositivos físicos es la principal diferencia que distingue a un laboratorio remoto de un laboratorio virtual [2].

Otro antecedente de importancia en la implementación de *LR's* es el proyecto ERASMUS denominado "Módulos Educativos para Circuitos Eléctricos y Electrónicos. Teoría y práctica siguiendo una metodología de enseñanza-aprendizaje basada en la investigación y apoyada por VISIR+ (Virtual Instruments Systems in Reality)". El proyecto cuenta con financiación de la Education, Audiovisual and Cultura Agency (EACEA) de la Unión Europea y de él forman parte un conjunto de instituciones europeas asociadas en la figura de un consorcio. La participación en el mismo fue abierta a países externos a la Unión Europea y al momento presente la Argentina forma parte de él contando a la UNSE como institución participante a través del CONFEDI [3]

Los *LR* permiten el acceso a información de instrumentos y al control de equipos reales a distancia a través de internet. En ellos se dispone a distancia de la planta real para controlarla y levantar los resultados que posteriormente serán procesados para su interpretación. En los *LR* se pueden usar los elementos del *LC* integrándolos a un conjunto de detectores y sensores que junto a un sistema informático permitan su conectividad a través de internet. Podría decirse que, mientras mejora la versatilidad en el tiempo y en el espacio de laboratorio sumado a la interacción con elementos reales, una desventaja es el encarecimiento del conjunto.

Podría decirse que otro inconveniente presente es la pérdida de la observación y control de manera directa. Para salvar esta situación el sistema puede visualizarse mediante una cámara IP o webcam. De este modo los sistemas remotos pueden manejarse mediante un mouse, un teclado, o incluso desde la pantalla táctil de un teléfono móvil.
Las principales estrategias de diseño de los LR son:

- *LR basado en una aplicación específica Cliente/Servidor TCP/IP*. En este caso, el usuario desde su PC (cliente) envía al servidor, vía Internet, un archivo con el software que quiere descargar por ejemplo en un PLC conectado al servidor. Para enviar y recibir el archivo, la aplicación utiliza el protocolo TCP/IP soportado por Internet.
- *LR implementado como una aplicación Web*. El alumno accede al servidor a través de una página Web. El usuario envía el archivo o programa vía Internet, por ejemplo, a un PLC conectado a un servidor.
- *LR implementado con Terminal Server de Windows.* Esta estrategia se basa en utilizar el servicio Terminal Server del sistema operativo Windows. La idea básica es ceder el control del servidor a un cliente para que descargue los archivos o programas y luego los ejecute directamente en el servidor.
- *Implementaciones basadas en plataformas de desarrollo de Software como LabView o Matlab*. Esta es una solución bastante utilizada, y sus principales ventajas son su potencia, su compatibilidad con plataformas permitiendo adquirir señales físicas reales y la disponibilidad de servicios que pueden ser aprovechados para el diseño de un LR.

En nuestro caso se optó por trabajar con Labview™ ya que para nuestro equipo de trabajo es más versátil e intuitivo al momento de desarrollar un algoritmo.

Implementación de un Laboratorio Remoto

Para la implementación de un *LR* actualmente no existe una metodología o procedimiento aceptado de manera general, pero teniendo en cuenta los elementos y relaciones desarrollados en este trabajo, se puede hacer una aproximación de cuáles deben ser los pasos para lograr la implementación de un *LR*.
El primer componente a tener en cuenta en la implementación de un LR es que debe contener una orientación pedagógica para de esta manera obtener un entorno integral de prácticas de laboratorio mejorando de esta manera la consolidación de los conocimientos por parte de los estudiantes.
De la misma manera y de forma transversal a la orientación pedagógica comentada, es necesario por parte de los estudiantes remotos que tengan conceptos previos teóricos de la temática a experimentar, así como un conocimiento del funcionamiento de la infraestructura del *LR* para tener un manejo eficiente de la modalidad remota al realizar las prácticas.

Mencionado lo anterior se puede inferir que las guías de laboratorio deben permanecer disponibles y accesibles para los estudiantes remotos cuando se encuentren realizando las prácticas. La información disponible debería contener:

- Identificación de la práctica de *LR*
- Identificación del área temática

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Objetivo de la realización de la practica
- Tutorial de procedimiento para llevar adelante la practica
- Teoría relacionada al *LR*

En la figura 1 se muestra un diagrama de la relación que existe entre un *LC* y un *LR*.

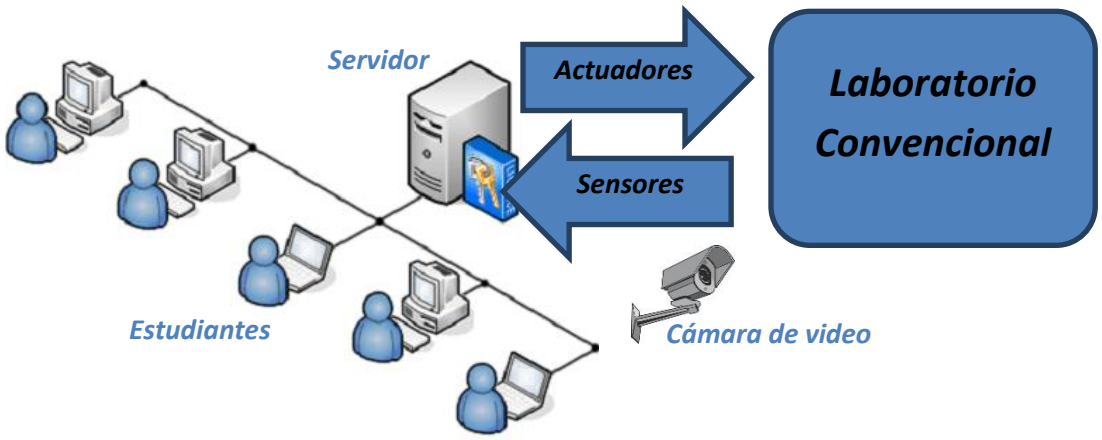


Figura 1. Arquitectura de referencia para la construcción de laboratorios remotos

2. PROPUESTA DE TRABAJO

El Laboratorio de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la Universidad Nacional de Santiago del Estero se encuadra en el modelo de laboratorio convencional (*LC*). En el mismo se efectúan las prácticas correspondientes al ciclo básico de carreras de Ingeniería. Las áreas a las que corresponden los experimentos que se realizan son: mecánica lineal, mecánica rotacional, sonido, temperatura, calor, óptica geométrica y ondulatoria, electricidad y magnetismo.
El presente trabajo plantea un modelo de práctica remota para el estudio de variables cinemáticas en un móvil que se desplaza acelerándose, por efecto de la gravedad, por una pista inclinada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Elementos empleados.

Para la ejecución de la práctica mencionada se cuenta con una pista de aluminio anodizado por donde se desplaza un carrito del mismo material. Los mismos son parte de un conjunto para experimentos de cinemática y dinámica lineal marca PASCO™ ME-9452A [4]. El mismo se muestra en la figura 2, si bien solo se usan la pista, con sus pies y extremos, un carrito y una polea.

ISBN: 978-987-1676-63-7

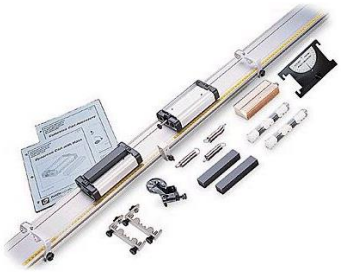


Figura 2: Conjunto para experimentos de cinemática y dinámica lineal PASCO™ ME-9452 A. Fuente: Tecnología Educativa SA

La polea se coloca en el extremo alto de la pista inclinada. También en este extremo se agregó un soporte para sostener un motor de corriente continua. Este motor tiene a su vez otra polea a la cual se fija una cuerda con el fin de unirlo mecánicamente al carrito en la pista. La placa de control y el sensor de posición son ARDUINO UNO™ y HC-SR04 [5] respectivamente, y se muestran en la figura 3.



Figura 3: Placa Arduino UNO™ y sensores de posición ultrasónicos HC-SR04.

En reposo el carrito se encuentra en la parte más baja de la pista inclinada. Al comenzar el ensayo el mismo es tirado por el motor, mediante la cuerda, hasta el punto de inicio y lo sostiene allí hasta recibir la orden de soltarlo. Cuando lo hace comienzan a funcionar los sensores ultrasónicos de posición para ir registrando el descenso acelerado. Cuando el carro llega a una posición próxima al final de la pista el sensor corta la medición y el motor frena el movimiento para evita un golpe fuerte con la barrera que cierra el recorrido.

La planta de dispositivos cuenta además con una cámara IP genérica [6], como la que se muestra en la figura 4, para el monitoreo visual de lo que sucede en la pista.



Figura 4: Cámara IP genérica [5].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Procedimiento a seguir.

El procedimiento de ejecución remoto prevé el ingreso al laboratorio mediante un navegador web a través del blog del Laboratorio de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la UNSE [7]. Luego de acceder a la página de inicio se requiere efectuar una identificación para constatar que quien está ingresando es un estudiante inscripto para el curso presente. Esta identificación se efectúa mediante una dirección de correo electrónico que el estudiante debió previamente registrar al inscribirse. La interfaz gráfica se visualizará como en la figura 5.



Figura 5: Interfaz gráfica para el control y monitoreo del laboratorio remoto

Una vez autenticada la identificación se accede al servidor encargado de administrar la práctica. La página de inicio prevé la descarga de una aplicación para efectuar el experimento, cuya interfaz gráfica funciona en entorno LabVIEW™[8] y se muestra en la figura 6. En ella se encuentran los controles necesarios para la experiencia. La versión del software empleada para la ejecución de este trabajo es de evaluación.



Figura 6: Interfaz gráfica para el control y monitoreo del laboratorio remoto

ISBN: 978-987-1676-63-7

Luego de efectuado el experimento se remite la tabla de datos medidos a la dirección de correo electrónico con que se efectuó la identificación. Esta tabla es la que será objeto de análisis por parte de los estudiantes a los efectos de responder las consignas que se soliciten. En el caso particular del presente experimento, se trata de determinar la aceleración de descenso. El procedimiento general contiene instructivos sobre los pasos a seguir de modo que el mismo sea intuitivo y fácil de seguir. Una descripción general se presenta en el diagrama de flujo de la figura 7.

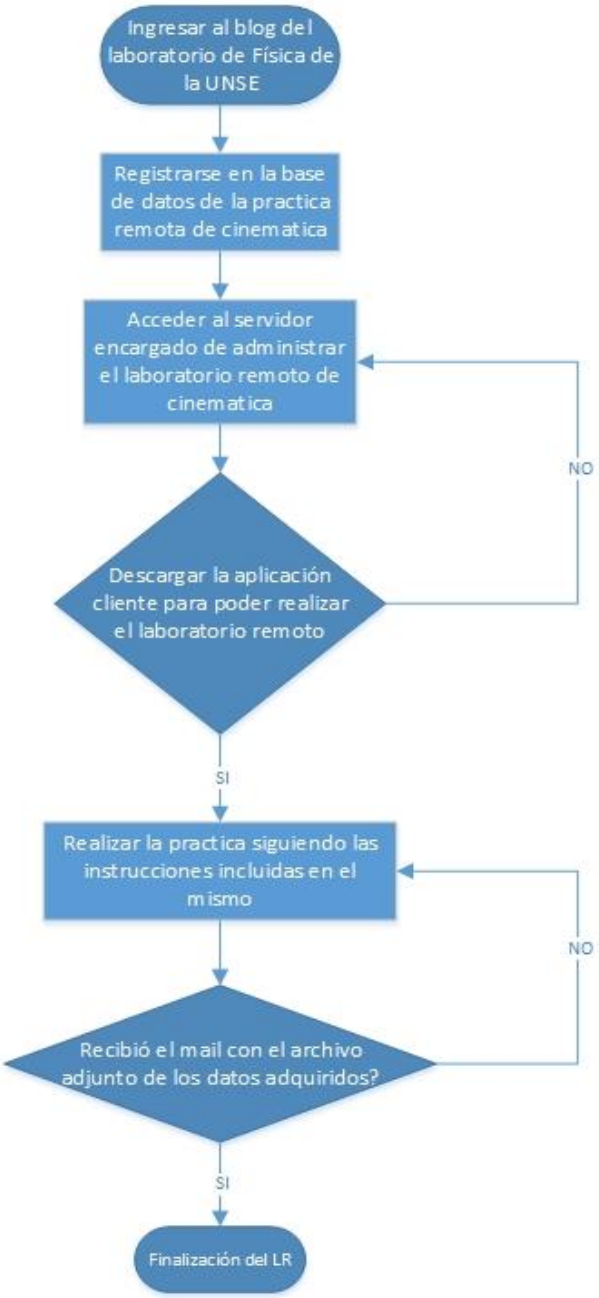


Figura 7: Diagrama de procedimientos para realizar el laboratorio remoto de cinemática lineal.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. RESULTADOS ALCANZADOS Y ESPERADOS

Si bien la implementación de la práctica y su puesta en funcionamiento a nivel piloto, a la fecha (1/6/16), está próximo a completarse, aún falta su implementación con un curso de alumnos inscriptos en el laboratorio en forma regular. Esto está previsto para el transcurso del segundo semestre de 2016.

Para el acceso desde el exterior de la UNSE a la PC asociada a la práctica, que se ubica físicamente en el Laboratorio de Física de La Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías de la UNSE, se solicitaron dos direcciones IP y dos puestos específicos. Uno para el ordenador propiamente dicho y otro para la cámara IP. Estos puertos, una vez asignados ya quedaron para ser usados en la implementación de futuras prácticas.

Se espera que en el próximo semestre los estudiantes del curso de Física I de las carreras de Ingeniería de la Facultad tengan a su disposición una nueva opción para efectuar esta práctica permitiendo el acceso más versátil en el tiempo, ampliando la lista de experimentos posibles.

5. CONCLUSIONES

El proceso efectuado fue alentador ya que permitió sentar las bases para un laboratorio remoto que con el tiempo incluya otras prácticas de física básica.

Fue evidente desde el comienzo que remotizar experimentos en los que las mediciones sean de movimientos representarían un desafío respecto de aquellas en las que solo se midan magnitudes eléctricas.

Sin embargo, se puso en evidencia que la utilización de los sensores ultrasónicos es una alternativa posible y relativamente económica para este tipo particular de experimentos en donde el movimiento es lineal.

Otro elemento que mostró su importancia en cuanto a la interactividad del estudiante con los dispositivos físicos fue la cámara IP, ya que a través de ella la percepción de lo que sucede es más cercana y permite detectar rápidamente si algo no está funcionando como se espera para dar un aviso.

Teniendo en cuenta que las prácticas remotas para el estudio de ciencias son una tendencia mundial, consideramos que estamos dando los primeros pasos haciendo uso de elementos que se encuentran accesibles y son de libre uso.

6. REFERENCIAS

[1] Costa-Castelló R., Vallés M., Jiménez L. M., Díaz-Guerra L., Valera A., Puerto R. - Integración de dispositivos físicos en un laboratorio remoto de control mediante diferentes plataformas: Labview, Matlab y C/C++ - Revista Iberoamericana de Automática e Ingeniería Industrial – Vol. 7, Núm.1, pp.23-34 - 2010

[2] M.I. Alberto Pedro Lorandi Medina, M.I. Guillermo Hermida Saba , M.S.I. José Hernández Silva, M.C. Enrique Ladrón de Guevara Durán - Los Laboratorios Virtuales y Laboratorios Remotos en la Enseñanza de la Ingeniería, Revista Internacional de Educación en Ingeniería – Vol. 4 - 2011.

[3] Invitación a Facultades de CONFEDI para participar del Proyecto Erasmus VISIR+. – Consejo Federal de Decanos de Ingeniería República Argentina – 2016
http://www.frn.utn.edu.ar/noticias/Convocatoria%20Participacion%20ERASMUS%20VISIR+%20-%20CONFEDI%202016.pdf

[4] Tecnoedu – Conjunto para estudios de dinámica lineal con pista de 2.2 m – 2016 http://tecnoedu.com/Pasco/ME9452A.php

[5] ECDA – El cajón de ARDUINO. Tutorial: Sensores ultrasónicos HC-SR04, 2014 http://elcajondeardu.blogspot.com.ar/2014/03/tutorial-sensor-ultrasonidos-hc-sr04.html

[6] IP Wireless / Wired Camera – IP Camera Users Manual (For Windows OS).

[7] Laboratorio de Física FCEyT – UNSE. http://labfisicafceyt-unse-crjuarez.blogspot.com.ar/

[8] Labview 7.1. Programación gráfica para el control de instrumentación.- Antoni M. L., Del Rio Fernández J. – Edit.: Paraninfo, ISBN 13: 9788497323918; ISBN 10: 8497322912 - 2005

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO DEFINITIVO DE UN ACTUADOR ELECTROMECÁNICO DE CONTROL DE VECTOR EMPUJE PARA VEHÍCULOS LANZADORES CON TOBERA FLEXIBLE

Esteban A. Dutto[1-3], Javier E. Salomone[1-2], Augusto Romero Onco[2], Santiago Lagier[1-3], Walter J. D. Cova[1-4], Jorge E. Jazni[1-2] y Juan P. Pedroni[1-5]

[1]Departamento Sistemas Electromecánicos, CIA-DGID-FAA
[2]Departamento de Mecánica GIDMA– UTN-FRC
[3]Departamento de Máquinas de FCEFyN, UNC
[4] Grupo GPS – UTN-FRLR
[5]Departamento de Electrónica de FCEFyN, UNC
jsalomone@scdt.frc.utn.edu.ar

RESUMEN

En los vehículos lanzadores se requiere de un sistema de control de dirección del vector de empuje (TVC) que permita desarrollar un vuelo a lo largo de una trayectoria programada, así como también compensar las perturbaciones que se presenten durante la fase propulsiva. Existen distintos mecanismos para lograr este objetivo, siendo uno de los más utilizados el basado en rotar la dirección de la tobera de empuje. En el caso de combustibles sólidos, la tobera incluye una junta flexible conformada mediante la unión de un elastómero con aros de acero que posibilita ajustar la orientación del eje de empuje, mediante un actuador lineal montado de manera conveniente entre la tobera y la estructura del vehículo, el que provoca la deformación elástica de la junta. En este trabajo se presenta el desarrollo definitivo de un actuador electromecánico (AEM), basado en tecnología de un motor eléctrico brushless, para conformar el sistema de control de orientación de una tobera flexible. Dichas toberas imponen fuertes requerimientos operativos a los sistemas de actuación, debido a los elevados valores de rigidez y rozamiento que presentan.

En lo metodológico, el diseño definitivo del actuador se realizó partiendo de los requerimientos impuestos a sistemas de estas características, incorporando las modificaciones correspondientes luego de haber realizado las revisiones sobre el diseño preliminar. En base a ello se calibraron modelos matemáticos de acuerdo a modelos constitutivos ajustados para determinar, en situaciones cinemáticas críticas, la potencia de actuación máxima requerida.

Los resultados obtenidos tras la selección de componentes electromecánicos comerciales, condujeron al diseño final del conjunto actuador y elementos de sensado. El trabajo concluye con la presentación del esquema de la arquitectura tentativa de control.

***Palabras Clave*:** *Actuador brushless, Combustible sólido, Tobera flexible.*

1. Introducción

Los actuadores electromecánicos de altas prestaciones, basados en los avances tecnológicos de los materiales magnéticos, de la electrónica de potencia y de la mejora del rendimiento energético de las baterías, constituyen una alternativa viable respecto de los actuadores electro hidráulicos que se han venido empleado en vehículos espaciales [1-3]. A continuación se presentará el diseño definitivo de un actuador electromecánico a ser empleado para la orientación de la tobera flexible de un vehículo lanzador, cuyo diseño preliminar se discutiera en [4].

En la Figura 1 se puede observar como a partir del direccionamiento del vector empuje se pueden lograr correcciones en la dirección del lanzador. Para lograr el direccionamiento del vector de empuje se utilizan toberas tanto pivotantes como flexibles dependiendo del combustible utilizado, y un sistema de actuación como el que se muestra en la Figura 2.

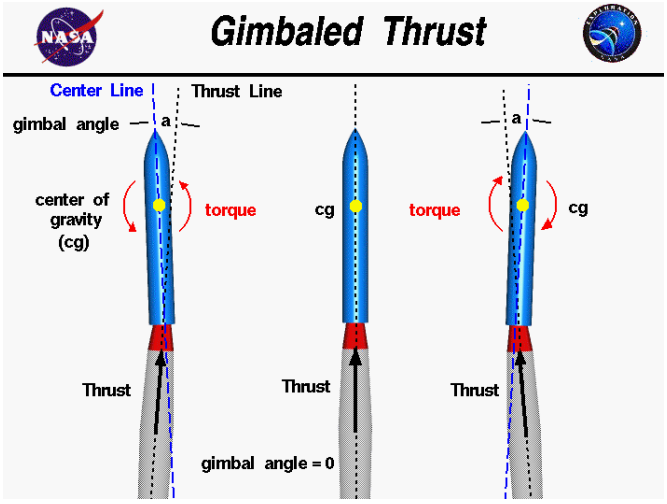


Figura 1 – Principio de funcionamiento del control de dirección mediante el control de empuje (Extraído de página web de NASA).

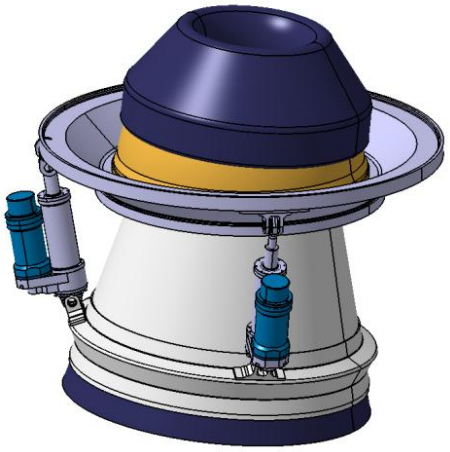


Figura 2 – Sistema de Actuación montado en una tobera flexible.

La Figura 2 muestra la disposición que poseen los actuadores de un sistema de actuación sobre una tobera flexible, particularmente aquí con una pequeña deflexión con respecto al eje longitudinal del lanzador. Los planos de acción de los actuadores se encuentran rotados 90º con respecto al eje longitudinal del lanzador para poder lograr correcciones de forma independiente uno del otro. Así mismo la dirección de actuación de los mismos se encuentra inclinada con respecto a la sección frontal del lanzador para minimizar el volumen a ocupar por su montaje.

El actuador tratado en [4] utiliza un motor brushless como efector primario y un tren de engranajes que reduce velocidades y transmite el movimiento rotatorio hacia un tornillo de bolas recirculantes, que transforma el movimiento de rotación en traslación. Varios

ISBN: 978-987-1676-63-7

componentes y subconjuntos críticos se calculan y dimensionan en las siguientes páginas. En la Figura 3 y Figura 4 se muestran el conjunto actuador y sus partes fundamentales.

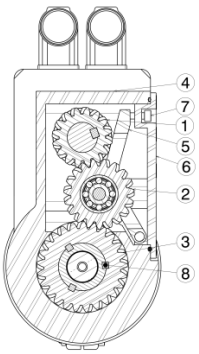


Figura 3 - Corte Caja Reductora.

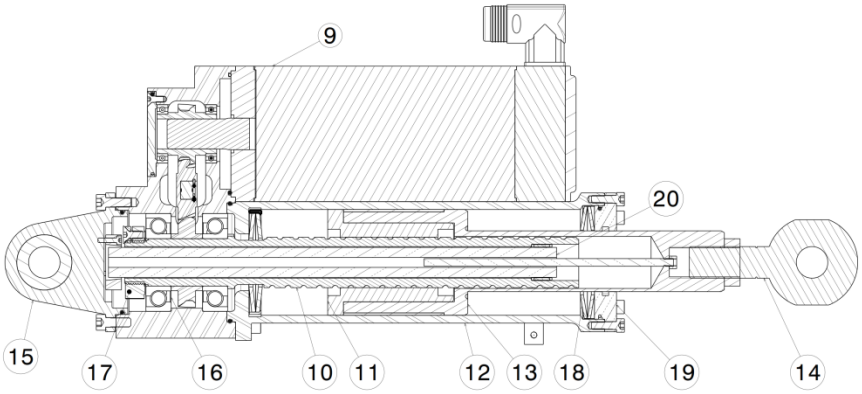


Figura 4 - Corte Longitudinal del Actuador.

Tabla 1 – Principales componentes del actuador.

ITEM	Nombre	ITEM	Nombre
1	Engranaje Conductor	11	Tuerca Tornillo de Bolas recirculante
2	Engranaje Intermediario	12	Cilindro
3	Engranaje Conducido	13	Embolo
4	Carcaza	14	Extremo Articulado
5	Ballesta	15	Toma articulada
6	Tapa Carcaza	16	Rodamientos de CA
7	Tornillo de Ajuste	17	Tuerca de Precarga
8	Chaveta	18	Resorte Platillo
9	Motor ITT-MDM 5000-0854	19	Tapa antirotativa
10	Tornillo de Bolas recirculante 32x10	20	LVDT

2. Determinación de la fuerza máxima de actuación

Haciendo referencia a la Fig. 3, la fuerza máxima de actuación puede ser calculada de la siguiente manera

ISBN: 978-987-1676-63-7

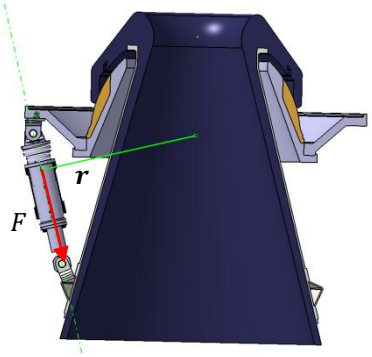


Figura 5 – Sistema Tobera Flexible – Actuador.

$$F\,r = C_m\,i_{tot} \quad \textbf{(1)}$$

Donde F es la máxima fuerza que puede realizar el actuador, r es la distancia mínima desde el punto de pivot de la tobera hacia la recta de acción de la fuerza de actuación e i_{tot} es la relación de transmisión total determinada en [4].

Con los siguientes datos

$$r = 0{,}366\,m \quad C_m = 20{,}4\,Nm \quad i_{tot} = 385 \quad \textbf{(2)}$$

La fuerza máxima es

$$F = 21460\,N = 2187\,kg \quad \textbf{(3)}$$

3. Descomposición de fuerzas en la caja de engranajes

Para determinar la carga sobre apoyos y dimensionar o verificar el tamaño de los dientes del tren de engranajes es necesario poder determinar las cargas actuantes.

Se puede determinar las componentes de las fuerzas en direcciones tangenciales, axiales y radiales a la rueda dentada. Dichos valores de fuerzas valen para todos los pares de ruedas dentadas en contacto.

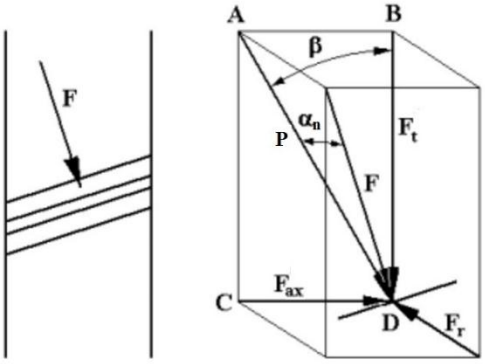


Figura 6 - Descomposición de fuerzas en un diente de engranaje.

$$P = F\cos\alpha_n\,, \quad Ft = P\cos\beta = F\cos\alpha_n\,\cos\beta\,,$$
$$Fr = F\,sen\,\alpha_n, \quad Fa = P\,sen\,\beta = F\cos\alpha_n\,sen\,\beta\,, \quad \textbf{(4)}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Siendo F la fuerza total que se transite en el par de ruedas dentadas. Sabemos que es posible obtener Ft a partir del momento torsor del motor aplicada a la rueda dentada acoplada directamente a él de la siguiente manera

$$Mt = Ft\, Rp1 \quad \textbf{(5)}$$

Siendo $Rp1$ el radio primitivo de la rueda dentada acoplada directamente al motor llamada rueda 1. A partir de la anterior expresión es posible calcular las restantes componentes de la fuerza total.

En el diseño se plantearon los siguientes valores de ángulos:

$$\alpha_n = 25° \quad \beta = 19{,}6° \quad \textbf{(6)}$$

Y tomando para el momento torsor Mt el máximo que puede erogar el motor se puede obtener

$$Mt = 20{,}4\ Nm$$
$$F = 1406.8\ N, \quad Ft = 1201.1\ N, \quad Fr = 594.55\ N \quad Fa = 427.7\ N, \quad \textbf{(7)}$$

4. Dimensionamiento de las ruedas dentadas del tren de engranajes

La determinación del tamaño correcto de los engranajes fue orientado bajo la premisa de maximizar la aceleración del sistema bajo una cupla motriz constante.

Si se analiza el tren de engranajes como un sistema separado, para cumplir con el objetivo anterior es necesario encontrar

$$\min\left(\sum_{i}^{n} J_{eq_i}\right) \quad \textbf{(8)}$$

donde J_{eq_i} es el momento de inercia másico equivalente de cada rueda dentada referida a una cupla motriz entrante dada, que para nuestro sistema tomando como cupla de referencia la cupla motriz del motor

$$\sum_{i}^{n} J_{eq_i} = J_{eq_1} + J_{eq_2} + J_{eq_3} = J_1 + J_2\, i_{21}^2 + J_3\, i_{31}^2 \quad \textbf{(9)}$$

donde J_i es el momento de inercia másico de la rueda dentada con respecto a su centro de masa e i_{ij} es la relación de transmisión de la rueda dentada i a la rueda dentada j.

Se puede expresar

$$J_i = m_i \frac{\pi\, d_i^4}{32} \quad i_{ij} = \frac{R_{pj}}{R_{pi}} \quad \textbf{(10)}$$

Además se pueden plantear las siguientes ecuaciones de restricción tales como la mínima cantidad de dientes para no tener interferencia geométrica

$$z_{pmin} = \frac{2\,k}{\sin^2(\alpha_n)} * \cos(\beta) \quad \textbf{(11)}$$

En [4] se determinó la potencia necesaria del motor que mueve este tren de engranajes, y habiendo seleccionado el modelo ITT MDM 5000-0854 cuya sección frontal es de 85mm*85mm, se decidió que el tren de engranajes debe estar contenido en una caja de no mayor ancho que el ancho de la toma del motor. Eso se puede parametrizar de la siguiente manera

$$(Rp1 + Rp2)\; sen(\theta_1) < Ancho_{motor} = 85\; mm \quad \textbf{(12)}$$

La distancia entre centros también es fija y de valor

$$I = 81.4\; mm \quad \textbf{(13)}$$

Estas últimas dos restricciones fueron impuestas bajo el criterio de que el actuador sea lo más compacto posible.

El valor de la última restricción, resulto luego de un estudio en el cual se determinó el tamaño del tornillo necesario para transmitir la potencia y fuerza requeridas, con dicho tornillo se pueden determinar las dimensiones tecnológicamente posibles de la tuerca y tomando un espesor de pared apropiado del cilindro conductor de la tuerca, podemos estimar una distancia entre centros adecuada.

Por último en [4] se determinó que la relación de transmisión optima i_{31} debe ser 1,69, pero para hacer el diseño más flexible se prevee que no supere este valor y que no esté por debajo del valor 1,5.

Por último nuestro problema de optimización queda formalizado de la siguiente manera

Encuéntrese

$$\min(J_1 + J_2\, i_{21}^2 + J_3\, i_{31}^2) \quad \textbf{(14)}$$

tal que

$$z_{pmin} - z_p \leq 0 \quad \textbf{(15)}$$

$$(Rp1 + Rp2)\; sen(\theta_1) - Ancho_{motor} \leq 0 \quad \textbf{(16)}$$

$$I - 81.4\; mm = 0 \quad \textbf{(17)}$$

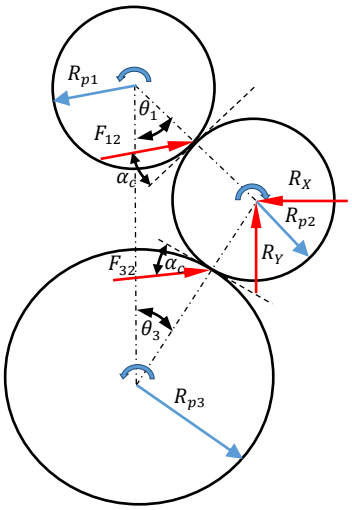
$$i_{31} - 1.69 \leq 0 \quad \textbf{(18)}$$

$$1.5 - i_{31} \leq 0 \quad \textbf{(19)}$$

5. Determinación de las fuerzas actuantes sobre engranaje intermediario

Se procederá a determinar las fuerzas actuantes en la rueda dentada intermediaria.

ISBN: 978-987-1676-63-7



$$F_{12}\,cos(\alpha_c - \theta_1) + F_{32}\,cos(\alpha_c - \theta_3) - R_X = 0$$

$$F_{32}\,sen(\alpha_c - \theta_3) + F_{32}\,sen(\alpha_c - \theta_1) + R_Y = 0$$

$$\left(R_{p3} + R_{p2}\right)\,sen(\theta_3) = \left(R_{p1} + R_{p2}\right)sen(\theta_1) \qquad \textbf{(20)}$$

$$I = \left(R_{p1} + R_{p2}\right)cos(\theta_1) + \left(R_{p3} + R_{p2}\right)cos(\theta_3)$$

Figura 7 - Diagrama de montaje del tren de engranajes.

En base al esquema de la Figura 7 se elaboró el sistema de ecuaciones (20).

En donde F_{12} y F_{32} son las componentes de las fuerzas en el plano perpendicular al eje de rotación de las ruedas dentadas, que realizan los engranajes 1 y 3 al engranaje intermediario respectivamente. R_X y R_Y son las reacciones que debe generar el apoyo del engranaje intermediario. I es la distancia entre ejes del engranaje 1 hasta el engranaje 2. α_c es el ángulo de presión circunferencial.

Se puede calcular α_c de la siguiente manera:

$$\tan \alpha_c = \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \qquad \textbf{(21)}$$

También vemos que $F_{12} = F_{32}$ ya que

$$F_{12} = \frac{Ft}{\cos \alpha_n \ \cos \beta}, \quad F_{32} = \frac{Ft}{\cos \alpha_n \ \cos \beta}, \qquad \textbf{(22)}$$

La distancia entre centros esta impuesta por condición de diseño a $I = 80.4\ mm$. Los siguientes son los radios primitivos de cada engranaje:

$$R_{p1} = 16{,}984\ mm \quad R_{p2} = 20{,}169\ mm \quad R_{p3} = 26.538\ mm \qquad \textbf{(23)}$$

Con estos datos podemos resolver el sistema de 4 ecuaciones no lineales y obtener los siguientes resultados:

$$\theta_1 = 15{,}63° \quad \theta_3 = 12{,}38° \quad R_X = 2747{,}6\ [N] \quad R_Y = 78[N] \qquad \textbf{(24)}$$

El sentido R_X es hacia la izquierda y el de R_y hacia arriba.

6. Verificación de la resistencia de los engranajes

Se utilizará el criterio de Barth para la verificación de los dientes de los engranajes el cual contempla efectos dinámicos debido a defectos en la fabricación del engranaje.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El método propone

$$\sigma = \frac{K_v\, Ft}{B\, m\, Y} \quad \textbf{(25)}$$

Tal que Ft es la fuerza tangencial que incide sobre el diente, B el ancho de la rueda dentada, m el módulo normal, Y el factor de Lewis y K_v el factor dinámico que se escribe como

$$K_v = \frac{3.56 + \sqrt{v}}{3.56} \quad \textbf{(26)}$$

el cual está formulado para un perfil generado con fresa madre o cepillado, si el método de elaboración fuera otro el factor cambia, y en donde v es la velocidad periférica en [m/s] dada por la velocidad angular y el radio primitivo de la rueda dentada

$$v = \omega\, R_p \quad \textbf{(27)}$$

Si se introducen las cargas en $[N]$, las medidas geométricas en $[mm]$ y las velocidades en [m/s] la norma AGMA asegura el resultado de tensiones en [MPa]

Se verificará el engranaje de menor tamaño.

$$F = 1201\ N \quad B = 11\ mm \quad m = 2\ mm \quad \omega_{1max} = 209.43\ [rad/s] \quad Y = 0.296 \quad v = 3.56\ [m/s] \quad \textbf{(28)}$$

Por ende

$$K_v = 1.529 \quad \sigma = 282{,}1\ [MPa] \quad \textbf{(29)}$$

que para una tensión de fluencia del aluminio 7075-T6 de $441\ [MPa]$ nos da un coeficiente de seguridad de

$$n = \frac{441}{282{,}1} = 1.59 \quad \textbf{(30)}$$

7. Esquema de Control

En la Figura 8 se presenta el diagrama de bloques del sistema de control de vector de empuje propuesto.

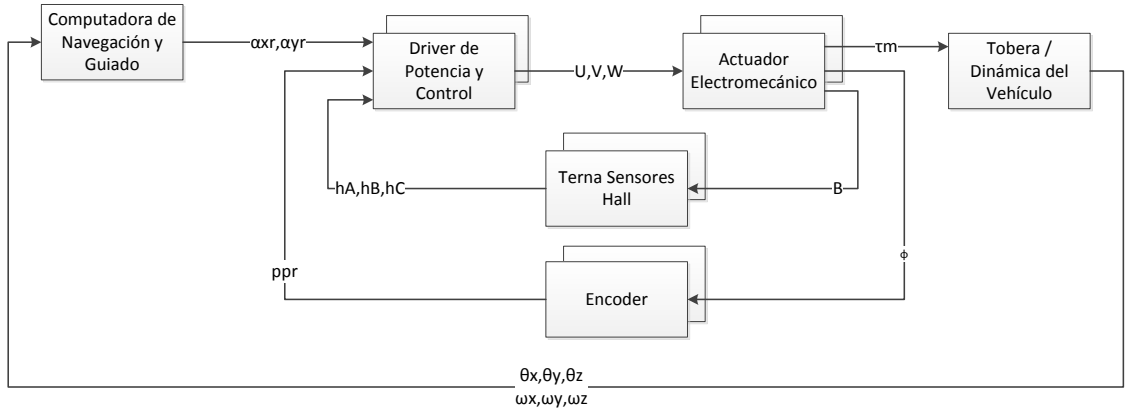


Figura 8 - Diagrama de Bloques del Sistema de Control

La Computadora de Navegación y Guiado envía a los drivers de potencia las señales de referencia α_{xr} y α_{yr}, que conforman la actitud que debe adoptar la tobera (en coordenadas de cuerpo) para que el vehículo en su conjunto siga la trayectoria de vuelo planificada. El estudio de la trayectoria angular del eje de la tobera que cancela en tiempo mínimo los errores de orientación emergentes ($\varepsilon_x = \alpha_{xr} - \alpha_x$ y $\varepsilon_y = \alpha_{yr} - \alpha_y$) ha sido analizada en sus aspectos cinemáticos y dinámicos en [5] y [6], habiéndose determinado asimismo las leyes de movimiento que han de seguir las elongaciones lineales de los actuadores, las que se programan como algoritmo embebido en el driver de cada uno de los motores, para cumplir con los requerimientos de navegación.

Con toda esta información se controlan, mediante modulación de ancho de pulso, las tensiones trifásicas U,V,W de alimentación del motor brushless de cada actuador. Una terna de sensores Hall fija al estator del motor mide la posición angular del rotor en base a los cambios en el campo magnético producto de su rotación. Esta información es usada por el driver para sincronizar adecuadamente la conmutación de las tensiones U,V,W.

Cada motor lleva asimismo asociado un encoder que transforma la posición angular del rotor φ en pulsos por revolución (*ppr*). Esta información es usada como señal de realimentación transformándose en α_x y α_y usando para ello la información de la cinemática disponible.

Los movimientos de los actuadores cambian la orientación del vector empuje, modificándose con ello la actitud angular de vuelo, $(\theta_x, \theta_y, \theta_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$. Como consecuencia de las características aerodinámicas del vehículo y su interacción con la atmósfera y la gravedad terrestre, se modifica la trayectoria de vuelo. Una Unidad de Mediciones Inerciales (UMI) sensa las aceleraciones lineales y las velocidades angulares según los tres ejes del vehículo, cuyo procesamiento en la Computadora de Navegación y Guiado es empleada para generar las nuevas referencias para los ángulos de orientación de la tobera.

Se utiliza un driver por canal de actuación, ambos programados con el mismo código, donde con cada uno de ellos realiza la totalidad de los cálculos previos pero solo ejecuta la parte correspondiente al grado de libertad que comanda.

Se implementará una ley de control de posición PD. El diagrama de bloques del mismo (para un actuador) se presenta a continuación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

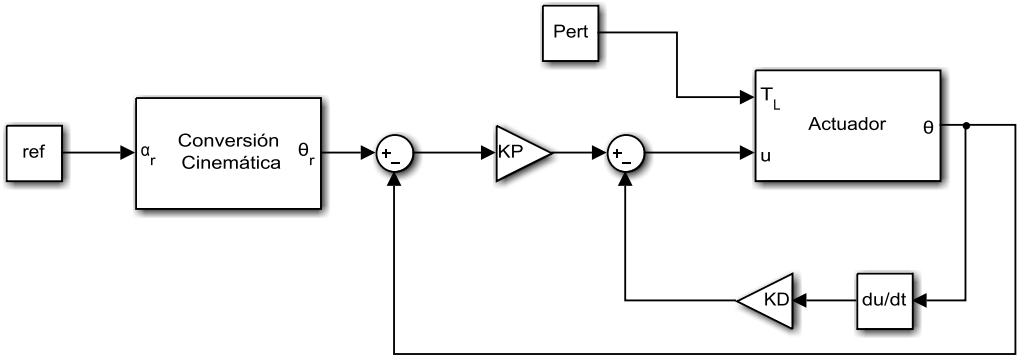


Figura 9: Diagrama de Bloques de la Ley de Control

El comportamiento del lazo cerrado de este sistema se puede modelar mediante la siguiente ecuación:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + K(\theta)\theta + T_P = K_P e(\theta) - K_D\dot{\theta} \quad \textbf{(31)}$$

Donde el término a la izquierda de la ecuación representa el modelo dinámico clásico del actuador, mientras que el término a la derecha la ley de control. En esta ecuación, $M(\theta)$ es la matriz de inercia, $C(\theta,\dot{\theta})$ representa la fricción, $K(\theta)$ la rigidez de la junta y el efecto de la gravedad, y T_P la cupla perturbadora. A su vez, $\ddot{\theta}$, $\dot{\theta}$ y θ representan aceleración angular, velocidad angular y ángulo rotado del eje del motor. También $e(\theta) = \theta_r - \theta$.

Aplicando el método directo del Lyapunov [7] se puede demostrar que el sistema a lazo cerrado es estable siempre y cuando K_P y K_D sean definidos positivos. Estos parámetros se ajustarán para lograr la respuesta temporal óptima.

8. Conclusión

Se ha presentado el diseño final de actuador electromecánico de 2000W con sus respectivas partes componentes. Se ha dimensionado y verificado sus partes componentes críticas.

En cuanto al tren de engranajes se ha logrado obtener un diseño que responde a un sistema dinámico con mínima inercia y resistencia adecuada, respondiendo a las restricciones geométricas impuestas.

Por último se ha presentado un esquema de la arquitectura tentativa de control en donde se indican los componentes participantes y las rutinas de software embebido que deben ser implementadas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

9. REFERENCIAS

[1] Rae Ann Weir , John R. Cowan: *Development And Test Of Electromechanical Actuators For Thrust Vector Control*. AIAA, SAE, ASME, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 29th, Monterey, CA, June 28-30, 1993, 8 p.

[2] Mark A. Davis -Moog Inc. *Electromechanical actuation for launch vechicles*. 37th AIAA / ASME / SAE/ASEE Joint Propulsion Conference - Salt Lake City, Utah -July 10, 2001

[3] Rodriguez Francis D.: *Electromechanical Motion Control Systems in Spacecraft Applications*. Space 2006 Conference, 19-21 September 2006, San Jose, California. AIAA 2006-7291.

[4] Santiago Lagier, Javier E. Salomone, Walter J. D. Cova , Jorge E. Jazni , Augusto Romero Onco, Esteban A. Dutto y Juan P. Pedroni: *Actuador electromecánico para control de vector empuje en lanzadores – Diseño preliminar*. *REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES,* Vol. III, nº 1 (Marzo 2016): 37-41.

[5] Cova, W., Jazni, J., Naguil, J., Pedroni, J., Modesti, M.: *Accionamiento cruzado de una tobera, consideraciones cinemáticas y ley de control*. Publicado en Anales del IV Congreso de Tecnología Espacial. Buenos Aires, 22 al 24 de mayo de 2007.

[6] J. Naguil, W.J.D. Cova, J.P. Pedroni, J.E. Jazni y M. R. Modesti: *Aspectos cinemáticos y dinámicos del control de una tobera móvil para vehículos espaciales*. Publicado en *MECÁNICA COMPUTACIONAL, Vol. XXV1,* Sergio A. Elaskar y otros (editores), Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Córdoba, 2007. Pág. 3205 y ss. ISSN 1666-6070. XVI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2007) y I Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial (MACI 2007), Córdoba, 2 al 5 de Octubre de 2007.

[7] R. Kelly, V. Santibáñez: *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*, Pearson Prentice Hall, 2003. ISBN: 84-205-3831-0

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA AUTOMÁTICO DE MICROMAQUINADO CON LÁSERES DE NANOSEGUNDOS

M.Nonaka[1], H.Ferrero[1], M.Agüero[1,2] y M.Kovalsky[1,3]

[1] Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (CEILAP), Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF)
J. B. de la Salle 4397 (B1603ALO) Villa Martelli, Pcia. de Buenos Aires –Argentina
[2] Investigadora Asistente, CONICET
[3] Investigador Adjunto, CONICET
correo-e: mnonaka@citedef.gob.ar, mkovalsky@citedef.gob.ar

RESUMEN

El procesado de materiales con láser es un campo en franca expansión, que captura la atención de científicos, ingenieros e industria por igual. El aspecto más interesante a nivel científico es comprender los mecanismos fundamentales de la interacción entre la radiación y la materia. A nivel tecnológico se presenta como una herramienta que no solo hace innumerable cantidad de procesos más baratos, rápidos, limpios y precisos, sino que abre la posibilidad de crear nuevos métodos simplemente imposibles de llevar a cabo por otras vías.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema que permite la automatización del proceso de micromaquinado en 3 dimensiones, al controlar el movimiento en el plano x-y para lograr el diseño deseado y en el eje z, para determinar la profundidad, tamaño y calidad de la ablación.

Para lograr este objetivo, se diseñó un software de control y se implementó un sistema motorizado bajo la plataforma Arduino. El láser, de construcción propia, es un Nd:YAG bombeado por diodos con Q - switch activo por modulador acusto óptico.

Para determinar los parámetros óptimos se realizaron series de ablaciones sobre obleas de silicio pulidas espejo. Las variables a optimizar fueron la fluencia (energía por unidad de área), la frecuencia de repetición y la duración de los pulsos, que se controlan desde el software. Las muestras fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido, lo que permite cuantificar la calidad del micromaquinado. Con esta información se desarrollaron algoritmos con los parámetros elegidos para cada tipo de ablación.

Este sistema, íntegramente de desarrollo propio, permite, al automatizar el micromaquinado, ser empleado por usuarios no especializados fuera del laboratorio, abriendo un amplio abanico de aplicaciones. Por otra parte se posiciona como una herramienta ideal para investigación en el maquinado de nuevos materiales.

Palabras Claves: Láser, Arduino, Automatización, Micromaquinado, Ablación.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de láseres para modificar la materia surgió prácticamente en forma simultánea con la aparición misma del láser. Con cada nuevo láser, surgieron también pruebas en el campo del maquinado. Así se fueron determinando las características necesarias para la mejor ablación en diferentes materiales. Hoy en día el consenso es que los pulsos ultracortos (en el rango de los femtosegundos) son los que producen los más precisos resultados, logrando estructuras bien definidas en tamaños tan pequeños como 100nm. La fuente más difundida de pulsos de femtosegundos es el láser de Ti: Zafiro. Para poder emplearlo en micromaquinado, además, requiere de al menos una etapa de amplificación. Esto hace que el sistema, más allá de ser extremadamente costoso, sea, aún en el caso de equipos comerciales de las más reconocidas firmas, muy delicados, sensibles e inestables. Por otra parte, los láseres con pulsos de nanosegundos son mucho menos costosos y al mismo tiempo robustos y compactos. De particular interés, sobre todo para difundir su empleo en la industria y en aplicaciones fuera del laboratorio, resulta estudiar la forma de optimizar la ablación con láseres de nanosegundos y determinar hasta qué punto estos láseres pueden sustituir con similares prestaciones al Ti:Zafiro. Para ello se realizaron experiencias de ablación de obleas de silicio modificando los parámetros del láser para determinar de qué forma cada uno influye en la calidad del maquinado.

En base a las experiencias realizadas, surgió la necesidad de implementar un sistema que permitiera la automatización de los diferentes dispositivos involucrados en el micromaquinado láser tanto para el control de la posición de la muestra, altura de la óptica de enfoque, el encendido y apagado del láser. Consecuentemente, no solo se desarrolló un software de automatización sino también se implementó la adaptación mecánica para motorizar el posicionador en donde se regula la óptica de enfoque y su hardware adicional para el control de corrientes del motor. La comunicación entre el motor y la PC, se realizó mediante una placa de desarrollo Arduino.

2. ENSAYOS EN LABORATORIO

2.1. Experimentos con obleas de Silicio

Para optimizar los parámetros de ablación se realizaron microagujeros sobre obleas de silicio pulidas espejo. En todos los casos la energía total depositada por el láser sobre la muestra se mantuvo constante. Las variables que se modificaron en cada experimento fueron la fluencia

ISBN: 978-987-1676-63-7

(energía por unidad de área), mediante la modificación de la posición del foco del haz láser sobre la muestra, la frecuencia de repetición y la duración de los pulsos, controladas desde el software. Las muestras fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido, lo que permite evaluar la calidad del agujero, determinando su diámetro, la definición de los bordes, la cantidad de residuos redepositados y midiendo la zona afectada por el calor o *heat affected zone,* HAZ. En estas experiencias se lograron agujeros bien definidos de 150 micrones de diámetro con pulsos de 1.7mJ y 70ns de duración. Con esta información se desarrollaron algoritmos con los parámetros elegidos para cada tipo de ablación.

2.2. Necesidad de implementar un sistema de automatización

A raíz de los experimentos en laboratorio, surgió la necesidad de desarrollar un sistema de automatización. Para lograrlo, se desarrolló un software que posibilita la coordinación de los dispositivos que se mencionan en la sección 3.2. Esta combinación de movimientos realiza un patrón de desplazamientos que se describe a continuación:

a) Desplaza la muestra a una posición ingresada por el usuario.

b) Varía la altura de la lente de enfoque un cierto valor ingresado por el operador.

c) Enciende el láser para micromaquinar la muestra y luego lo apaga.

d) Desplaza la muestra con el movimiento de la plataforma x-y al igual que el punto de enfoque. Es decir, cuando se vuelva a encender el láser, éste hará un agujero en otra posición. El desplazamiento es a lo largo de una línea recta.

e) Repite los pasos b, c y d hasta lograr el micromaquinado de los n agujeros micromaquinados por láser.

El desarrollo de este sistema automático de micromaquinado, no solo implicó el desarrollo del software, sino también de la adaptación mecánica (Sección 3.2.1) y la lógica de control para el posicionador de la óptica de enfoque. Este sistema proporciona una herramienta ideal para investigación en el maquinado de nuevos materiales a ser utilizados tanto en el campo científico como en la industria.

3. SISTEMA AUTOMÁTICO DE MICROMAQUINADO

3.1. Software de automatización

El software se desarrolló bajo C# en Visual Studio (Figura 1). Este posee un entorno visual, que permite que cualquier usuario sin conocimiento de programación pueda configurar los parámetros

ISBN: 978-987-1676-63-7

del arreglo experimental: la frecuencia de repetición, la ubicación de la muestra a micromaquinar, la altura de la óptica de enfoque, el encendido y el apagado del láser.

A continuación, se enumeran las características principales del software:

a) Movimiento relativo: el motor gira en un sentido (horario o anti horario) una cantidad de grados que se ingresan por teclado. Al realizar dicho movimiento angular, se efectúa un desplazamiento en el eje z.
b) Micromaquinado automático: realiza varios puntos de prueba a lo largo de una línea de una longitud dada. El eje z, se desplaza en cada tramo un cierto delta de longitud elegido por el usuario.
c) Calibración de escala: permite calibrar a cuantos pasos equivale 1mm en la escala del eje z. El usuario puede realizar varias mediciones y trabajar con el valor medio.

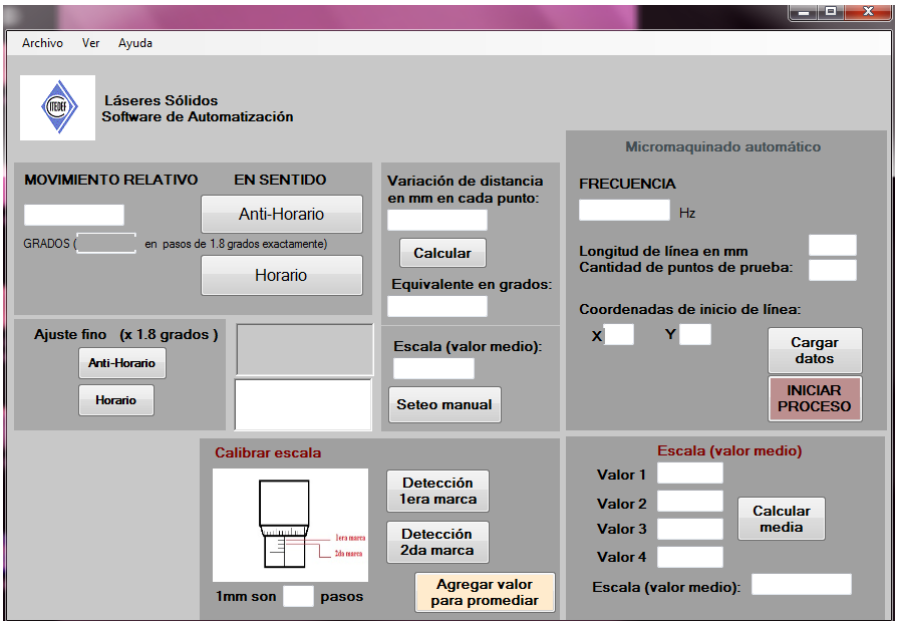


Figura 1: Software de automatización.

3.2. Control de dispositivos

En los diferentes ensayos, se efectuó el análisis de ablación por láser sobre diferentes muestras. Si bien el control de la plataforma motorizada x-y, en donde se ubicaron las muestras micromaquinadas, ya se encontraba automatizada por software, la óptica de enfoque no lo estaba y no se disponía de una aplicación que permitiera la coordinación de las distintas plataformas junto con el controlador de frecuencia.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para motorizar el posicionador en donde se encuentra la óptica de enfoque, se implementó una adaptación mecánica al micrómetro del mismo. De esta forma, en vez de variar en forma manual la altura de la lente, se logró realizarlo de manera controlada por un motor paso a paso (Figura 4).

Para el control en simultáneo de los dispositivos involucrados, se implementó un software de automatización (Sección 3.1) y un algoritmo de comunicación entre el Arduino y el motor.

En la figura 6, se muestra un esquema de las conexiones requeridas para la automatización del sistema. El software de automatización realiza su comunicación a través de dos puertos USB. Uno de los puertos USB, se encarga del envío y recepción de datos hacia el Arduino que los recibe y envía por su puerto serie (RX, TX). El Hardware para el control del motor paso a paso se encuentra conformado por la placa de desarrollo Arduino y un circuito integrado (SN754410) que permite controlar corrientes superiores a las del Arduino. Este último, excita las diferentes terminales del motor generando un movimiento angular que se transforma en traslacional por medio de la adaptación mecánica al posicionador. En cambio, el otro puerto USB, comanda la plataforma motorizada x-y.

3.2.1. Dispositivo de control para el eje z

Para la automatización de la óptica de enfoque que se encuentra en un posicionador manual se utilizó una placa de desarrollo Arduino, una adaptación mecánica y un motor paso a paso con un hardware adicional para el manejo de corrientes (Figura 3). El Arduino, se utiliza como interfaz de comunicación entre la PC y el motor.

El motor paso a paso bipolar que se empleó fue el FL39ST34-0306B con un ángulo de paso de1.8º. El diagrama de su cableado se muestra en la Figura 2, solo se utilizan los cables negro, verde, rojo y azul. Debido a que el motor paso a paso utiliza corrientes superiores a las que el Arduino puede administrar, se realizó un hardware adicional, que está compuesto por el integrado SN754410 que permite dirigir corrientes hasta 1A y voltajes desde 4.5V a 36V. Se conectaron los siguientes cables del motor a los pines del integrado: el cable rojo con el pin 3, el cable azul con el pin 7, el cable negro con el pin 14, el cable verde con el pin 11(Figura 3).

La placa de desarrollo Arduino, conecta sus pines digitales 8,9,10 y11 a los pines 2,7,10 y 15 del integrado SN754410.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El firmware desarrollado para el Arduino posibilita la comunicación entre la PC y el motor. El algoritmo consiste en recibir datos desde la PC. Estos, permiten indicar que instrucción debe ejecutar el motor:

1. Únicamente girar en sentido (horario o anti horario) una cierta cantidad de pasos. Los caracteres a recibir estarán compuestos por una etiqueta que define el sentido de giro del motor ('2'= horario o '1'=anti horario), seguido de la cantidad de pasos del motor y un carácter de fin ('n'). Por ejemplo, si se desea girar el motor unos 234 pasos en sentido horario, se recibirá por puerto serie los siguientes caracteres '2' '2' '3' '4' 'n'.

2. Girar en sentido (horario o anti horario) una cierta cantidad de pasos y luego de terminar el movimiento, dar orden de encendido del láser enviando por puerto serie la siguiente cadena de caracteres “laserr”. Para que se ejecute dicha instrucción, se debe haber recibido un carácter 'M' y luego, un caracter 'E'.

En cuanto a la adaptación mecánica al posicionador, consta de dos cuerpos cilíndricos concéntricos adaptados al eje del motor paso a paso (Figura 4). Al girar el motor, su movimiento angular se transforma en traslacional. Al rotar en sentido horario, la altura de la óptica de enfoque se incrementa. En cambio, en sentido anti-horario se decrementa.

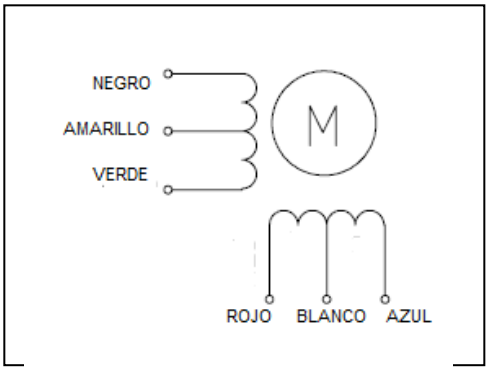


Figura 2: Colores de cables del motor.

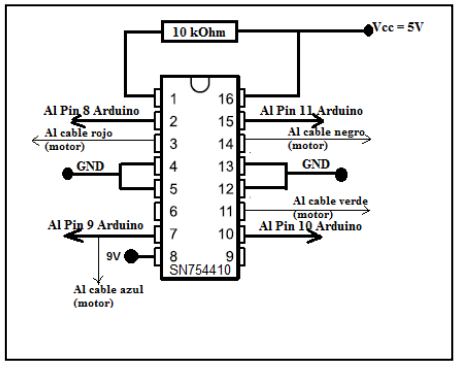


Figura 3: Conexiones del Integrado SN754410.

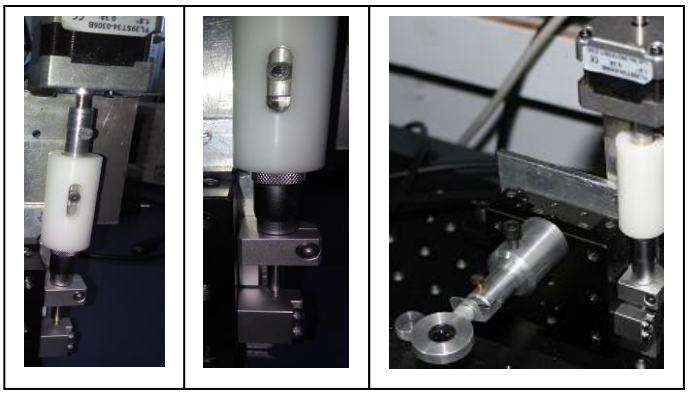


Figura 4: Adaptación mecánica al posicionador.

3.2.2 Dispositivo de control para los ejes x-y

Para la automatización de los ejes x-y, se utilizó una plataforma x-y motorizada Zaber de la serie T-LA (Figura 5) con las siguientes especificaciones: rango de 60mm; resolución de 0,1μm y repetibilidad <0,4μm para el movimiento en el plano.

3.2.2.1 Protocolo de comunicación de la plataforma x-y

Para controlar el movimiento x-y se utilizó una plataforma motorizada Zaber. La plataforma x-y posee un protocolo de comunicación RS232 (9600 baudios, sin handshaking, 8 bits de datos, sin paridad y un bit de stop). El formato de instrucción se compone por 6 bytes: el byte 1 refiere al dispositivo (si es el motor que controla el eje de las abscisas, el byte 1 es igual a 0, si es el que controla el de las ordenadas, el byte 1 es igual a 1. La plataforma admite el control de otro dispositivo externo, como por ejemplo un controlador de frecuencia, que se puede conectar al dispositivo, en este caso, el byte 1 es igual a 2); el byte 2 refiere al comando a aplicar (desplazar a una posición absoluta, relativa, etc.); del byte 3 al 6, corresponden al dato de 4 bytes en donde el byte menos significativo se guardará en el byte 3 y el más significativo en el byte 6 (en el caso de un desplazamiento, se guardan los 4 bytes del dato en unidades de microstep, 1 microstep = 0.09921875 μm; para el caso del controlador de frecuencias, se guardan los 4 bytes del dato de frecuencia).

ISBN: 978-987-1676-63-7

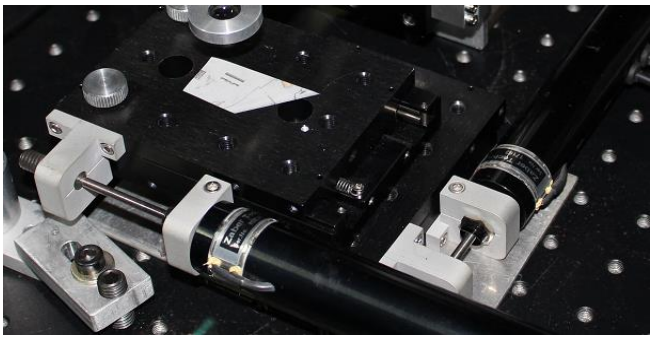


Figura 5: Plataforma motorizada x-y.

3.2.3 Dispositivo de control para la frecuencia

El controlador de frecuencia permite el control del modulador del láser. Su control, habilita y deshabilita al láser durante el micromaquinado de la muestra. Dicho controlador se acopla a la salida externa de la plataforma x-y motorizado. Para poder comandarla, se trata igual que el protocolo de comunicación descripto en la sección 3.2.2.1. El controlador de frecuencia se desactiva a un valor de 0Hz y se lo activa al valor de la frecuencia de repetición deseado, por ejemplo, a 1000 Hz.

ISBN: 978-987-1676-63-7

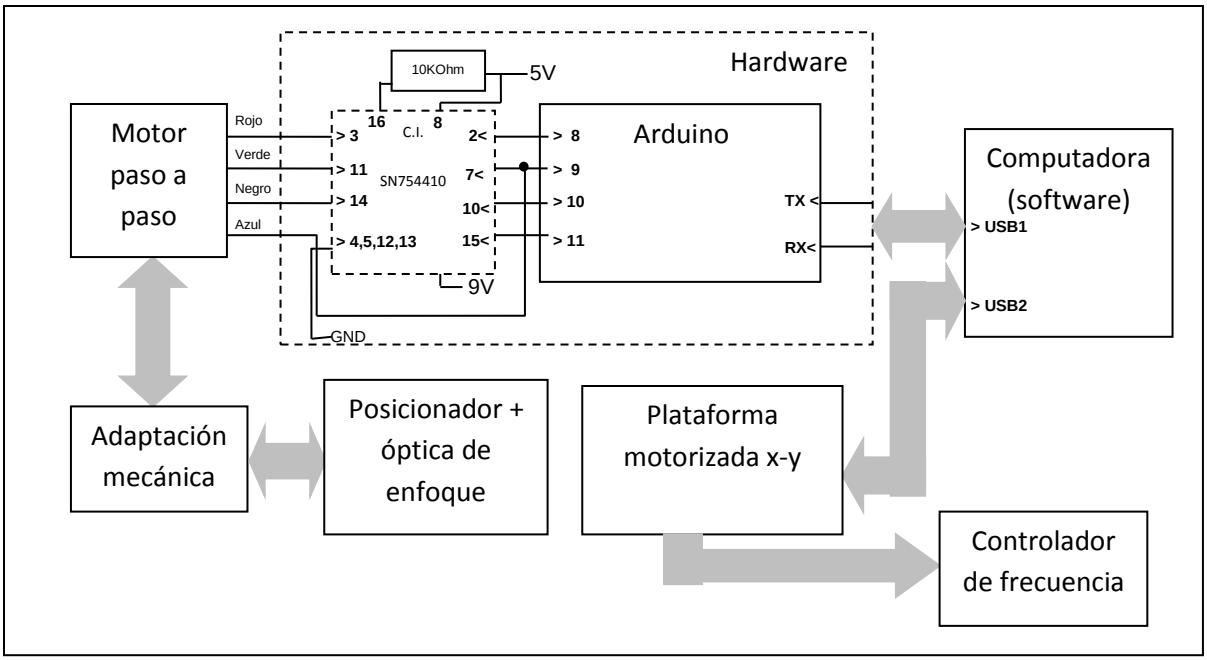


Figura 6: Esquema de conexiones de la automatización del sistema.

4. CONCLUSIONES

El sistema de automatización se realizó en base a requerimientos que surgieron durante la ablación de muestras micromaquinadas por láser. La necesidad de implementar un software orientado a objetos fácil de utilizar por el usuario que pudiera realizar la coordinación de movimientos es esencial a la hora de realizar experiencias de laboratorio. Debido a que el posicionador en donde se ubica la lente de enfoque no se encontraba motorizada, se le acopló un motor paso a paso de forma tal que su movimiento angular se transformara en traslacional. Su movimiento se pudo controlar por medio de una placa de desarrollo Arduino, la cual, se programó con un algoritmo que se puede replicar para automatizar posicionadores. Con este sistema automatizado se prevé realizar más experiencias para determinar los parámetros óptimos de micromaquinado en diversos materiales de interés en la industria.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS

[1] John C. Ion, “Laser Processing of Engineering Materials”, Elsevier Butterworth Henemann, (2005).

[2] J.W. Warren, j. Adams, H. Molle “Arduino Robotics”, 2011thed., EE.UU. (2011).

[3] W. Koechner, “Solid State Laser Engineering”, Springer Science-Business Media 1ra ed., EE.UU. (2006).

[4] https://www.arduino.cc/

[5] http://www.zaber.com/documents/T-LA-manual.pdf

[6] http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn754410.pdf

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Sr. Luis Fidalgo por el pulido de las obleas de silicio y al Sr. Juan José Luque por el mecanizado de piezas para el movimiento del eje Z. Este trabajo recibió el apoyo de los subsidios PIDDEF 01/14 del Ministerio de Defensa y PIP 077 - 2011 del CONICET.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ROBOT DE EXPLORACIÓN DE CAÑOS PARA ALCANTARILLA "DESARROLLO COMO SOLUCIÓN A UN PROBLEMA LOCAL"

J. E. Ordoñez, F. A. Meza, C. E. Gamboa y C. -W. Sánchez

Grupo de Investigación KIMSA, Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium
Cra. 122 No. 12 – 459, Santiago de Cali, Colombia
correo-e: jordonez@unicatolica.edu.co

RESUMEN

Problemas en los ductos de alcantarillado, como conexiones deficientes y fraudulentas, daños y desgaste de las mismas representan un problema para las ciudades dado que provocan filtraciones que desestabilizan el suelo y rompen las carreteras, además de representar pérdidas para las empresas de acueducto y alcantarillado. En este trabajo se plantea una solución al monitoreo de estos ductos con una herramienta automatizada desarrollada con recursos locales y tecnologías disponibles en el mercado local. Para dar solución a esto se establecieron los criterios de selección de materiales y dimensiones involucradas en el diseño, basados en la información recopilada en la investigación de campo adelantada en los talleres de EMCALI. Una vez levantados los requerimientos, se elaboró el diseño funcional de la plataforma, el cual está compuesto por ruedas neumáticas, un chasis en acero inoxidable y una cúpula en acrílico para el sistema de monitoreo. Este diseño permitirá la exploración de ductos de alcantarillado con diámetros iguales o superiores a un metro.

Palabras Claves: Vehículos guiados automáticamente, robots industriales, Robótica móvil, ductos de alcantarillado

1. INTRODUCCIÓN

Para la realización del monitoreo y control de ductos pequeños en especial de alcantarillado, montajes industriales, en oficinas o en domicilios se deben superar limitaciones de acceso que dificultan estas labores, como es el caso de ambientes peligrosos (presencia de roedores, fibra de vidrio, polvo o químicos dañinos para el ser humano) y espacios confinados [1,2], produciendo que estas tareas de monitoreo y de control, sobre todo si se necesitan con rapidez, sean imposibles, difíciles o peligrosas de realizar por parte de un humano. Para responder a estas dificultades la industria ha desarrollado distintos equipos tecnológicos como plataformas de inspección, brazos mecánicos y automatizados o elementos de exploración [3-5], optimizados para desarrollar tareas específicas bajo ciertas condiciones [1,7]; Sin embargo, en la actualidad en Colombia, el desarrollo de estos dispositivos es limitado y adicionalmente, el costo de los mismos es elevado debido a que en su mayoría son importados, sin mencionar los costos asociados a operación y mantenimiento, debido en algunos casos a la complejidad de las tecnologías utilizadas y a las técnicas de fabricación. En la región del valle del Cauca, las empresas municipales de Cali –EMCALI, han detectado que solo facturan el 46% del líquido vital del total purificado con recursos de la comunidad, con una pérdida del 54% que corresponden en su mayoría a daños, conexiones malas e ilegales en la red y alteración de medidores, con pérdidas cercanas a los 432000 millones de pesos al año [8,9]. Para dar solución a esta problemática EMCALI, realiza tareas de monitoreo e inspección de ductos, para la verificación de fugas y conexiones fraudulentas. Para este tipo de control se utiliza el sistema SATURNO III [10,11], que está formado por un sistema portátil de monitoreo de ductos que es acompañado de un robot que es introducido al tubo y lo explora con ayuda de una cámara. El costo del equipo, las reparaciones, el manejo y el soporte del mismo, está sujeto a servicio de soporte de la empresa fabricante, lo que aumenta los costos de mantenimiento del mismo. El uso de este robot permitió en 2012, detectar 1.132 conexiones fraudulentas, de las cuales 896 se ubicaron en el sur de la ciudad [9]. Con base en ese informe, funcionarios del área de Control de Aguas Residuales en Canales de Aguas Lluvias (Carcall) de la Gerencia de Acueducto y Alcantarillado de EMCALI [9], está realizando actividades de acompañamiento y notificación a 313 usuarios para que corrijan la disposición final de estos vertimientos, en hogares y locales comerciales, ya que están disponiendo las aguas residuales en los canales de aguas lluvias. La dimensión de las redes de acueducto y alcantarillado es de 3000 km, lo que hace necesario que se disponga de más sistemas que permitan establecer la inspección de los ductos [12].

Debido a la problemática anteriormente planteada, diseñar una plataforma móvil para la exploración de ductos, sobre la premisa de hacerlo, en caso de ser posible, usando algún porcentaje de material reciclado, utilizando software y hardware de libre distribución, es una oportunidad para disminuir los costos de fabricación y mantenimiento del sistema, para la generación de conocimiento en el campo de desarrollo de monitoreo y control basado en autómatas. Todo esto buscando establecer un sistema que garantice fiabilidad en su desempeño introduciendo elementos de diagnóstico que constituyan un plus a los procesos de monitoreo y control.

2. RESULTADOS

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para el desarrollo del prototipo se evaluaron una serie de criterios que permitieron establecer el diseño propuesto en este trabajo, a continuación se describen cada uno de estos criterios.

2.1 Determinación de las dimensiones

Para el diseño de esta plataforma, se realizaron varias visitas técnicas a la planta de acueducto de EMCALI y entrevistas con personal especializado del área de acueducto, de lo cual se obtuvo las medidas de las dimensiones de los tubos y de la apertura por la cual ingresaría la plataforma (tubo de acceso).

Tabla 1. Especificaciones de las tuberías

Ítem	Característica
Material	Hormigón, PVC
Diámetro interno	100 cm
Espesor	11 cm, 20 cm

2.2 Criterio de tipo de Materiales

Debido a que el medio en el cual el sistema operará es húmedo y plagado de agentes corrosivos se realizó un estudio de materiales para escoger el más adecuado manteniendo la relación costo beneficio aceptable.

Las aguas residuales en este tipo de ductos son en algunos sectores aguas duras, es decir, aguas que contienen calcio o magnesio disueltos, además pueden tener bicarbonatos de calcio o de magnesio. En otros sectores se pueden presentar desechos provenientes de empresas locales, en otros casos aguas negras, es decir, agua de abastecimiento de una comunidad después de haber sido contaminada por diversos usos. En los sectores cercanos a los domiciliarios, las aguas pueden ser una combinación de residuos, líquidos o en suspensión, de tipo doméstico, municipal e industrial, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan estar presentes. En otros sectores se tienen aguas grises, que son aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, fregaderos y lavaderos. No importando el tipo de agua se tiene siempre presente un gran contenido bacteriano y de hongos que pueden deteriorar las superficies del material escogido como constituyente del robot desarrollando procesos corrosivos.

En un comienzo se optó por construir la estructura del cuerpo del robot de Aluminio (Al) debido a que siempre se ha destacado, como una de las principales cualidades del Al, en comparación con el acero, su gran resistencia a la corrosión frente al ambiente, sin embargo, también conviene saber que tiene una menor resistencia a la corrosión de contacto con otro metal [13]. Para que se

ISBN: 978-987-1676-63-7

produzca corrosión frente al ambiente, solo se requiere que el Al este en contacto con el oxígeno (O). La velocidad a la que el Al se corroe, en un principio, es más rápida que en el caso del acero, debido a la mayor afinidad del O con el Al, pero una vez formada la capa de óxido en la superficie (Al_2O_3-Alúmina), [13] esta actúa como un escudo, ya que es muy dura y compacta, evitando de esta forma la progresión de la oxidación en el Al. No ocurriría lo mismo en el acero, ya que está seguiría avanzando hasta provocar el deterioro de la pieza. Pero un inconveniente importante es que el aluminio es un material mucho más liviano, debido a que su densidad es 2698,4 kg/m^3 en comparación con el acero, ~7850 kg/m^3 en aleaciones usadas industrialmente [14], casi tres veces más denso. Para este caso el robot necesita deslizarse sobre una superficie y garantizar un agarre óptimo para poder desplazarse en un ambiente húmedo. La opción del Al no es la más adecuada, además de implicar un mayor costo en el proceso de soldado de las piezas constituyentes mediante el uso de un equipo de soldadura tipo MIG/MAG (Metal Inert Gas o Metal Active Gas, dependiendo del gas que se inyecte), usado para el procesos de soldadura de metales de puntos bajos de fusión. Los aceros inoxidables contienen el cromo suficiente para darle sus características de inoxidables. Muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aún más su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son añadidas al acero en estado de fusión para hacerlo. Por este motivo, los aceros inoxidables no necesitan ser ni chapeados, ni pintados, ni de ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión. En el acero inoxidable no hay nada que se pueda pelar, ni desgastar, ni saltar y desprenderse. Es por esto que el material escogido para la fabricación de la estructura del robot es acero inoxidable en forma de láminas con un espesor de 3 mm.

2.3 Criterio para el sistema de locomoción

Otra parte fundamental de la plataforma robótica móvil de inspección es el sistema de locomoción, constituido por una maquina eléctrica rotativa que transfiere el movimiento a un conjunto de llantas. Aunque inicialmente fue abrazada la idea de usar en lugar de llantas una oruga que le permitiría desplazarse por superficies irregulares con gran destreza y velocidad, su inconveniente es la estructura que la forma está hecha de metal lo cual constituiría en un foco de deterioro mayor para el sistema, porque aun que se usara un material como acero inoxidable, el mantener inmerso el metal en el líquido presente en la tubería produciría a largo plazo deterioro de la oruga, sin contar con los atascamientos debido a los desechos de tipo fibroso presentes en el agua. Como último inconveniente es además el mantenimiento de la oruga es complejo ya que es construida a medida. Una alternativa a la oruga es las llantas de caucho simple, un sistema que sacrifica movilidad por una optimización en el uso de los recursos para obtener un sistema de ágil desplazamiento a bajo costo. Las llantas están hechas de hierro y caucho, mucho más susceptibles al deterioro pero esto se equipara con un bajo precio lo que las hace fácilmente reemplazables cuando el uso genere deterioro en este tipo de materiales.

El cuerpo de acero inoxidable brinda protección a un par de motores de 12V que son el corazón del sistema que funcionarán con un par de baterías secas de 12V, que proporcionan 35Ah suficientes para cubrir la demanda energética del sistema que se centra principalmente en el consumo de los motores, estas baterías se encuentran en la estación de monitoreo externo y el voltaje es transportado por un conjunto de cables que se conducen por el cordón umbilical del sistema.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.4 Sistema de Monitoreo

Extraer información del estado de la tubería es el principal objetivo de la plataforma robótica móvil, para esto se usará una cámara empotrada en el frente del robot, con un sistema automatizado que le permite girar con tres grados de libertad x, y y z, abarcando casi totalmente el espacio frontal del robot. Para garantizar la iluminación del lugar se dispondrá de un conjunto de luces led de 5W c/u ubicados en la parte frontal del sistema, lo que garantizará un espacio iluminado sin presentar un aumento considerable de temperatura en el robot. La cámara instalada estará protegida por una cúpula de Polimetilmetacrilato, conocido industrialmente como acrílico $(C_5O_2H_8)n$, un polímero resistente que protege el sistema óptico incorporado en la plataforma robótica a la vez que permite hacer la inspección del ducto. Se escoge este polímero por su resistencia y flexibilidad lo que garantiza un buen desempeño en el medio, a la vez su costo no es tan elevado ofreciendo una gran propuesta en el ejercicio costo beneficio.

Basados en la investigación de propuestas similares [1-3] se ha planteado un diseño compacto tomando en cuenta las dimensiones de las tuberías más comunes presentes en el alcantarillado de la ciudad de Cali.

El diseño de la plataforma fue realizado empleando el software SOLIDWORK[1]. En la fig. 1 observamos el chasis de la plataforma que servirá como estructura base, que será utilizada para fijar los motores, las ruedas, los ejes y demás elementos que constituyen la estructura mecánica. Esta estructura será realizada en ángulo de acero, para garantizar la dureza de la estructura. Se observan los soportes necesarios para el correcto alineamiento de los motores y que permitirán su desplazamiento en el plano de la base de la estructura para garantizar la tensión adecuada en las cadenas que transmitirán el movimiento del motor a las ruedas, unidas a ejes de acero y rodamientos. La doble tracción posibilitará la corrección de la trayectoria recta de la plataforma, cuando ingrese en el ducto.

La lámina de acero inoxidable de 1mm de espesor será instalada en la parte posterior del chasis (ver fig. 2), y permitirá que las aguas residuales, sustancias químicas y/o agente abrasivos, no afecten las propiedades estructurales o mecánicas del sistema. La plataforma tendrá dos accesos, uno en la parte frontal que permitirá manipular la cámara de video y sus componentes, este acceso, también permitirán el cambio de la cúpula de acrílico, y verificar el estado de los piñones delanteros. Adicionalmente, la tapa superior, llevara todos los dispositivos electrónicos que controlaran el movimiento de la cámara, los motores, el sistema de iluminación, los sensores de gas, entre otros. Asi como también, el acceso a los motores, los piñones y los ejes de las ruedas, que permiten el desplazamiento de la plataforma dentro del ducto.

[1] SolidWork es un producto Dassault Systèmes SolidWorks Corp.

ISBN: 978-987-1676-63-7

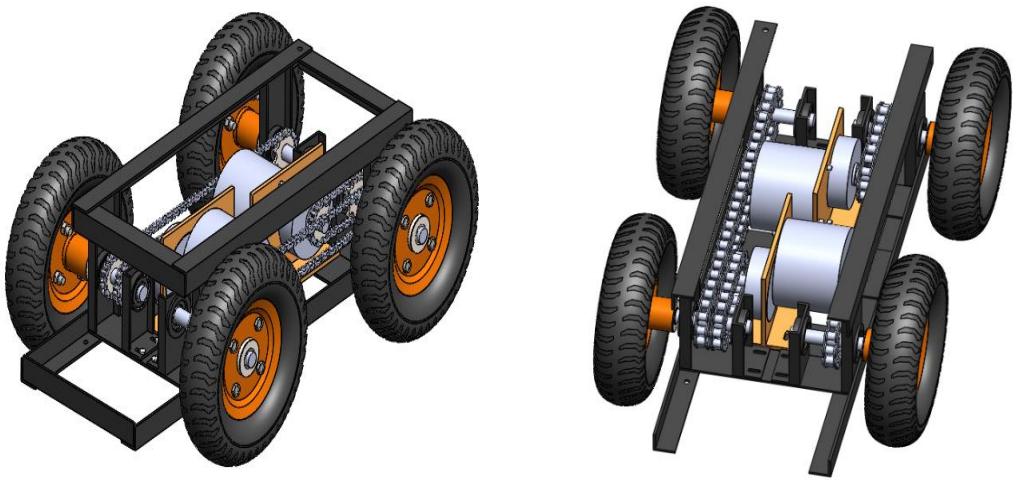


Fig. 1. Estructura interna de la plataforma. Se observa la ubicación de los elementos que componen la parte mecánica de la plataforma.

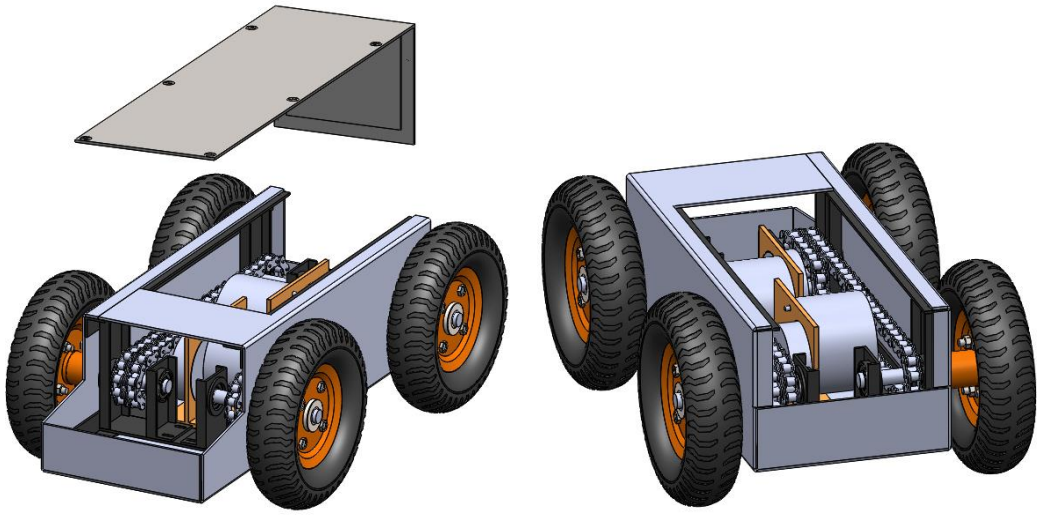


Fig. 2. Paredes laterales y accesos de la plataforma que permitirán asilar los elementos mecánicos del exterior.

En la fig. 3, se observa la imagen virtual del sistema, en donde se observa una estructura tipo metálica sólida, y que nos permitirá identificar la versión final de nuestro diseño. La plataforma tiene una forma de paralelepípedo con una cúpula de acrílico en la parte frontal que sirve de protección al sistema de cámara de video que permitirá la inspección visual del ducto. Las ruedas de material tipo caucho con neumáticos basados en aire, son fácilmente reemplazables, lo que permitirá un mantenimiento a bajo costo y que permitirá una continua verificación de los

ISBN: 978-987-1676-63-7

rodamientos del sistema. En la fig. 4, podemos ver una imagen de la plataforma dentro del tubo de hormigón, en donde se observa en su camino, uno de los posibles obstáculos o problema que encontrara durante su inspección.

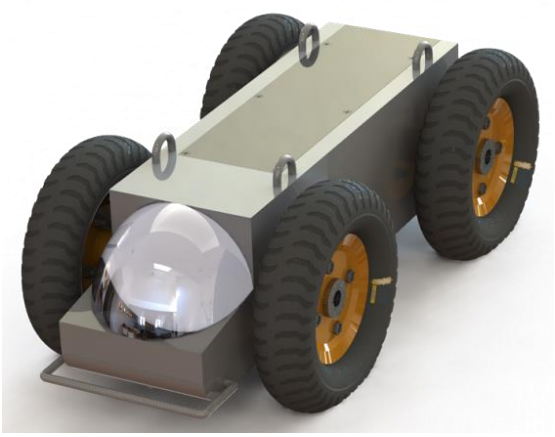


Fig. 3 Vista isométrica del diseño realizado de la plataforma móvil para la exploración de ductos

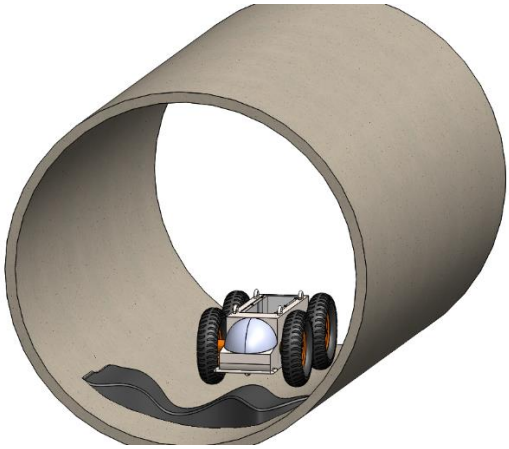


Fig. 4 Imagen de la plataforma durante el proceso de inspección dentro del tubo de hormigón, en donde se observa un obstáculo en su trayectoria.

2.5 Especificaciones técnicas

En la Fig. 5 podemos observar el diseño de la plataforma en una vista isométrica, la cual permite visualizar las diferentes vistas lateral, frontal y superior, con sus respectivas dimensiones. Estas

ISBN: 978-987-1676-63-7

especificaciones fueron asumidas de acuerdo al levantamiento de los requerimientos hechos en las visitas de campo hechas a las instalaciones de EMCALI.

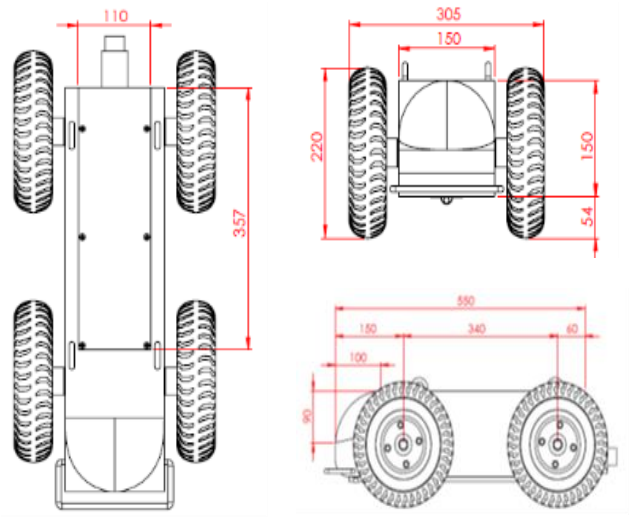


Fig. 5 diseño isométrico de la plataforma, donde se observa las vistas superior, frontal y lateral derecha.

En la estación estará el mando correspondiente del robot que permitirá dirigirlo en una dirección u otra según sea lo requerido en la labor de inspección. Además, estará los monitores que exhibirán las imágenes provenientes de la cámara del robot, transportada en forma de datos por el cordón umbilical del sistemas mediante el uso de un cable UTP nivel 5 y bajo el protocolo de comunicaciones TCP/IP 4.

La plataforma estará desarrollada bajo la directiva de hardware y software libre para esto se usa una mini PC Raspberry Pi 2, esta es una tarjeta que constituye un computador con todas sus funcionabilidades pero con un consumo moderado de energía eléctrica, con un procesador de 1GHz ARM Cortex A8, memoria RAM y memoria de almacenamiento flash lo que lo hace una gran herramienta para el desarrollo de proyectos hágalo usted mismo (DIY del inglés Do It Yourself). Nativamente estas tarjetas de desarrollo traen instalado el software linux Raspbian, lo que facilita la interacción con las tarjetas controladoras del hardware, además, esta tarjeta de desarrollo es 100% compatible con la tarjeta arduino. Para la programación del sistema de control del sistema se usa el lenguaje nativo de arduino (Processing) así como el lenguaje C++, con editores y compiladores disponibles en forma gratuita bajo la licencia de software libre.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2. Especificaciones técnicas plataforma robótica móvil

Ítem	Características
Chasis	550 x 150 x 150 mm
Envergadura	550 x 305 x 204 mm
Peso estimado	~20 kg
Ruedas	200 mm ∅.
Mat-Ruedas	2,50-4 Caucho +aire
Material Estructura	Acero inoxidable (3mm de espesor)
Cúpula protectora cámara	Acrílico (3mm de espesor)
Motores	24V 18.3 A
Tarjeta de control	Raspberry Pi 2, Arduino Mega, shields e interfaces para arduino
Comunicación	Alámbrica (Cable UTP-5)
Alimentación	2 Baterías secas de 12V 35 Ah

En el proceso de diseño se introdujo una mejora que no está presente en los robots de inspección de ductos consultados en la literatura ni los disponibles comercialmente, la disponibilidad de un chorro de agua, que le permite al sistema abrirse paso entre los obstáculos del tubo. Tanto el agua como el poder y los datos fluyen por un cordón umbilical desarrollado especialmente para la plataforma que mantiene conectado todo el tiempo el robot a la estación de monitoreo externa a la vez que permite rescatar el robot en caso de ser necesario. En dicha estación se cuenta con un computador robusto capaz de almacenar la información transferida desde el robot, modelar y diagnosticar averías en las tuberías.

3. CONCLUSIONES

Se diseñó de la plataforma robótica para la inspección de ductos acuerdo a la evaluación previa de las condiciones de los tubos de alcantarillado de la ciudad de Cali, lo que también permitió su implementación en la exploración de otro tipo de ductos.

El control del sistema se estableció basado en las filosofías de software libre y hardware libre, basando el desarrollo en la plataforma arduino y la miniPC raspberry PI 2. Lo que constituye una

ISBN: 978-987-1676-63-7

garantía de mantenimiento a bajo costo lo que permitirá no solo su implementación local sino una oportunidad de negocio con un producto competitivo en el mercado.

La interfaz de control del sistema estará desarrollada en C++ estructurada en módulos lo que permite hacer uso del sistema en forma controlada manteniendo registros de usuarios y de inspecciones. El software desarrollado será ajustado a estándares internacionales de manera que su uso comercial sea viable.

4. REFERENCIAS

[1] T. Moore. *Robots for nuclear power plants*. IAEA Bulletin, vol. 26, pp. 31–38, 1985.

[2] X. Gao, D. Xu, Y. Wang, H. Pan.W. Shen. *Multifunctional robot to maintain boiler water-cooling tubes*. Robotica, vol. 27, pp. 941-948, 2009.

[3] K.S.M. Sahari, A. Anuar, S.S.K. Mohideen, M.Z. Baharuddin, I.N. Ismail, ; N.M.H. Basri, N.S. Roslin, M. A. Aziz, ; B. Ahmad. *Development of Robotic Boiler Header Inspection Device*. SCIS-ISIS 2012, Kobe, Japan, November 20-24, 2012.

[4] Lu Xueqin, Qiu Rongfu, Liu Gang, Huang Fuzhen. *The Design of an Inspection Robot for Boiler Tubes Inspection*. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, IEEE, pp. 313-317, 2009.

[5] I.M.Rekleitis, G. Dudek, and E.E.Milios. *Multi-robot collaboration for robust exploration*. In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation.IEEE, 2000.

[6] X. Gao, D. Xu, Y. Wang, H. Pan, and W. Shen, *Multifunctional robot to maintain boiler water-cooling tubes*. Robotica, vol. 27, pp. 941-948, 2009. BORARAR

[7] W .Burgard, M.Moors, D.Fox, R.Simmons, and S.Thrun. *Collaborative multirobot exploration*. in Proc.f the IEEE Int. Conf. Nobotics & Automation (ICRA), pp.476-481, 2000.

[8] L. Melo García. *Cali pierde tanta agua como la que consume en todo un año*. El País, Sept. 21 de 2014. Julio 19 de 2015 [online]. Available: http://www.elpais.com.co/elpais/cali/noticias/cali-pierde-tanta-agua-como-consume-todo-ano

[9] Empresas Municipales de Cali EMCALI. *INFORME DE GESTIÓN 2014*. Julio19 de 2015. [online]. Available: http://www.emcali.com.co/documents/10157/57705/Informe+de+Gestion+2014.pdf

[10] Aries industries INC. *Portable Systems*. Julio19 de 2015. [online]. Available: http://www.ariesindustries.com/download/Aries_PortableSystems.pdf

[11] *Robot caza infractores en el alcantarillado de Cali*. El País, Mar. 2012. Julio 19 de 2015 [online]. Available: http://www.elpais.com.co/elpais/cali/videos/robot-caza-infractores-en-alcantarillado-cali

[12] *Concejo cuestiona a EMCALI por aumento en pérdidas de agua potable*. El País, Abr. 9 de 2015. Julio 19 de 2015 [online]. Available: http://www.elpais.com.co/elpais/cali/noticias/concejo-cuestiona-emcali-por-aumento-perdidas-agua-potable

[13] W. Hufnagel, Pedro Coca. *Manual del aluminio*. Editorial Reverte, 2004

[14] Varios autores (1984). *Enciclopedia de Ciencia y Técnica. Tomo 1 Acero*. Salvat Editores S.A. ISBN 84-345-4490-3.

5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es financiado por la Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium, UNICATOLICA mediante el proyecto No. FI-010106. Los autores de este trabajo agradecen a las Empresas Municipales de Cali - EMCALI, por la disposición para el levantamiento de los requerimientos y ayudas en la búsqueda los parámetros óptimos para este diseño.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ENFOQUE AMBIENTAL DE LA ENERGÍA: EXPERIENCIAS Y ACCIONES PARA ESTIMULAR APTITUDES TEMPRANAS EN EL AREA DE LAS CIENCIAS NATURALES

R. Aeberhard[1], P. Martina[1], J. Corace[1], G. Tortosa[1], J. Barea1, A. Leiva Azuaga[1]

[1]G.I.D.E.R. –Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables
Departamento de Termodinámica - Facultad de Ingeniería – UNNE
Las Heras 727 – (3500) Resistencia – Chaco
raquelaeberhard@yahoo.com.ar

RESUMEN

La Educación Ambiental juega un papel esencial en la lucha por preservar el medio ambiente pues el desafío al que nos enfrentamos no sólo es tecnológico, sino social y educativo. Para superarlo es necesario desarrollar estrategias y herramientas eficaces y útiles, que intenten una adecuada comprensión del fenómeno mediante la comunicación, a través de ejemplos, analogías y comparaciones fáciles de entender.

Por este motivo, en el marco de un Convenio entre la Universidad Nacional del Nordeste y el Ministerio de Educación de Corrientes, para llevar a cabo el Proyecto de Mejora de la Formación en Ciencias Exactas y Naturales en la Escuela Secundaria, el Grupo GIDER (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la UNNE, participó en la actividad denominada: Enfoque ambiental de la energía, usos de energías renovables.

En este contexto, se elaboró la propuesta en la que se concretaron experiencias sobre los fenómenos de calor por efectos de la radiación solar, utilizando distintos dispositivos solares, con el fin de generar en alumnos, docentes y todos los integrantes de las instituciones vinculadas, el planteo de, no solamente sugerir las ventajas de una tecnología sobre otra, sino proponer nuevas tecnologías socialmente apropiadas, disponiendo de fuentes energéticas accesibles, renovables y controlables, estimulando, además, el interés de los estudiantes por la ciencia, a través de prácticas de laboratorio.

En el presente trabajo se exponen las actividades efectuadas con seis Institutos de nivel medio respecto a la utilización de las energías alternativas, como una forma de estimular las vocaciones tempranas.

Con los talleres sobre Energías Renovables, los participantes, se familiarizaron con las leyes generales de la energía solar, aprendiendo a observar, comparar y analizar los diversos fenómenos energéticos.

***Palabras clave**: Aptitudes tempranas – Educación ambiental - Energías renovables.*

1. INTRODUCCIÓN

La Educación Ambiental, es la única asignatura específica que tiene jerarquía Constitucional en nuestro país, debido a la influencia que tienen las numerosas problemáticas ambientales que se producen hoy en el planeta.

Uno de los principales desafíos, en la batalla contra la contaminación ambiental, es la utilización de la energía. Las previsiones del aumento del consumo energético mundial, nos plantea el aumento de la producción a escala global, con sus consecuentes impactos negativos sobre el ambiente (calentamiento global por emisiones de gases de efecto invernadero, desertificación, contaminación atmosférica, de recursos hídricos y de suelos, etc.) y por consiguiente sobre nuestra calidad de vida.

Esto convierte hoy a las fuentes de energías alternativas en uno de los ejes centrales en materia de Educación Ambiental.

La dimensión del problema ambiental hace preciso sensibilizar, comunicar y facilitar el acceso a la información en torno a este flagelo y sus consecuencias, para promover la participación de la sociedad en la elaboración de respuestas adecuadas.

La Educación Ambiental juega un papel esencial en la lucha por preservar el medio ambiente pues el desafío al que nos enfrentamos no sólo es tecnológico, sino social y educativo.

Para superarlo es necesario, desarrollar estrategias y herramientas eficaces y útiles, que intenten una adecuada comprensión del fenómeno mediante la comunicación, a través de ejemplos, analogías y comparaciones fáciles de entender.

En el marco del proyecto de mejora de la Formación en Ciencias Exactas y Naturales en la Escuela Secundaria, el Grupo GIDER (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, participó en la actividad denominada: Enfoque ambiental de la energía, usos de energías renovables.

En el contexto de este proyecto se elaboró la propuesta en la que se desarrollaron diferentes experiencias concretas sobre los fenómenos de calor por efectos de la radiación solar y la práctica con distintos dispositivos solares, con el fin de generar en alumnos, docentes y todos los integrantes de las instituciones vinculadas, el planteo de, no solamente sugerir las ventajas de una tecnología sobre otra, sino proponer nuevas tecnologías socialmente apropiadas, disponiendo de fuentes energéticas accesibles, renovables y controlables.

El proyecto se desarrolló con las comunidades de seis colegios secundarios de la ciudad de Corrientes, que asistieron a la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional del Nordeste, para realizar las actividades propuestas.

A las prácticas asistieron grupos de aproximadamente 20 alumnos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El proyecto, realizado entre la Universidad del Nordeste y el Ministerio de Educación de la Provincia de Corrientes, tuvo como objetivo desarrollar un programa de inclusión educativa y articulación, con establecimientos secundarios, a fin de despertar en los alumnos de los últimos años, las vocaciones tempranas en ciencias exactas y naturales.

En el marco del mencionado proyecto, el Grupo GIDER (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), participó en la actividad denominada: Enfoque ambiental de la energía, usos de energías renovables.

Los objetivos planteados fueron:

- Conocer los inconvenientes que acarrea la utilización de los combustibles fósiles.
- Valorar a través de talleres teórico-prácticos, el interés por las energías renovables como alternativa energética ante los problemas ambientales que urgen en la actualidad.
- Analizar los conceptos de las leyes generales de la energía, su utilización eficiente y conservación.
- Aplicar el método científico mediante prácticas de laboratorio, con alumnos del último año de la escuela secundaria, utilizando dispositivos solares a escala, desarrollados por el G.I.D.E.R., a fin de estimular el interés por las energías alternativas.
- Desarrollar las habilidades en el uso de instrumentos de medición y equipamiento de laboratorio.

3. CONTENIDOS DIDÁCTICOS

- La energía; fuentes de energía renovables y no renovables; Combustibles fósiles y contaminación medioambiental.
- Secadero solar para madera, frutas y hortalizas,
- Calentador Solar,
- Cocina y Horno Solar,
- Biogás: producción a partir de los residuos orgánicos de la madera y la huerta.

4. ESTRATEGIAS

Se construyeron dispositivos solares a escala (cocina solar tipo horno, colector solar, destilador y biodigestor) que fueron posteriormente utilizados por los alumnos durante los talleres, (Figura 1, Figura 2, Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6):

ISBN: 978-987-1676-63-7





Figura 1, Figura 2 y Figura 3: cocinas y calefón solar

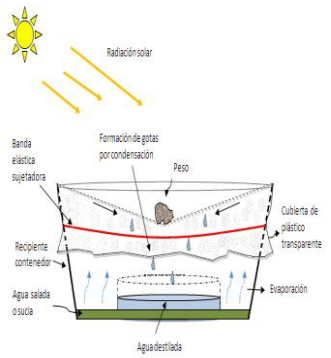




Figura 4 y Figura 5: esquema e imagen del destilador solar



Figura 6: Biodigestor

Se efectuaron visitas al Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería – UNNE, y se realizaron prácticas de laboratorio donde se ejecutaron experiencias sobre los fenómenos de calor por efectos de la radiación solar.

Se desarrollaron exposiciones orales sobre el uso racional de la energía y la utilización de la energía solar térmica, y se proyectaron películas indicando las causas y consecuencias de la crisis energética actual.

5. ACTIVIDADES DE CAMPO

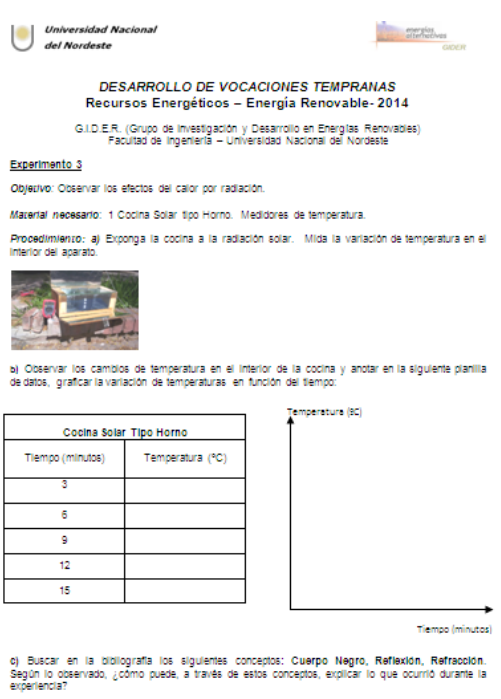
Los talleres se iniciaron con una presentación referida a las actividades que realiza, en la Facultad de Ingeniería, el Grupo GIDER en la temática de energías renovables y se expusieron los temas teóricos según las actividades a realizar. Posteriormente:

- Se exhibieron los dispositivos construidos en la Facultad de Ingeniería-UNNE (cocinas solares, calefones solares, digestores anaeróbicos y destiladores solares), explicando su funcionamiento y utilización.
- Se dispuso de varios volúmenes bibliográficos para consulta de los alumnos, con el propósito de incentivar la lectura y búsqueda bibliográfica.
- Se realizaron en los laboratorios y patio de la Facultad de Ingeniería los diferentes experimentos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Se propuso a los estudiantes presentes, formar comisiones de trabajo; los grupos recibieron la guía de la práctica a realizar, según el tema requerido. Cada grupo realizó un trabajo práctico diferente para observar e intercambiar experiencias, resultados y conclusiones referidos a los efectos del calor por radiación.

En las siguientes imágenes (Figura 7 y Figura 8) se exponen, como ejemplo, dos de las guías de trabajo entregadas:



Universidad Nacional del Nordeste

DESARROLLO DE VOCACIONES TEMPRANAS
Recursos Energéticos – Energía Renovable- 2014

G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Experimento 3

Objetivo: Observar los efectos del calor por radiación.

Material necesario: 1 Cocina Solar tipo Horno. Medidores de temperatura.

Procedimiento: a) Exponga la cocina a la radiación solar. Mida la variación de temperatura en el interior del aparato.

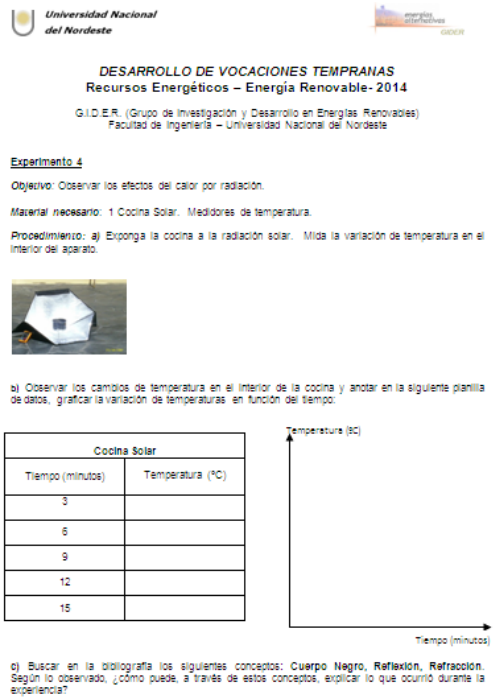
b) Observar los cambios de temperatura en el interior de la cocina y anotar en la siguiente planilla de datos, graficar la variación de temperaturas en función del tiempo:

Cocina Solar Tipo Horno	
Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
3	
6	
9	
12	
15	

Temperatura (ºC)

Tiempo (minutos)

c) Buscar en la bibliografía los siguientes conceptos: **Cuerpo Negro, Reflexión, Refracción.** Según lo observado, ¿cómo puede, a través de estos conceptos, explicar lo que ocurrió durante la experiencia?



Universidad Nacional del Nordeste

DESARROLLO DE VOCACIONES TEMPRANAS
Recursos Energéticos – Energía Renovable- 2014

G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Experimento 4

Objetivo: Observar los efectos del calor por radiación.

Material necesario: 1 Cocina Solar. Medidores de temperatura.

Procedimiento: a) Exponga la cocina a la radiación solar. Mida la variación de temperatura en el interior del aparato.

b) Observar los cambios de temperatura en el interior de la cocina y anotar en la siguiente planilla de datos, graficar la variación de temperaturas en función del tiempo:

Cocina Solar	
Tiempo (minutos)	Temperatura (°C)
3	
6	
9	
12	
15	

Temperatura (ºC)

Tiempo (minutos)

c) Buscar en la bibliografía los siguientes conceptos: **Cuerpo Negro, Reflexión, Refracción.** Según lo observado, ¿cómo puede, a través de estos conceptos, explicar lo que ocurrió durante la experiencia?

Figura 7 y Figura 8: Guías para la realización de las experiencias

A continuación se observan imágenes de los grupos de alumnos realizando las actividades indicadas (Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12):





Figura 9 y Figura 10: Experiencias con las cocinas solares

ISBN: 978-987-1676-63-7





Figura 11 y Figura 12: Experiencias realizadas sobre radiación solar

Dado que el cronograma de actividades fue propuesto con anticipación, sin posibilidad de cambio de horario, algunas jornadas se llevaron a cabo bajo condiciones climáticas desfavorables, lo que motivó a realizar las experiencias en los laboratorios, simulando una situación soleada, con el fin de que los alumnos identificaran los fenómenos físicos involucrados en las prácticas. En las siguientes imágenes se observan las prácticas efectuadas (Figura 13 y Figura 14):





Figura 13 y Figura 14: Estudiantes durante las prácticas de laboratorio simulando un día soleado

5.1. Temporalización

La duración de las actividades fue de aproximadamente tres horas cada encuentro.

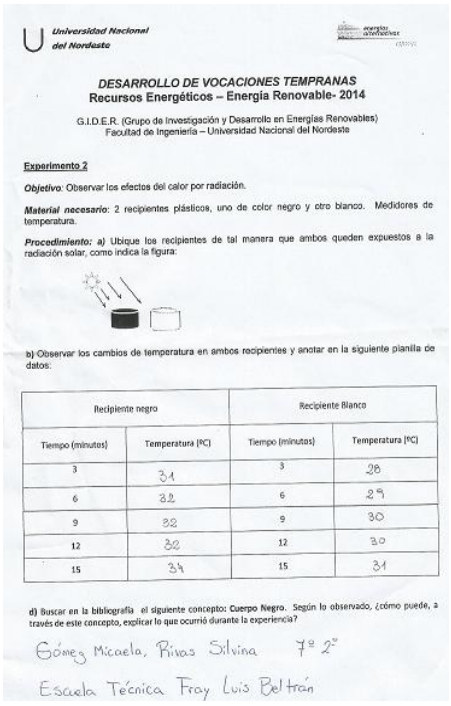
5.2. Evaluación

Al comienzo de cada taller se evaluó a los alumnos, mediante preguntas, respecto a temas generales sobre energía, haciendo hincapié en las energías renovables, lo que permitió introducir nuevos conceptos a partir de los conocimientos previos del grupo.

Durante toda la práctica se realizó un seguimiento de los grupos evaluando la predisposición de los mismos al trabajo colectivo, a la curiosidad, la reflexión, la consulta a las fuentes de información brindada y al interés mostrado por los conocimientos adquiridos durante los ensayos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Al finalizar las experiencias los alumnos entregaron las guías de trabajos prácticos con los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas, (Figura 15 y Figura 16).



Universidad Nacional del Nordeste

DESARROLLO DE VOCACIONES TEMPRANAS
Recursos Energéticos – Energía Renovable- 2014

G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Experimento 2

Objetivo: Observar los efectos del calor por radiación.

Material necesario: 2 recipientes plásticos, uno de color negro y otro blanco. Medidores de temperatura.

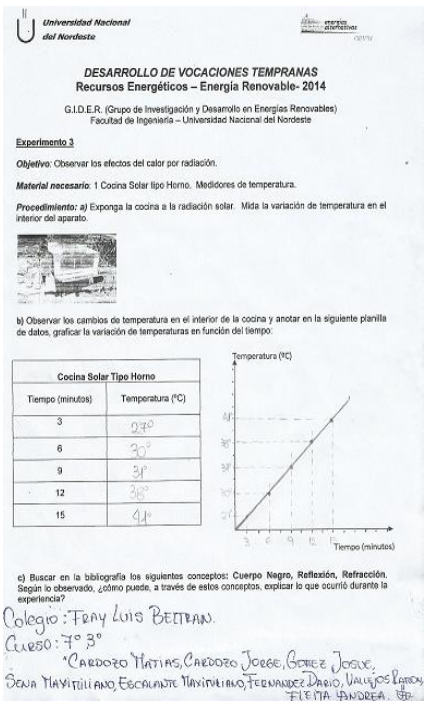
Procedimiento: *a)* Ubique los recipientes de tal manera que ambos queden expuestos a la radiación solar, como indica la figura:

b) Observar los cambios de temperatura en ambos recipientes y anotar en la siguiente planilla de datos:

Recipiente negro		Recipiente Blanco	
Tiempo (minutos)	Temperatura (ºC)	Tiempo (minutos)	Temperatura (ºC)
3	31	3	28
6	32	6	29
9	32	9	30
12	32	12	30
15	34	15	31

d) Buscar en la bibliografía el siguiente concepto: **Cuerpo Negro.** Según lo observado, ¿cómo puede, a través de este concepto, explicar lo que ocurrió durante la experiencia?

Gómez Micaela, Pinas Silvina 7º 2º
Escuela Técnica Fray Luis Beltrán



Universidad Nacional del Nordeste

DESARROLLO DE VOCACIONES TEMPRANAS
Recursos Energéticos – Energía Renovable- 2014

G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables)
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Nordeste

Experimento 3

Objetivo: Observar los efectos del calor por radiación.

Material necesario: 1 Cocina Solar tipo Horno. Medidores de temperatura.

Procedimiento: *a)* Exponga la cocina a la radiación solar. Mida la variación de temperatura en el interior del aparato.

b) Observar los cambios de temperatura en el interior de la cocina y anotar en la siguiente planilla de datos, graficar la variación de temperaturas en función del tiempo:

Cocina Solar Tipo Horno	
Tiempo (minutos)	Temperatura (ºC)
3	27º
6	30º
9	34º
12	36º
15	41º

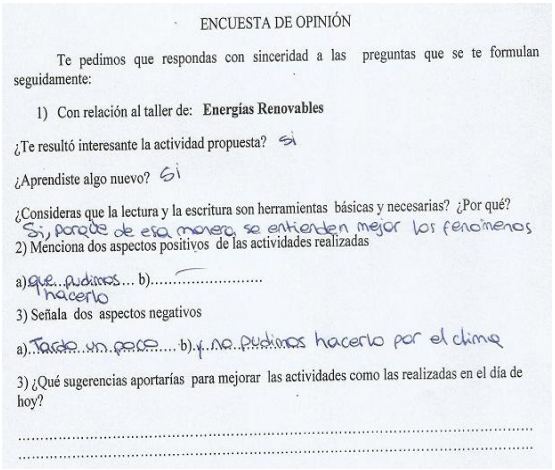
Temperatura (ºC)
Tiempo (minutos)

c) Buscar en la bibliografía los siguientes conceptos: **Cuerpo Negro, Reflexión, Refracción.** Según lo observado, ¿cómo puede, a través de estos conceptos, explicar lo que ocurrió durante la experiencia?

Colegio: Fray Luis Beltran.
Curso: 7º 3º
"Cardozo Matias, Cardozo Jorge, Gomez Josue, Sena Maximiliano, Escalante Maximiliano, Fernandez Dario, Vallejos Ramon, Elena Andrea.

Figura 15 y Figura 16: Guías de trabajos prácticos realizadas por los alumnos

Para dar por terminada la jornada se proporcionó a los alumnos una encuesta con el fin de evaluar su opinión sobre el taller de Energías Renovables, encuestas que se presentan a continuación (Figura 17 y 1 Figura 8):



ENCUESTA DE OPINIÓN

Te pedimos que respondas con sinceridad a las preguntas que se te formulan seguidamente:

1) Con relación al taller de: **Energías Renovables**

¿Te resultó interesante la actividad propuesta? si

¿Aprendiste algo nuevo? Si

¿Consideras que la lectura y la escritura son herramientas básicas y necesarias? ¿Por qué?
Si, porque de esa manera se entienden mejor los fenómenos

2) Menciona dos aspectos positivos de las actividades realizadas

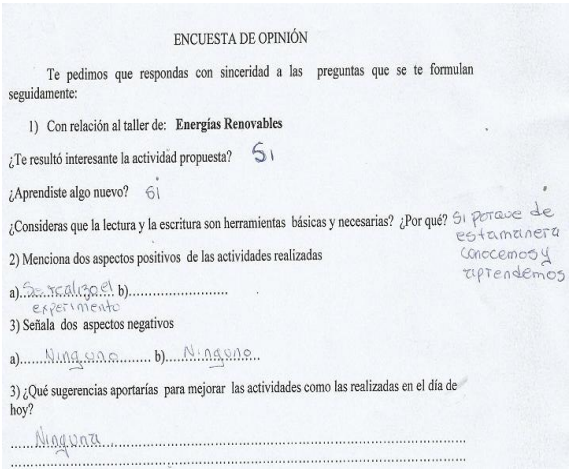
a) que pudimos hacerlo ... b).....

3) Señala dos aspectos negativos

a) Tarda un poco ... b) y no pudimos hacerlo por el clima

3) ¿Qué sugerencias aportarías para mejorar las actividades como las realizadas en el día de hoy?

.....
.....



ENCUESTA DE OPINIÓN

Te pedimos que respondas con sinceridad a las preguntas que se te formulan seguidamente:

1) Con relación al taller de: **Energías Renovables**

¿Te resultó interesante la actividad propuesta? Si

¿Aprendiste algo nuevo? Si

¿Consideras que la lectura y la escritura son herramientas básicas y necesarias? ¿Por qué? Si porque de esta manera conocemos y aprendemos

2) Menciona dos aspectos positivos de las actividades realizadas

a) Se realizo el experimento ... b).....

3) Señala dos aspectos negativos

a) Ninguno ... b) Ninguno

3) ¿Qué sugerencias aportarías para mejorar las actividades como las realizadas en el día de hoy?

Ninguna
.....

Figura 17 y Figura 18: Encuestas finales solicitadas a los alumnos

6. CONCLUSIÓN

Se realizaron los seis talleres programados para la primera etapa del PROYECTO DE MEJORA DE LA FORMACION EN CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES EN LA ESCUELA

ISBN: 978-987-1676-63-7

SECUNDARIA, cumpliéndose de esta forma con los objetivos propuestos en la Actividad: ENFOQUE AMBIENTAL DE LA ENERGIA Y USO DE ENERGÍAS RENOVABLES.

Durante los encuentros y a través de los filmes proyectados, los alumnos tomaron conciencia de los inconvenientes surgidos por el uso indiscriminado de los combustibles fósiles. Además, valoraron, asumieron y se comprometieron con el consumo racional de los hidrocarburos. Manifestaron así, de manera espontánea, la propuesta de utilizar otras fuentes alternativas de energía, renovables, accesibles y controlables.

Con los talleres sobre Energías Renovables, los estudiantes se familiarizaron con las leyes generales de la energía solar, aprendiendo a observar, comparar y analizar los diversos fenómenos energéticos, lo que les permitió comprender, internalizar y aplicar el método científico.

La utilización de los dispositivos solares posibilitó el conocimiento y desarrollo de las habilidades en el uso de instrumentos de medición y equipamiento de laboratorio.

Los alumnos demostraron interés en los temas propuestos referidos a la utilización de las fuentes renovables durante las experiencias teórico-practicas desarrolladas en los encuentros, los cuales han sido notablemente satisfactorios. El entusiasmo y capacidad para trabajar en grupo se plasmaron en las encuestas efectuadas a los estudiantes después de finalizar las prácticas.

Es importante mencionar el deseo manifestado por los estudiantes para conocer la oferta académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, por lo que algunos alumnos asistieron al Centro de Estudiantes de la Institución para mayor información.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Anderson, B.(1976), "*The Solar Home Book - Heating, Cooling and Designing with the Sun"* Cheshire Books, EE.UU.

[2] Aroca Lastra, S. (2007)- *"El Control de Las Instalaciones de Climatización",* Apuntes de la Cátedra.UNED – España. Año académico 2007/2008.

[3] CENSOLAR (2001) *"Sistemas de Aprovechamiento Térmico I"*, Instalaciones de Energía Solar, 2º edición, Tomo III , PROGENSA

[4] CENSOLAR (2001) *"Sistemas de Aprovechamiento Térmico II",* Instalaciones de Energía Solar, Tomo IV , PROGENSA

[5] Gudiño, D., Mendoza, M. y Hermosillo, J.(1994), *La Energía Solar y sus Aplicaciones*. ITESO.

[6] Duffie, J. y Beckman, W. (1980): *Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley Interscience*.

[7] Halacy, D. (1998): *"Home Energy"* EE.UU.

[8] Hermosillo, J. (1998): *Destilación Solar*. Cuaderno Huella #16, ITESOT widell, John y Weir, Tony: Renewable Energy Resources. E. and F.N. Spon.

[9] Humm, O.(1998*),"Niedrig Energie und Passiv Häuser"* (Bajo Consumo de Energía y Casas Pasivas) Ökobuch Verlag, Alemania.

[10] Mayer F. (1992*),"Calentador Solar con Estanque integrado al Colector"* II Seminario Nacional de Energía Solar, 9 – 10 – 11 de Septiembre de 1992, La Paz, GTZ, UMSS, UMSA.

[11] Margevicius, J, Schorgmayer, H.(1981),"*La Energía Solar y su Aplicación en Calentadores Solares*" Universidad Católica Madre y Maestra, Departamento de Publicaciones, República Dominicana.

[12] Szokolay, S. (1978) *"Energía Solar y Edificación",* 2º Edición, Blume

[13] Gropelli, E., Giampaoli, O. *"El camino de la biodigestiòn"*, Ediciones Universidad Nacional del Litoral-PROTEGER, 2001

[14] Hilbert J., *"Manual para la producción de Biogás"* Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar – 2010

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Nordeste y al Ministerio de Educación de la Ciudad de Corrientes, por el apoyo brindado al grupo G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables) perteneciente a la Facultad de Ingeniería, durante las actividades realizadas para la concreción del Proyecto: Mejora de la Formación en Ciencias Exactas y Naturales en la Escuela Secundaria.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EL NUEVO ROL DEL USUARIO/GENERADOR EN LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA

María I. Sosa

GECCU, Departamento de Mecánica – Universidad Nacional de La Plata
Calle 48 y 116, 1900 La Plata, Pcia Buenos Aires, Argentina
misosa@ing.unlp.edu.ar.

RESUMEN

A raíz del marcado agotamiento de recursos no renovables y la contaminación del medio ambiente por procesos de conversión de recursos fósiles, existe una imperiosa necesidad de implementar medidas del uso racional de los recursos energéticos. En este contexto la generación distribuida GD a partir de energías renovables cumple un rol importante.
Utilizar las tecnologías de GD ayuda a solucionar parte de los problemas del mundo energético actual, a saber: escasez de recursos energéticos y económicos, contaminación ambiental, entre otros. Una ventaja de este tipo de solución es disminuir la vulnerabilidad de los actuales sistemas centralizados. El hecho de generar la energía "in situ", a partir de recursos como el viento, el sol o residuos orgánicos, y consumirla en nodos específicos de la demanda, evita pérdidas propias de la transmisión de energía a grandes distancias.
En los últimos tiempos se vislumbran cambios en la política energética de varias provincias argentinas, como ser: Mendoza, Salta y Santa Fe, donde ya se ha aprobado el aprovechamiento de las energías renovables a través de generación distribuida. La nueva legislación permitirá inyectar energía generada por medio de fuentes de energía renovable a la red de media y baja tensión. A través de un medidor especial se determinará el excedente de energía que aporta el usuario a la red, obteniendo un beneficio económico en su factura por el excedente de energía generada inyectada a la red.
El nuevo rol de usuario/generador constituye un cambio en la legislación energética. Se analiza las implicancias de la nueva legislación a nivel provincial, marcando el hecho que actualmente no existe una legislación a nivel nacional que lo permita.

Palabras Claves: *Generación distribuida, usuario/generador, energías renovables.*

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del Uso Racional de la Energía, URE, es la producción del efecto deseado con el mínimo consumo de recursos primarios y la mínima afectación del medio ambiente, (1). En este contexto, el concepto de Generación Distribuida (GD) se refiere al uso estratégico de unidades modulares de generación eléctrica, instaladas en forma aislada para proporcionar un servicio específico, o interconectadas a las redes de distribución de electricidad en la cercanía de los consumos, para reducir el costo del servicio y mejorar la calidad de la energía entregada. Las tecnologías consideradas en este concepto toman importancia en el desafío de un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos renovables.

Actualmente es reconocido el valor económico y ambiental que proporcionan los sistemas energéticos distribuidos basados en instalaciones de pequeña escala a saber: modularidad, reducción del periodo de entrega, diversidad de combustible y reducción de la vulnerabilidad en cuanto a precios, confiabilidad y resistencia, bajo requerimiento de obras civiles y redes de transporte, reducción de pérdidas y conexiones, control local y comunitario, reducción (y a veces, eliminación) de emisiones y de otros impactos ambientales.

Independiente de la estructura de mercado, una alternativa para aumentar la capacidad de generación centralizada y tradicional es hacerlo de forma distribuida. La existencia de nuevas tecnologías de microenergía con potencias del orden de pocos kW o decenas de kW con bajos niveles de contaminación abre la puerta a la producción de energía en el mismo lugar donde se precisa, evitando la necesidad de construir grandes centrales térmicas y redes de transporte.

Entre las tecnologías consideradas en el concepto de GD podemos mencionar la generación eólica y la generación solar, las cuales son dependientes de factores climatológicos. La radiación solar juega un papel preponderante en la generación, como así también la frecuencia e intensidad del viento en la generación eólica. Otras tecnologías, como ser celdas de combustible, cogeneración, pueden generar energía en cualquier momento sin dependencia de factores climatológicos.

2. LA GENERACION DISTRIBUIDA

La Generación Distribuida (GD) es la producción de energía eléctrica con generadoras medianas y/o pequeñas, ubicadas en los centros de consumo que se conectan directamente a la demanda o en sus cercanías conectadas a las redes de distribución. Estas plantas generadoras están conectadas a una red isla autónoma cuyos consumos abastecen con prioridad a un grupo de usuarios, mientras que los excedentes van a suplir el déficit de islas vecinas. Así, en GD una falla afecta solamente a la isla y no al resto del sistema. Con ello se logra mayor seguridad de suministro, menor congestión de las redes troncales y una reducción sustantiva de las pérdidas de transmisión y distribución.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la generación tradicional (Figura 1) la energía se genera por ejemplo en una central termoeléctrica. A través de las redes de suministro se transporta y distribuye en los centros urbanos, fábricas y nodos de demanda eléctrica. Una falla en el sistema aborta el suministro de todos los demandantes.

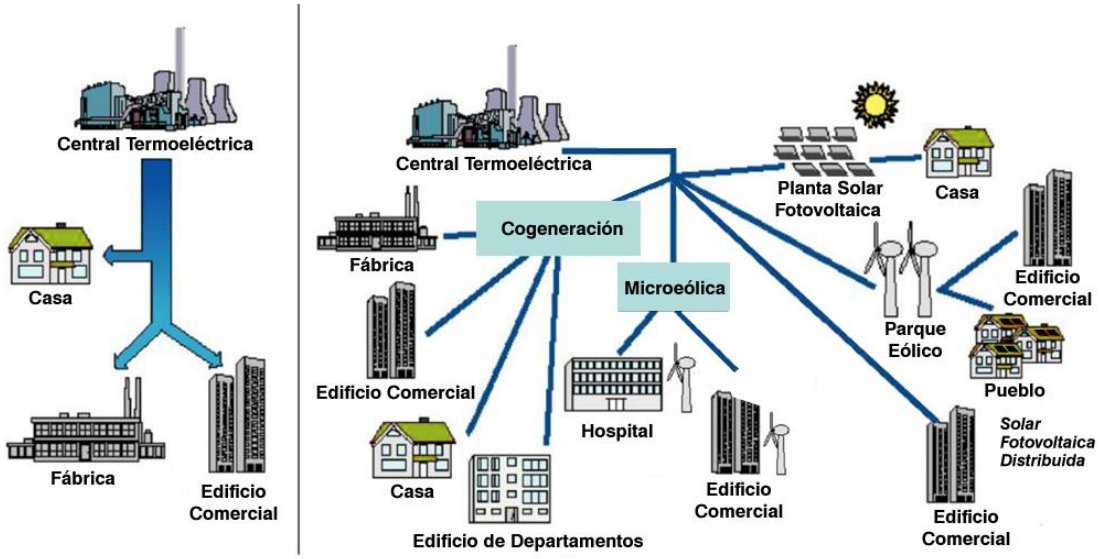


Figura 1: Generación convencional y distribuida

Utilizando el concepto de GD cada uno de los usuarios demandantes de energía pueden generar su energía en forma parcial, total y/o con o sin excedentes. Así una vivienda familiar puede generar y exportar los kWh excedentes. Grandes emprendimientos como ser una planta solar fotovoltaica o un parque eólico generan solo para distribuir en la red. La cogeneración pensada como la generación simultánea de calor y energía eléctrica juega también un rol importante en este concepto ya que hace un uso racional de los recursos fósiles o no fósiles. La GD diversifica la generación permitiendo resolver rápidamente conflictos en caso que el sistema falle. La generación es por islas y no afecta a todo el sistema interconectado.

El hecho de generar la energía "in situ" y consumirla en nodos específicos de la demanda, evita pérdidas propias de la transmisión de energía a grandes distancias. Ello hace más eficiente al sistema de distribución equilibrando demandas, lo que disminuye cortes de luz provocados por la falta de inversión en líneas de distribución.

3. LA LEGISLACIÓN DE LA GENERACIÓN TRADICIONAL

El Mercado Eléctrico Mayorista MEM es un mercado donde se comercializa básicamente energía y potencia eléctrica, regulado por el Marco Regulatorio. El artículo 4° de la Ley 24065 (2), que rige a nivel nacional, establece los actores reconocidos que participan en dicho mercado, a saber:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Generadores
- Transportistas
- Distribuidores
- Grandes Usuarios. Compuesto por
    - GUMA (Grandes Usuarios Mayores)
    - GUME (Grandes Usuarios Menores)
    - GUPA (Grandes Usuarios Particulares)
- Cogeneradores
- Autogeneradores
- Comercializadores de demanda y de oferta

Las actividades se dividen en dos: *servicios públicos* y *actividades de interés general*. La primera se refiere a la realizada por los transportistas y distribuidores, según la Ley 24065, art. 1°,(2). El servicio público según la Ley 15336, art. 3°, se define como la distribución regular y continua de energía eléctrica para atender las necesidades indispensables y generales de electricidad de los usuarios de una colectividad o grupo social determinado. La segunda está definida como actividades de la industria eléctrica destinada total o parcialmente a abastecer de energía a un servicio público, afectadas a dicho servicio.

Los Autogeneradores y Cogeneradores deberán cumplir los mismos requerimientos técnicos que los establecidos para los Generadores del MEM, en lo que respecta a disponibilidad de reactivo, regulación de frecuencia, sistemas de medición en tiempo real, etc., estando sujetos a las mismas penalidades y descuentos por dichos rubros.

En la tabla siguiente se comparan las características de cada uno de los actores del MEM. Un autogenerador debe tener una potencia instalada superior a 1 MW, restringiendo la compra de energía al 50% de la demanda.

Tabla 1: Potencia instalada, compra de energía, venta de energía y compra de backup

	Cogenerador	Autogenerador	GUMA	GUME	GUPA
Potencia Instalada	> 1 MW	> 1 MW	> 1 MW	> 0,3 MW < 2 MW	> 0,3 MW < 0,1 MW
Compra de Energía	No habilitado	< 50% demanda	> 50% demanda en MT	100% demanda en MT	100% demanda en MT
Venta de Energía	Sin restricciones	Sin restricciones	Excedente del contrato en MSp	No habilitado. Lo regala	No habilitado Lo regala
Compra de Backup	No habilitado	No habilitado	Habilitado	Habilitado	Habilitado

MT = Mercado a Término MSP= Mercado Spot

ISBN: 978-987-1676-63-7

Este Marco Regulatorio (2) no permite la inyección de pequeñas potencias resultantes de la microgeneración. Básicamente está ideada para grandes generadores (centrales térmicas, hidráulicas o nucleares) y contempla la distribución y el transporte a través de las redes eléctricas.

4. LEY DE ENERGÍAS RENOVABLES

El Gobierno Nacional aprobó el 30/03/2016 el Decreto 531/2016, Régimen de Fomento Nacional para *el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Reglamentación* (3), reglamentando la Ley de Energías Renovables. Este decreto fue sancionado por el Congreso en el último semestre de 2015 con el apoyo de la mayoría de las fuerzas políticas y establece que en 2017 el país deberá contar con el 8% de su generación eléctrica a partir de electricidad generada por el viento, el sol o las pequeñas centrales hidroeléctricas, entre otras fuentes. La norma impulsa a elevar al 20% para el 2020. Asimismo establece la conformación del FODER, *Fondo Fiduciario para el Financiamiento de Proyectos de Inversión*, para el cual se destinará el 50% del ahorro en combustibles líquidos generado por la sustitución con energías renovables.

5. LA GENERACION DISTRIBUIDA EN LA NUEVA LEGISLACION

En la nueva legislación de GD la generación energía eléctrica deberá ser generada a partir de fuentes de energía renovable como solar, eólica, geotérmica, biomasa e hidráulica. La aplicación de energías renovables de forma distribuida es un campo inmenso de gran potencial de desarrollo en nuestro País, siendo aplicable en forma doméstica o en edificios gubernamentales y corporativos.

El elemento primordial es la fase de conexión entre el generador y la red. Se colocará un medidor convencional y otro bidireccional digital que mide en ambos sentidos la energía inyectada, la consumida y la neta. El proceso de facturación posterior se conoce como *balance neto* o *net metering* y se divide en tres etapas:

- se factura la totalidad del consumo con su tarifa normal
- se calcula el consumo como suma de lecturas de los dos medidores
- se descuenta la energía generada al precio de compra en MEM.

La generación descentralizada a partir de energías renovables disminuye las emisiones de carbono y minimiza pérdidas por transporte y distribución de la energía generadas en la distribución tradicional. Por otro lado, este tipo de generación permite al usuario darle una detallada dimensión de su consumo eléctrico, permitiéndole adoptar medidas que contemplen el uso racional de la energía.

Actualmente en Argentina los subsidios a la electricidad de red son muy altos y conducen a que la generación a través de energías renovables no sea rentable en regiones con acceso a la red de electricidad. La GD tiene una gran oportunidad en regiones donde no se tiene acceso o la conexión es cara debido a la distancia del sistema distribuidor.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. SITUACIÓN ACTUAL EN ARGENTINA

Actualmente en Argentina no existe un marco regulatorio a nivel nacional para conectar pequeños sistemas a la red. No obstante varias provincias han comenzado a implementar sistemas de generación distribuida a partir de energías renovables, fijando políticas y condiciones administrativas, contractuales, técnicas y económicas para conectar las instalaciones de producción de energía eléctrica de usuarios a las redes de distribución de energía eléctrica en media y baja tensión.

7. REGULACIÓN A NIVEL NACIONAL

La GD se relaciona con aspectos ambientales y con aspectos económicos, ya que a partir de la pérdida del autoabastecimiento el país debe erogar miles de millones de dólares para importar combustibles. En Argentina no hay una regulación a nivel nacional sobre la energía renovable distribuida para pequeños sistemas conectados a la red. A pesar de ello, algunas provincias han avanzado de manera individual en legislación local para promover este tipo de generación en sus territorios. Existen diferentes proyectos de ley en el Congreso de la Nación dedicados a habilitar la generación distribuida a nivel nacional que aún esperan ser debatidos. Durante los años 2013 y 2014 varias organizaciones buscaron sin éxito incluir esta posibilidad en el debate por la reforma de la ley 26.190 de *Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción* de *Energía Eléctrica* (3).

8. LEGISLACIÓN A NIVEL PROVINCIAL

Las provincias pioneras son Santa Fe (2009), Salta (2014) y Mendoza (2015). Estas cuentan con un marco regulatorio para la inyección de energía a la red generada por medio de fuentes renovables por usuarios residenciales, comerciales e industriales, a cambio de un resarcimiento económico.

8.1 Santa Fe

Santa Fe fue la primera provincia argentina en habilitar la conexión a la red de sistemas distribuidos de energía renovable. La Resolución N° 442 del 2 de octubre de 2013, (4), de la Empresa Provincial de Energía (EPE), establece el procedimiento para el tratamiento de solicitudes de generación en isla o en paralelo con la red de la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe.

A través del procedimiento PRO-103-101 14, se establecen los requerimientos técnicos a cumplimentar por los clientes de la distribuidora para operar grupos de generación conectados a la red. Para los usuarios conectados a la red de baja tensión, sólo se permite la conexión de energía eléctrica cuyo origen sean fuentes renovables. Para la aprobación del proyecto un individuo debe presentar una propuesta con el tipo de tecnología a utilizar y la capacidad de generación. Cabe destacar que no se ofrece al usuario/generador los fondos necesarios para realizar la inversión,

tampoco se le garantiza la venta de su sobrante de energía producida. Esto no representa un incentivo concreto para que consumidores inviertan en sistemas renovables.

8.2 Salta

En junio de 2014 se sancionó la Ley 7824 de *Balance Neto, Generadores Residenciales, Industriales y/o Productivos*, (5). La normativa se enmarca en el *Plan de Energías Renovables*, que propone "el establecimiento de las condiciones administrativas, técnicas y económicas" para que usuarios puedan conectar hasta 100 kW de potencia a la red de baja tensión. Para transformarse en generador, el usuario deberá solicitar el permiso para entregar sus excedentes a la empresa que tenga la concesión de la distribución de la energía eléctrica en la provincia.

El Ente Regulador de los Servicios Públicos (ENRESP) será el encargado de determinar el valor que se deberá abonar por la generación de energía. A priori, la legislación en su artículo 9, establece que la remuneración deberá ser acorde al pago en el MEM para generaciones de igual tipo y origen al momento que se inyecte la energía en la red. Las compensaciones o pagos serán pactados entre las partes.

Por otro lado, el gobierno de la provincia, creó un *Régimen Promocional de Inversiones*, por el que pretende brindar créditos de hasta un 70 % del costo de los equipos a devolver en 5 cuotas anuales, a partir del sexto año a valor histórico. Al igual que en el caso de la provincia de Santa Fe, el instrumento de precio establecido es una modalidad de balance neto que no genera las mejores posibilidades para la promoción y desarrollo de las fuentes renovables distribuidas.

8.3 Mendoza

En el mes de marzo de 2015, el EPRE Mendoza reglamentó las condiciones técnicas para la operación y facturación de excedentes volcados a la red eléctrica de distribución (Resolución EPRE Nº 019/15, expte EPRE Nº 419-E-2013-09-80299), (6). Según ella, las fuentes de energía a utilizar son: eólica, solar, geotérmica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, biogás, aprovechamiento de energía hidráulica de ríos, canales y demás cursos de agua pública.

8.4 San Luis

En el mes de noviembre de 2014, el gobierno de la provincia de San Luis remitió a la legislatura provincial un proyecto de *Ley de Promoción y Desarrollo de Energías Renovables*, (8). El texto presentado prevé la implementación de incentivos fiscales para promover la generación de energía limpia desde megaproyectos de generación hasta la producción que se pueda realizar de manera doméstica. Mediante el *Plan de Incentivos de Energías Renovables (PIER)* se pretende otorgar beneficios a los que realicen proyectos de generación de energía renovable en la provincia y se creará un registro local de generadores de energías limpias. La nueva normativa también prevé la implantación de un Fondo de Fomento de las Energías Renovables para la realización de obras de infraestructura y el cofinanciamiento de los proyectos de investigación y desarrollo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este sentido, el Gobierno de la Provincia declaró a La Calera como la primera localidad termosolar del país, trabaja en la declaración de la segunda (Batavia) y ya diseñó el primer barrio bioclimático. Estas viviendas estarán equipadas y diseñadas con la tecnología bioclimática. Se les suma un nuevo beneficio: la posibilidad de producir energía, inyectarla a la red eléctrica y que la empresa prestataria del servicio descuente cada mes ese aporte. Este sistema beneficia al medioambiente, pero fundamentalmente al vecino, reduciendo los costos en el pago de servicios, y convierte a San Luis en una provincia en contar un este beneficio.

8.5 Neuquén

Neuquén trabaja en una ley para promover la generación distribuida. El EPEN ya cuenta con pruebas pilotos de panel solares/fotovoltaica en El Chañar, en San Martín de los Andes y se ha comenzado a trabajar en un nuevo proyecto en Centenario, (9). La provincia busca que los usuarios particulares de las redes de baja y media tensión puedan generar energía por medio de una pantalla solar o un aerogenerador e inyectar el excedente a la red. A principio de marzo, el Poder Ejecutivo presentó en la Legislatura el proyecto de *Ley Generación Distribuida con Energías Renovables*, el cual tiene por objetivo fijar políticas y condiciones administrativas, contractuales, técnicas y económicas para conectar instalaciones de producción de energía eléctrica renovable a la red de distribución en media y baja tensión.

9. REGULACIONES A NIVEL REGIONAL

La generación distribuida no es un concepto nuevo, dado que hace años se aplica en países de la Unión Europea como ser en Alemania, Holanda, Portugal, Grecia, Italia, Dinamarca, así como también en Japón, Australia, Estados Unidos, Canadá y México. A nivel regional en varios países limítrofes ya existen regulaciones que autorizan a los generadores residenciales a integrarse a la red y que buscan promover el desarrollo de las renovables mediante la generación distribuida.

Uruguay mediante el Decreto 173/2010, (10), autoriza a los usuarios de la red de energía eléctrica de baja tensión a instalar generadores de origen renovable.

Brasil cuenta desde el año 2012 con una resolución de la Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL) (RES. NORM. Nº 482/2012), (11), que establece las condiciones para el acceso de micro (< 100 kW) y mini (< 1 MW) generadores distribuidos a los sistemas de distribución de energía eléctrica bajo el régimen de facturación conocido como balance neto.

Chile regula desde marzo de 2012 el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales mediante la Ley 20571/2012, (12). Esta ley abre la puerta a que los pequeños productores de electricidad con energías renovables inyecten su excedente a la red eléctrica bajo el esquema de balance neto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

10. CONCLUSIONES

El creciente aumento de la demanda por productos energéticos requiere de una política de diversificación de fuentes energéticas para poder garantizar un abastecimiento estable de energía a los distintos sectores consumidores.

A nivel provincial la legislación sobre GD permite y permitirá inyectar energía generada por medio de fuentes de energía renovable a la red de media y baja tensión. Usuarios con suministro en baja tensión podrán conectar ahora equipos. Esta metodología constituye un instrumento regulatorio innovador en nuestro País que permitirá e incentivará la inversión en generación con energías renovables. Además constituye un marcado cambio en la legislación energética, ya que según el Marco Regulatorio a nivel nacional no se le permitía al usuario ser generador. Aparece por lo tanto el nuevo concepto de usuario/generador.

En varias provincias argentinas: Mendoza, Salta y Santa Fe entre otras, se ha aprobado el aprovechamiento de las energías renovables a través de la generación distribuida GD. Las regulaciones permiten la conexión bajo el sistema de tarifas de balance neto o net metering.

Dado el subsidio actual a las tarifas de la energía, este sistema en muchos casos no ofrece en muchos casos al potencial usuario/generador incentivo económico para instalar equipos de renovables. La medida puede llegar a ser ineficiente en el desarrollo real de la generación distribuida, si no se asegura al usuario/generador poder vender excedentes de energía a precios competitivos.

11. REFERENCIAS

[1] Sosa M. I., *Uso Racional de la Energía y la Cogeneración en Argentina*, VIII Congreso latinoamericano de Generación y Transporte de la Energía Eléctrica, ISBN 978- 85-61065-01-0 Código: 02-046 Pág. 1-9, 2009.

[2] Leyes 15.336 y 24.065*, Decretos Reglamentarios N° 2.073/61 y 1.398/92, Generación, transporte y distribución de electricidad,* 1992.

[4] Ley 26.190 Decreto 531/2016, *Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Reglamentación*. 2016.

[5] EPE, Resolución N° 442 del 2/10/2013, Procedimientos Santa Fe, 2013.

[6] Ley 7824 de Balance Neto, Generadores Residenciales, Industriales y/o Productivos, Salta, 2014.

[7] EPRE-Mendoza*, Disposición GTR N° 0054/15 Asunto Modificación Anexo 11- Requisitos técnicos R*esolución EPRE n° 019/2015, 2015.

[8] EPRE-Mendoza, Expte N° 419-E-2013-09-80299, "*Proyecto de Reglamentación arto 11 Ley 7.549 - Condiciones Técnicas para la Operación y Facturación de excedentes de energía volcados a la red eléctrica de distribución*", 2013.

[9] *Ley de Promoción y Desarrollo de Energías Renovables*, San Luís, 2014.

[10] *Ley Generación Distribuida con Energías Renovables*, Neuquén, 2016.

[11] *Decreto 173/2010*, Uruguay, 2010.

[12] Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL), *Resolución Normativa Nº 482/2012*, Brasil, 2012

[13] *Ley 20571/2012*, marzo de 2012, Chile, 2012.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE UNA BOMBAS CENTRIFUGAS STANDARS OPERANDO COMO TURBINAS HIDRAULICAS (BUTUs)

Orlando Aníbal AUDISIO[1].
Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (LA.M.HI.) – Departamento de Mecánica Aplicada
Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue (UNCo)
Calle Buenos Aires 1400 – (Q8300BSX) Neuquén Capital – Patagonia Argentina
Tel. 0299-4490300 Int. 404 ; Fax 0299-44490329 - E-Mail: orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

Una alternativa económica para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos es utilizar bombas como turbinas. Las bombas se producen en serie y están disponibles para un amplio rango de alturas y caudales. Ensayos experimentales han mostrado que las bombas operando en reverso pueden sustituir a las turbinas, con alta eficiencia en pequeñas potencia.

El trabajo presenta una investigación experimental a través de la caracterización funcional de una bomba centrífuga utilizada como turbina realizado a energía neta específica constante de 25 m.c.a. y velocidad de rotación variable.- Se midieron parámetros hidráulicos y mecánicos para determinar rendimientos energéticos para el funcionamiento en el modo turbina.

Además, se muestran características de la máquina para varias velocidades de rotación, y se comparan caudales y alturas a fin de observar la influencia de la rotación en la eficiencia y las características en carga constante.

El objetico es buscar metodologías para inferir el comportamiento en el modo turbina de manera confiable y de aplicación universal. Sin embargo, y con el fin de predecir las características de turbina con más precisión, esto requiere de un importante número de datos de tipo experimental y post procesamiento con herramientas estadísticas.

Los resultados permitieron inferir la existencia de correlación entre parámetros del mismo tipo en ambos modo de operación que no está explicada por el rendimiento ni por la velocidad específica en ningún modo de operación. Además, se concluye que la performance hay que determinarla considerando puntos de vista operativos; la bomba y la bomba operando como turbina son máquinas distintas, con escurrimientos fluidodinámico distintos. Esto último queda confirmado cuando se determina el trabajo específico intercambiado en el rodete para el modo turbina.-

Por lo desarrollado y resultados obtenidos se infiere que la hipótesis básica propuesta de la no existencia de una correlación explicada con parámetros de semejanza o similitud hidráulica es razonable.

Palabras Claves: energía hidráulica, tecnología, Bombas como Turbinas, Energías Renovables; Pequeñas fuentes de energías.

[1] Integrante PI 04/I 076 - UNCo

EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF A CENTRIFUGAL PUMPS STANDARS running as HYDRAULIC TURBINES (BUTUs)

ABSTRACT:

An economic alternative for small hydroelectric plants is to use pumps as turbines. The pumps are mass produced and are available for a wide range of heights and flows (turbines are designed for each site). Experimental tests have shown that pumps operating in reverse can replace turbines with high efficiency small power. In general, manufacturers give performance curves for the pump mode and not for the turbine mode.

Due to the fixed geometry, the flow conditions within the housing and impeller narrow restrictions are therefore used as a pump turbine (BUTUs) have a very low efficiency at part load. This is one of many problems to solve in the context of small hydro plants equipped with BUTUs.

The operation of centrifugal pumps as turbines may be useful to produce energy at low cost and with a wide range of applications in remote rural areas of Argentina, A & L and C or in developing nations. However, the optimal coupling between the flow and geometry of the machine cannot' be maintained in working conditions reverse, and hopefully in that mode of operation, flow instabilities, decline in yields, vibrations, etc.

The paper presents an experimental research through functional characterization, inferred experimentally, a centrifugal pump used as turbine, hydraulic and mechanical parameters were measured analog and digital way to determine energy performance for operation in the turbine mode. It also shows characteristics of the machine for several rotation speeds, and heights and flow rates are compared to observe the influence of rotation on the efficiency and constant load characteristics.

.

Keywords: hydropower technology, pumps as turbines, renewable energy; Small energy sources.

NOMENCLATURA

D_2	Diámetro Exterior Impulsor
b_2	Ancho Impulsor en D2
Ht	Altura Ideal o Teórica
H_P, H_B	Altura en Modo Turbina y Modo Bomba
K_Q	Coeficiente de Caudal o Flujo
$K_{H\,B}$	Coeficiente Altura en modo Bomba
$K_{H\,T}$	Coeficiente Altura en modo Turbina
K_{NB}	Coeficiente de Potencias-Modo Bomba
K_{NT}	Coeficiente de Potencias-Modo Turbina
Q	Caudal Volumétrico [m^3/s]
T	Par o Torque [N m]
u_2, u_1	Velocidad Periférica del Impulsor
u_{2u}, u_{2m}	Componente de la Velocidad Absoluta en la dirección tangencial y Meridiana
z	Numero de alabes del rotor
β_1	Angulo del alabe
η_{hB}, η_{hT}	Rendimiento hidráulico para el modo Bomba y modo Turbina
η_B, η_T	Rendimiento global de la Bomba y/o Turbina
ρ	Densidad del Fluido [kg_m/m^3]
ω	Velocidad de Rotación [rad/s]
n	Velocidad de Rotación [RPM]
n_{sB}	Numero Especifico bomba

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El uso las bombas centrifugas como las turbinas (BUTUs) ha sido un tema de investigación muy abordado en los años 70. Todo esto comenzó cuando Thoma, en el año 1931 encuentra de manera accidental, cuando estaban tratando de evaluar las características completas de una bomba, que las bombas funcionan de manera eficiente en el modo de turbina. El funcionamiento en modo turbina se convirtió en un tema de investigación importante para muchos fabricantes de bombas eran propensos a las condiciones de operación anormales.
Knapp[2] en el año 1937 publica las características completa de una bomba completas sobre la base de una investigación experimental.

En los años 1950 y 1960, el concepto de las centrales de acumulación por bombeo se desarrolló principalmente en los países desarrollados para gestionar los requisitos de potencia pico; en este contexto las BUTUs, encontraron una de sus aplicaciones importantes, lo que abrió un importante panorama para la investigación de este campo. Sin embargo, la capacidad de dichas plantas fue del orden de 50 MW a 100 MW, y en un reducido número de instalaciones.

En los últimos años las industrias químicas se convirtió en otra área de la aplicación del las BUTUs. En ciertos procesos químicos era necesario disipar la energía de los fluidos de alta presión a través de pequeñas longitudes de tubo. En lugar de instalar estrangulamientos simple, se instalaron BUTUs para hacer la tarea de reducción ya la vez se recupera parte de dicha energía. Incluso en las redes de abastecimiento de agua se está utilizando dicha aplicación.

En los últimos años, las pequeñas y micro centrales hidroeléctricas se ha convertido en una nueva área de aplicación para las BUTUs, donde son destinadas para reemplazar las turbinas hidráulicas dado el costo de estas últimas. Estos son a menudo sistemas de energía descentralizados de potencias instalada inferior a 100 KW. Debido al enorme mercado para las bombas, y en todos los tamaños posibles, es de fácil disponibilidad, son baratas y confiables. También con respecto al mantenimiento que tiene muchas ventajas en comparación con las turbinas.

2. INTRODUCCIÓN

Debido al agotamiento de los recursos naturales y los problemas ambientales globales, hay una necesidad de desarrollar fuentes de energía renovables con el mínimo impacto ambiental. Una de las técnicas más madura para la generación de energía renovable es hidroeléctrica.

Un gran número de pequeños proyectos hidroeléctricos han aplicado esta tecnología lo que hace que hoy en día la misma tenga un grado de madurez bastante interesante; pero esto aún no ha podido ser llevado a casos de centrales hidroeléctrica de gran escala, principalmente, porque los beneficios que tienen las economías de escala, no siempre resultan viables en cuanto se ponderan aspectos tecnológicos, económicos, políticos y/o ambientales. Por consiguiente, el interés en la generación de energía eléctrica hidráulica a pequeña escala es cada vez mayor.

Sin embargo, los costos de construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas equipadas con turbinas hidráulicas son relativamente altos en comparación con la cantidad de energías generada. La alta inversión inicial y los altos costos constructivos limitan la posibilidad de su aplicación; aspectos estos que de poder reducirse implicaría para la pequeña escala, ser generalizada, especialmente en regiones rurales aisladas de nuestro país, y el mundo.

[2] Knapp, R.T. 1937, Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behaviour; Trans. ASME, vol. 59, pp 683-689.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este contexto, para la generación de energía en baja y muy baja potencia (menos de 100 kW), la posibilidad de utilizar bombas operando como turbinas (BUTUs), resultaría relevante porque, a pesar de que hay una reducción en la eficiencia, hay una reducción significativa en el costo de capital de la planta del orden del 10% y en ciertas circunstancias puede llegar hasta un 50%.

Debido a la geometría fija, las condiciones de flujo dentro de la carcasa y el impulsor están muy acotadas, por ello una BUTUs tienen un rendimiento muy bajo a cargas parciales. Este es uno de los problemas a resolver en el contexto de las pequeñas centrales hidráulicas equipadas con BUTUs.

Además de esto a menudo se llegado a notar que los datos previstos sobre rendimiento de los equipos no coinciden con los valores obtenidos experimentalmente. Por lo tanto, se torna un gran desafío, la selección de una buena bomba para que pueda operar como turbina,. Una BUTUs es muy sensible hacia el cambio de parámetros de altura y caudal. De aquí que una mala selección de una bomba dará lugar a un corrimiento del punto de trabajo, la entrega de una potencia no deseada y en última instancia puede incluso causar el fracaso del proyecto.

La operación en forma reversa de una bomba centrifuga ha sido investigada anteriormente por Kittredge [2], Knapp [3], y Stepanoff [4] pero la tecnología para su uso en la generación de energía eléctrica no estaba disponible en ese momento. Sin embargo, los avances en las tecnologías de control de máquinas eléctricas, que permiten la regulación de tensión y frecuencia (par y sentido de giro) con velocidad variable, han llevado a la posibilidad de utilizar las bombas en modo reverso para la generación de energía. A diferencia de una turbina convencional, una turbina desarrollada a partir de la operación reverso de una bomba implica el no tener álabes de guía; por lo tanto, las características de descarga variables son ligeramente diferentes a, por ejemplo, la turbina de Francis.

Sin embargo, una BUTUs tiene ventajas tales como calidad uniforme, construcción simple y robustez y durabilidad. Una bomba operando en reverso como turbina presenta casi la misma eficiencia que la bomba, lo que hace que estos equipos puedan competir con otro tipo turbinas. Otro aspecto relevante es el escaso número de piezas, lo que permite un fácil mantenimiento.

El diseño geométrico de las bombas, por lo general, es concebido para tener una interacción fluidodinámica óptima entre impulsor y voluta para las condiciones hidráulicas nominales. En esta situación, el flujo coincide adecuadamente con la geometría de la máquina, y por tanto, las inestabilidades de flujo se reducen a un mínimo. Por el contrario, estas condiciones de acoplamiento óptima no se pueden mantener cuando la bomba funciona en modo inverso y a la misma velocidad de rotación que el modo bomba; aspecto este muy marcado en la unidades tipo monoblock donde el motor es utilizado como generador.

Cuando la bomba opera como turbina, se observa que el punto de máxima eficiencia se desplaza hacia un caudal más alto que el correspondiente al óptimo en el modo bomba. Además, y debido a la forma de la curva característica de rendimiento (bastante plana para altas velocidades de flujo), se recomienda que el caudal en modo inverso sea mayor que el caudal de diseño de la bomba. En consecuencia, se espera que las inestabilidades de flujo y el desequilibrio radial generados en modo de operación como turbina sean mayores.

La mayoría de los estudios realizados se basan en la hipótesis de la similitud entre las eficiencias máximas de trabajo en ambos modos, que no es fácil de mantener, y otros estudios se basaron en las relaciones algebraicas en función de la eficiencia, que por cierto también representa un parámetro de similitud o que está involucrado en ellas. Todos ellos se han alcanzado teniendo en cuenta las velocidades de rotación iguales en ambos modos de trabajo.

El presente trabajo tiene por objeto el mostrar las características de una bomba centrífuga trabajando en modo reverso; es decir trabajando en modo turbina. Además, mostrar la viabilidad de

utilizar las bombas en modo turbina en pequeñas centrales hidroeléctricas, y regular su potencia por medio de las variaciones en la velocidad de giro del conjunto turbina-generador-. Para llevar a cabo esto se ha adecuado y caracterizado instalaciones hidráulicas de un laboratorio. La bomba a ensayada (n_{SB}=36,87) es operada a través de una freno dinamométrico a corrientes parasitas (efecto Foucault).

3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El rendimiento de la bomba, que operan ya sea en el modo normal o reverso, fue probado en un banco de ensayo el cual responde a las normas ISO 3555: 1977 [1]; sus instalaciones se muestra en la Foto Nº 01:

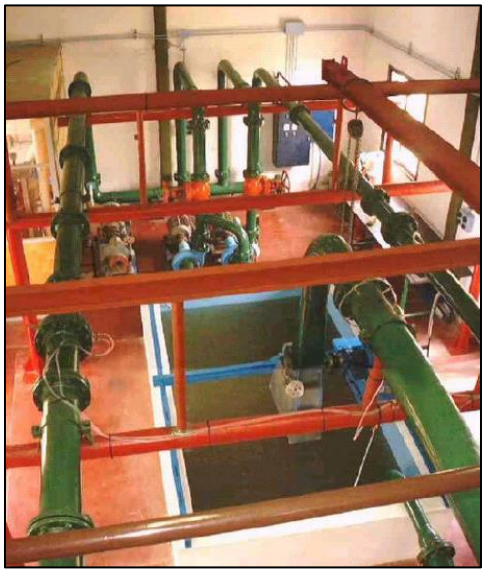


Foto Nº 01: Vista Banco de Ensayo para Pequeñas Turbinas Hidráulicas (LA.M.HI.)

El circuito de tipo “Abierto” y se compone de una cisterna con 5,5 m^3 de capacidad, a la que dos las bombas centrifugas Marca IRUMA. En su conjunto las bombas principal, válvulas, tuberías y otro auxiliares apropiados permite que el agua sea bombeada desde y devuelto a un depósito. El caudal es regulado por medio de un conjunto de válvulas tipo globo situadas aguas arriba de las dos bombas principales que cuenta el banco de ensayos.- El caudal se midió con un medidor de flujo electromagnético EUROMAG MC-608.

Las bombas principales son las que suministra el caudal y la presión requerida por la turbomáquina que se está ensayando (bomba como una turbina). El sistema en su conjunto es capaz de suministrar 120 m^3/h (sistema paralelo) y una altura neta máxima (sistema serie) de 60 m.-

La bomba utilizada para esta investigación tuvo aspiración axial individual y carcasa de voluta espiral (Figura Nº 01).

ISBN: 978-987-1676-63-7

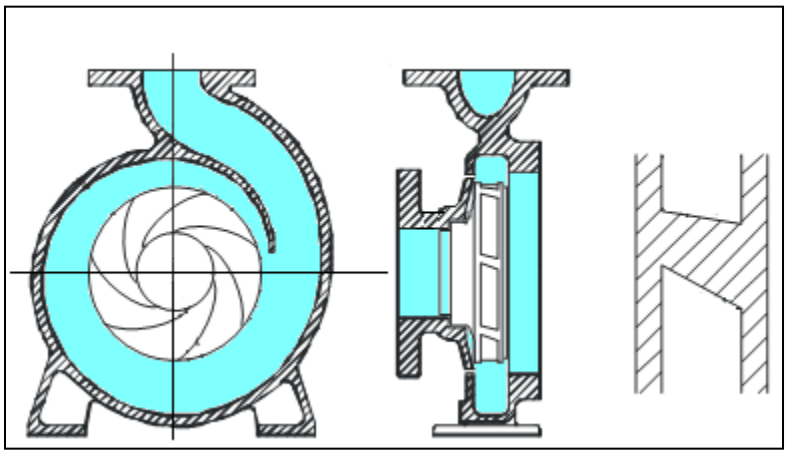


Figura Nº 01 Detalle de la Bomba utilizada como Turbina

Estaba equipado con un impulsor de 136 mm de diámetro exterior con 6 palas curvadas hacia atrás con perfil logarítmico. Otras dimensiones del impulsor son; diámetro neto de entrada = 60 mm, ancho neto de descarga, b_2 = 13 mm [Ver Tabla Nº 01].

Tabla 1: Resumen dimensiones geométricas rotor de BUTUs

Bomba IRUMA Monoblock Modelo 60/5		
Impulsor:		
Diametro exterior	136	mm
Diametro Interior	70	mm
Diametro Neto Interior	60	mm
Ancho Salida	20	mm
Ancho Neto Salida	13	mm
Numero de Alabes	6	
Velocidad de Rotacion	2890	RPM

La velocidad de rotación de la BUTUs se la midió haciendo uso de un tacómetro digital y el torque mediante un freno dinamométrico a corrientes parasitas y con una celda de carga como transductor de esfuerzos. Las curvas de performance se obtuvieron para una energía específica hidráulica de entrada constante y equivalente a 25 m.d.c.a..- Con este parámetro fijado, se procedió a relevar todas las variables, hidráulicas y mecánicas, en juego para distintos caudales turbinados.-

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1.Curvas de funcionamiento a Energía Hidráulica Especifica constante.-

El trabajo consistió en la caracterización experimental de la bomba operando en modo turbina. Siguiendo procedimientos normalizados se obtuvieron curvas de performance en el modo turbina, correspondientes a un rango de velocidad de rotación que va desde 800 a 2900 RPM.

La tabla Nº 02 muestra los resultados obtenidos del ensayo experimental como así también los valores calculados a partir de estos valores experimentales obtenidos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla Nº 02 Valores experimentales de Bomba funcionando como turbina - H: 25 m

	Valores Experimentales				Valores Calculados							
	Torque	RPM	Caudal	Altura	Pot.Mec	Pot.Hid	Rendi	Diam	Cef.Caudal	Cef.Presion	Cef.Potencia	Cef.Diametro
	[kg m]	[RPM]	[l/s]	[m]	[kW]	[kW]	[---]	[mm]	[---]	[---]	[---]	[---]
Bomba como Turbina	0,55	2810	11,50	25	1,588	2,820	0,56	136	0,0155	0,1531	0,001339	5,019
	1,15	760	12,17	25	0,898	2,985	0,30	136	0,0608	2,0934	0,038281	4,879
	0,56	2648	12,49	25	1,523	3,063	0,50	136	0,0179	0,1724	0,001536	4,816
	1,17	827	12,54	25	0,994	3,075	0,32	136	0,0576	1,7679	0,032892	4,806
	1,26	1164	12,60	25	1,507	3,090	0,49	136	0,0411	0,8924	0,017881	4,795
	0,67	2502	12,90	25	1,722	3,164	0,54	136	0,0196	0,1932	0,002058	4,739
	1,18	1330	13,35	25	1,612	3,274	0,49	136	0,0381	0,6836	0,012826	4,658

La Figura 2 muestra el coeficiente de altura y el coeficiente de potencia en función del coeficiente de flujo, para el rango de velocidades mencionado y el modo turbina. Los Coeficientes y los rendimientos se definen como sigue:

- Coeficiente de potencia:

$$K_N = \frac{N}{(\omega^3 . {D_2}^5 . \rho)} \quad (1)$$

- Coeficiente de Altura:

$$K_H = \frac{g.H}{(\omega . D_2)^2} \quad (2)$$

- Coeficiente de Caudal o Flujo

$$K_Q = \frac{Q}{(\omega . {D_2}^3)} \quad (3)$$

- Eficiencia de la Bomba y la Turbina:

$$\eta_B = \frac{\rho . g . H . Q}{T . \omega} \quad (4)$$

$$\eta_T = \frac{T . \omega}{\rho . g . H . Q} \quad (5)$$

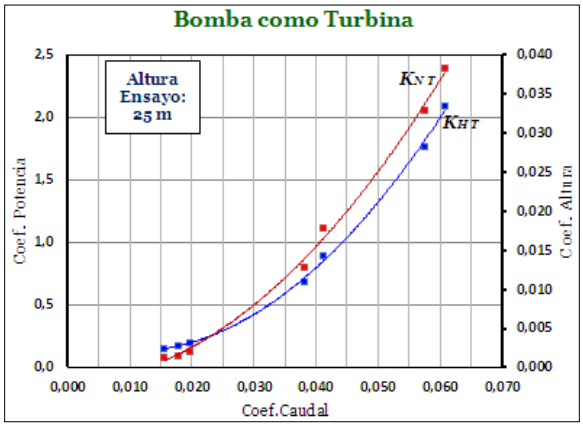


Figura Nº 02 Curvas Adimensionales de Performance de Bomba utilizada como Turbina

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$K_{NT} = 10{,}513.K_Q^2 + 0{,}013.\ K_Q - 0{,}0019 \qquad R^2 = 0{,}9967 \qquad (6)$$

$$K_{HT} = 756{,}16.K_Q^2 - 15{,}599.\ K_Q + 0{,}2107 \qquad R^2 = 0{,}9982 \qquad (7)$$

La caracterización en el modo bomba [Ver Figura Nº 03]se desarrolló a partir de los datos del fabricante lo cual nos permitió inferir las curvas del coeficiente de altura y el coeficiente de potencia en función del coeficiente de flujo, y para la velocidad nominal de trabajo que es de 2850 RPM.-

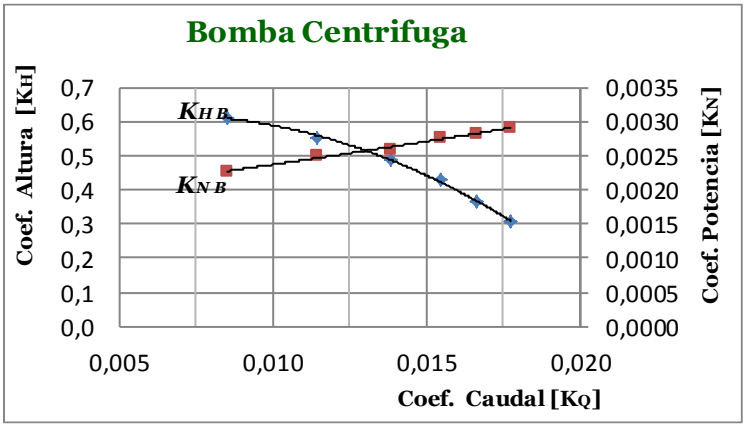


Figura Nº 03 Curva Adimensional de la Bomba Centrifuga

$$K_{NB} = 0{,}5715.K_Q^2 + 0{,}0533.\ K_Q + 0{,}0018 \qquad R^2 = 0{,}9873 \qquad (8)$$

$$K_{HB} = -2460{,}7.\ K_Q + 32{,}228.\ K_Q + 0{,}5129 \qquad R^2 = 0{,}9981 \qquad (9)$$

El mejor punto de eficiencia de la bomba como turbina corresponde a un coeficiente de flujo de 0.011. Por otro lado, en el modo de turbina, la altura neta de funcionamiento resulto ser mayor que para el modo bombas.

En cuanto a la variación de potencia en el eje y rendimiento global, con respecto a la velocidad de rotación de la bomba operando como turbina, en la Figura Nº 04 se puede ver el comportamiento experimental que tiene el equipo en cuestión.-

ISBN: 978-987-1676-63-7

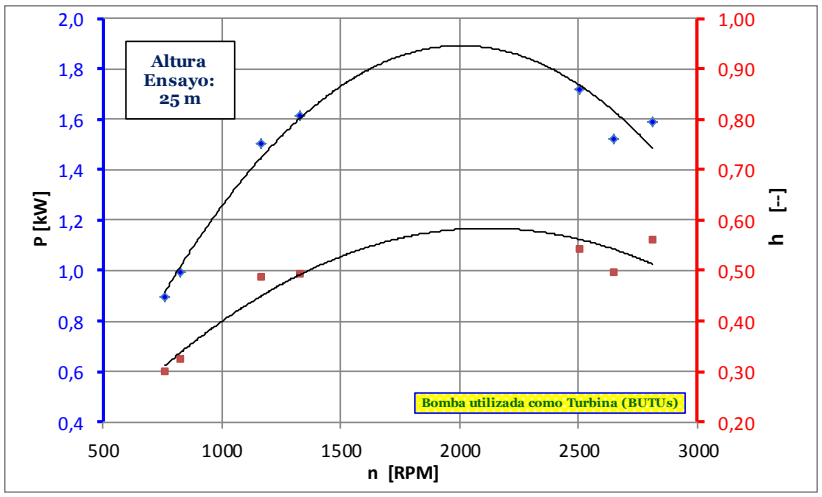


Figura Nº 04 Curvas de Rendimiento y Potencias de la BUTUs

$$N_{kW} = -6x10^{-07}.n^2 + 0{,}0025.n - 0{,}6396 \; ; \quad \text{con n:[RPM]} \qquad R^2 = 0{,}9565 \qquad (10)$$

$$\eta_{Global} = -1x10^{-07}n^2 + 0{,}0006.n - 0{,}0799 \; ; \text{con n:[RPM]} \qquad R^2 = 0{,}8983 \qquad (11)$$

Considerar que las curvas de la Figura Nº 02 para la bomba trabajando en modo turbina, no pasan por el origen; esto nos está indicando que la máquina, para bajos caudales, presenta un área de trabajo invertida que nos indica que la máquina para bajos caudales presenta un consumo de energía, o potencias, y disipación de altura especifica.

El punto de intersección de las curvas de la Figura Nº 02 con el eje de abscisas nos muestra la condición de embalamiento, y este punto estaría para un coeficiente de flujo próximo a 0,010

De acuerdo a lo expuesto y a lo desarrollado en [5], podemos inferir que existe una correlación entre parámetros de un mismo tipo en ambos modo de operación; lo que también podemos afirmar que esta correlación no está explicada ni por el rendimiento ni por la velocidad específica en ningún modo de operación. Este último aspecto es razonable que así sea dado que el rendimiento es un parámetro muy relevante en la identificación de la velocidad específica de la máquina, sea cual sea su modo de operación.

Esto hace que no resulte factible utilizar estos parámetros como variable de correlación para inferir un comportamiento en un modo, en base al comportamiento en otro modo; se trata, del punto de vista operativo, de máquinas totalmente distintas, con escurrimientos fluidodinámico distintos; este último aspecto es confirmado cuando determinamos el trabajo específico intercambiado en el rodete para el modo turbina [6].-

Por lo desarrollado y resultados obtenidos se puede inferir que la hipótesis básica propuesta de la no existencia de una correlación explicada con parámetros de semejanza o similitud hidráulica es razonable que así sea. Además, y dentro de este contexto, consideramos que sería más apropiado pensar en tratar de explicar el comportamiento en el modo turbina, abordando metodologías de similar característica a las aplicadas en turbinas hidráulicas.

Dentro de esta propuesta, consideramos que sería importante comenzar analizando la ecuación fundamental de las turbomáquinas y, más concretamente, el trabajo específico de la turbinas, el cual esta explicado, entre otras variables, por parámetros geométricos, constructivos y operacionales del rotor, tal como se lo muestra en los puntos siguientes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha descrito el comportamiento de una bomba centrífuga en el modo de turbina a partir de un ensayo experimental realizado a energía neta específica constante y equivalente a 25 m.c.a. y con velocidad de rotación variable.

Lo que se trata de buscar es una metodología que permita inferir el comportamiento de la bomba en el modo turbina de manera confiable y de aplicación universal. Sin embargo, y con el fin de predecir las características de turbina con más precisión, esto requiere de un importante número de datos de tipo experimental y posteriormente efectuar un procesamiento de los mismos con herramientas de la estadística. Otra herramienta muy relevante para desarrollar estas predicciones son las técnicas de Mecánica de Fluidos Computacional (CFD), pero este es un tema a ser abordado en un tiempo no muy lejano a fin de comparar y convalidad códigos computacionales.

A los resultados obtenidos, se hace necesario acoplarlos a similares metodologías desarrolladas para otro tipo y/o modelos de bombas a fin de poder mejorar las técnicas de predicción.-

Una de las barreras a que nos encontramos en estas tares está inserta en el tipo de unidades que se encuentran en nuestro mercado local las cuales muchas de ellas provienen de fabricante que no entregan un producto normalizados lo cual esto juega en contra con cualquier tarea de estandarización que se pretenda a fin de universalizar los desarrollos experimentales de inferimiento realizados.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] ISO 3555:1977 Centrifugal, mixed flow and axial pumps -- Code for acceptance tests -- Class B (Replaced by Standard: ISO 9906-2012 Rotodynamic pumps - Hydraulic performance acceptance tests - Grades 1 , 2, and 3)

[2] Kittredge, C.P. "Centrifugal Pumps Used as Hydraulic Turbines". Trans. ASME, Vol. 63, 1941.

[3] Knapp, R. T. "Centrifugal Pump Performance as Affected by Design Features". Trans. ASME, Vol.63, 1941.

[4] Stepanoff, A. J. "Centrifugal and Axial Flow Pumps", Ed. J. Wiley. New York, 1957.

[5] Audisio, Orlando A. “Correlación en el uso de la bomba centrifuga operando como turbina en pequeños aprovechamientos hidráulicos “. IV CAIM 2014 – Resistencias (Chaco-Argentina).-

[6] Gülich, Johann F. – Centrifugal Pumps – ISBN 978-3-540-73694-3 – Springer Berlin Heidelberg New York. - 2008

Área Temática: Energía y Medio Ambiente.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE LAS MAREAS EN "ALBÚFERA" ARTIFICIAL EN LA PROVINCIA DE RÍO NEGRO, ARGENTINA

Orlando Audisio[1], Ariel Marchegiani[1], Luis Bertani[2], Carlos Labriola[3]

[1]Departamento de Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería
[2]Departamento de Geografía - Facultad de Ciencias Humanas
[3]Departamento de Electrotecnia - Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Comahue - Buenos Aires 1400, Neuquén (CP: 8300) – Argentina

ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar
orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar - bertani8300@gmail.com - carloslabriola54@yahoo.com.ar

RESUMEN

El trabajo analiza y estudia el potencial energético que presentaría la utilización de una depresión natural. El objetivo es la generación de energía eléctrica por medio de una conexión con el mar en el Golfo de San Matías, situada a unos 25 km al Este del mismo. Esto permitiría la formación de un gran lago que crearía una "albúfera artificial" y cubriría una superficie de unos 1.234 km^2. Es decir, se trata de un desarrollo energético a través de la utilización de mareas combinadas con las depresiones existentes en los "Bajo del Gualicho" (- 72 m), Provincia de Río Negro, Argentina.-

Este lago artificial estará expuesto a las mareas por medio de una combinación de canales y túneles situados entre el mar y el lago. Tomando la referencia del Puerto San Antonio Este (Río Negro), la amplitud de la marea media alcanza 6.73m, de modo que cada marea alta (con una duración de 6 horas. 20 minutos) sería el que aportaría el flujo de agua hacia el lago; el volumen de agua desde la albufera hacia el mar se haría durante la etapa de marea baja. Se trata de explorar la potencialidad de estos proyectos para dar respuesta a la creciente demanda de energía, a través de sistemas ambientalmente sustentable, y que desarrolle otros proyectos como ser la localización de ciudades con perfil turístico (en particular Gualicho) y de aprovechamientos pesqueros.

La tecnología más apropiada es utilizar canales de 100 m de ancho, profundidad de 25 m y 10 km de longitud con recubrimiento de hormigón, túneles de 15 km de largo, y turbinas tipo Bulbo de 8 MW cada una.

Palabras Clave: *mareas, energía renovable, turbinas hidráulicas, albufera.*

1. INTRODUCCION

El fenómeno de las mareas, a pesar de ser conocida y relevante para la humanidad desde la época de los primeros navegantes, y la explicación de su problemáticas, sus cálculos y previsiones, se desarrollaron en los últimos siglos.

La morfología de la Tierra es, aproximadamente, una esfera, donde la Luna y el Sol con sus movimiento continuos, producen distintos movimientos de las corrientes marinas en mares y océanos. También es posible añadir los efectos de la rotación de la Tierra sobre su eje y variaciones en la profundidad del fondo marino que afectan a la dirección y la intensidad de estos flujos.

La figura Nº 01 (a) y (b) muestran la acción de la Luna y el Sol en función de la posición de ellos con respecto la Tierra. El efecto más importante aparece en las zonas donde la Luna está cerca del horizonte, porque la brecha entre la atracción y la fuerza centrípeta que actúa producen corrientes que afectan a todo el volumen de agua en profundidad; diferente es el efecto de los vientos, que sólo lo hacen sobre la masa superficial.

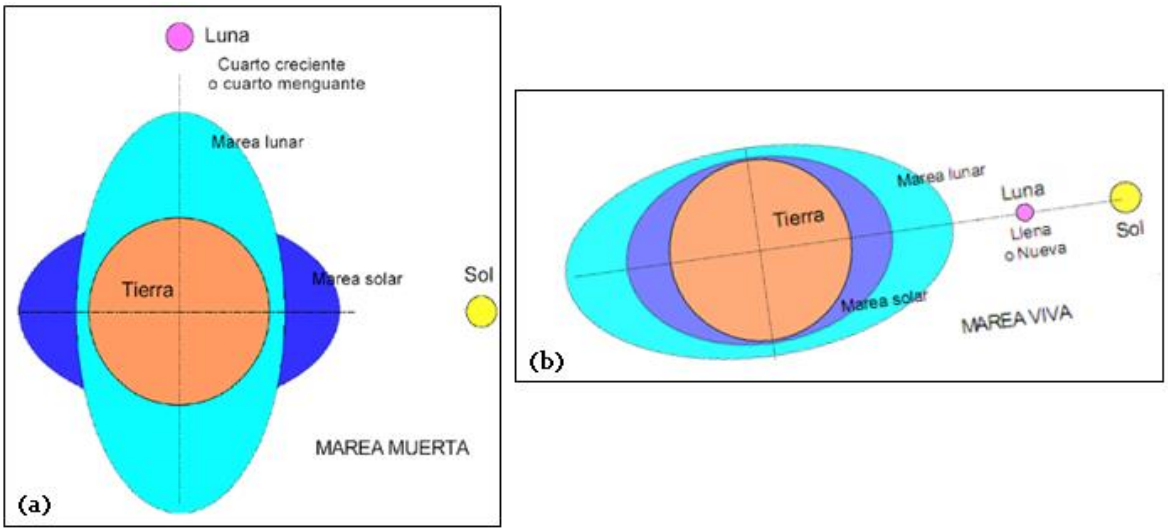


Figura 1 (a) Luna y Sol a 90º; (b) Luna y Sol a 0º

Asumiendo que la profundidad del mar se eleva por la proximidad del continente, la altura de la ola aumenta con el cuadrado de la relación de profundidades, tomando en cuenta la fricción con el fondo del mar. En consecuencia, las costas, especialmente los que están en el este, aumentan el nivel de la marea dos veces al día, como es el caso de las costas de la Patagonia Argentina.

Es importante considerar que la órbita de la luna, en ciertos momentos, es superior o inferior a la eclíptica, por lo tanto, los movimientos del mar cambian continuamente en forma compleja en una secuencia que se repite cada 19 años, y también la distancia entre la Tierra y la Luna varía en un 10% cada 28 días.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El Sol solo produciría una amplitud menor y equivalente a la mitad de las mareas de la luna. En realidad, los efectos de la Luna y el Sol se superponen y esto complica las acciones ya que la posición relativa entre ellos cambia cada 29 días (Figura 1 (a) y (b)).

2. PROYECTO BAJO DEL GUALICHO

El objetivo de este proyecto está centrado en la estimación de la Potencia Instalada y Energía con la tecnología actual, determinar el Retorno del Capital a través del mecanismo de “Bonos Verdes”, y la Estimación de Costos de las Obras a realizar.

La palabra albúfera se refiere a lagos o lagunas asociados al litoral marino a través de un canal de conexión, como es el caso de la laguna de Mar Chiquita en la costa atlántica de la provincia de Buenos Aires. El presente proyecto propone la creación de una “albúfera artificial” utilizando el gran bajo del Gualicho (depresión natural del terreno del orden de – 70 m) en la Provincia de Río Negro.

Para ello se analizan distintas variantes que se presentan para la generación eléctrica mareomotriz a partir de la creación de una albúfera artificial, teniendo en cuenta las ventajas que brinda la combinación de buenas amplitudes de mareas en proximidades con depresiones absolutas (por debajo del nivel del mar) a una distancia relativamente cercana (25/30 km). Para ello se contempla la conexión mar – lago – mar en el sector nororiental de la provincia de Río Negro, en la depresión natural denominada “Bajo del Gualicho” (Figura Nº 2).



Figura 2: Ubicación geográfica de el “Bajo del Gualicho” – Prov. de Río Negro

En el nivel 0, las futuras fronteras del lago de la Albufera tiene más de 20 km de longitud y 80 km de ancho. Este lago estará conectado con el mar, en el Golfo de San Matías, a través de canales (primer tramo de 10 km) y luego túneles (vínculo entre canal y albufera de 15 km). En la presente propuesta se ha previsto canales que cubren un longitud estimada de 10 a 15 km de longitud; una vez alcanzada la misma, la conectividad con el lago se llevará a cabo a través de túneles de unos 20 a 25 km de extensión.La tecnología a utilizar está en la construcción de Canales de 100m de ancho, profundidad de 25 metros y 10 km de longitud con recubrimiento de hormigón, Tuneles de

ISBN: 978-987-1676-63-7

15 metros de diámetro y 15 km de largo y turbinas hidráulicas tipo Bulbo de potencia nominal unitaria de 8 MW.

La Figura 3 muestra el lago en la cota 0 con respecto al nivel del mar; se trata de 1234 km^2, 1,5 veces el área del lago Ramos Mexía de la estación de energía hidroeléctrica El Chocón, y la Figura 4 muestra, además, la distribución de algunos tuneles y canales de la albúfera al mar cerca de la ciudad de San Antonio, en la provincia de Río Negro.

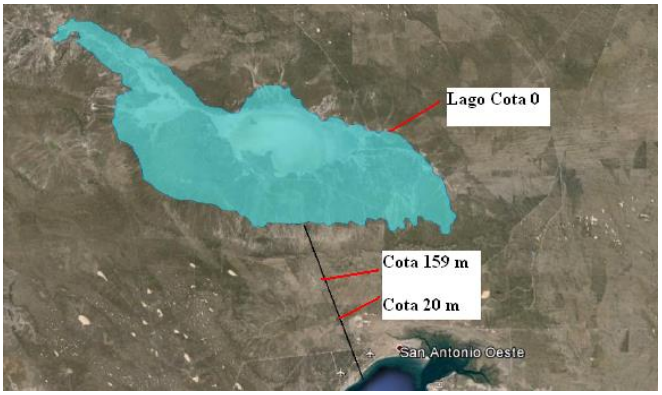


Figura 3: Lago Albufera en Bajo del Gualicho



Figura 4: Tuneles y Canales desde la Albufera hasta el Océano Atlantico.

3. TECNOLOGÍA PROPUESTA

El esquema que se muestra en la Figura 5 resume el diseño propuesto. Las medidas de cada tramo dependerán de la localización del/los canales y túneles previstos. Más abajo (Tabla Nº 1) se detalla las dimensiones de tres transectas propuestas aunque existen otras opciones posibles.

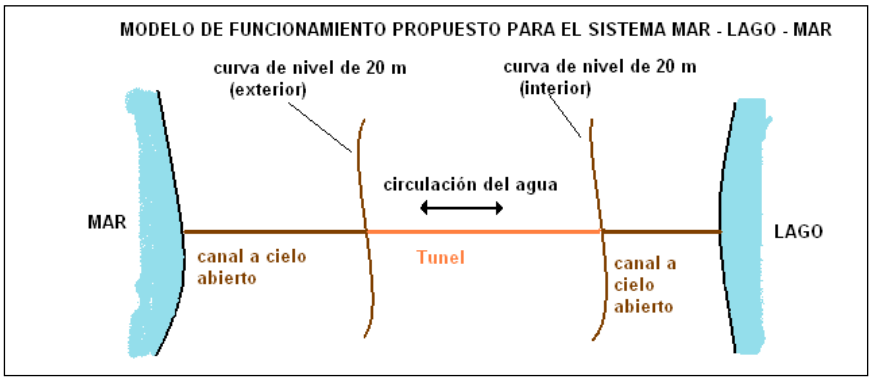


Figura. 5: Modelo general propuesto

Se han evaluado tres localizaciones de canal – túnel – canal que se muestran en el siguiente cuadro y en las figuras de más abajo.

Tabla Nº 1. Dimensiones de transectas

MEDIDAS DE DISTINTAS TRANSECTAS MAR - ALBÚFERA (en km.)			
Sector	TRANSECTA 1	TRANSECTA 2	TRANSECTA 3
Canal mar - cota 20 m	12.8	12.7	11.8
Tunel (entre cotas 20 m)	18.7	17.9	18.9
Canal cota 20 m int - lago	0.95	1.41	1.41
Distancia total	32.45	32.01	32.11

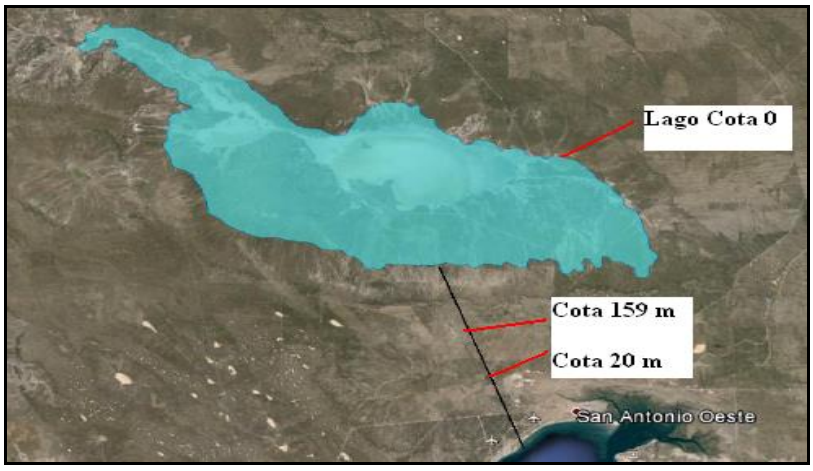


Figura 6. Lago a nivel cota 0: Superficie de 1234 km^2

ISBN: 978-987-1676-63-7

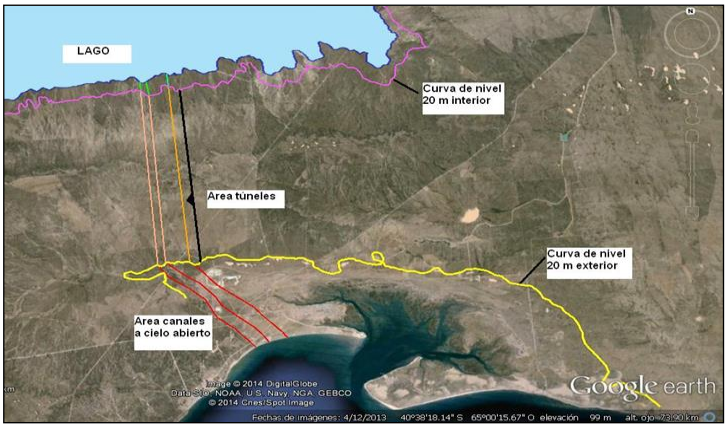


Figura 7. Diseño de canales a cielo abierto y túneles

El modelo de aprovechamiento prevé la utilización de turbinas hidráulicas tipo bulbo a la entrada del canal y/o al ingreso de cada uno de los túneles. Esta distribución de equipamiento hidráulico no debe considerarse definitivo dado que se están analizando otras opciones que puedan maximizar el aprovechamiento de este sistema. Además es factible incorporar turbinas hidrocinéticas como así también, equipos eólicas en la cumbre de la meseta que rodea al perilago, pero esto no es de análisis en esta etapa.

3.1. Turbinas Hidráulicas Tipo Bulbo

En el caso de las turbinas bulbo (Figura 8) se tiene previsto su localización al inicio de los canales a los efectos de disminuir la velocidad de ingreso a los mismos del agua desde 4,5 m/s a 2,5 m/s. Luego en los túneles se pueden instalar otras turbinas bulbo para 2,5 m/s.

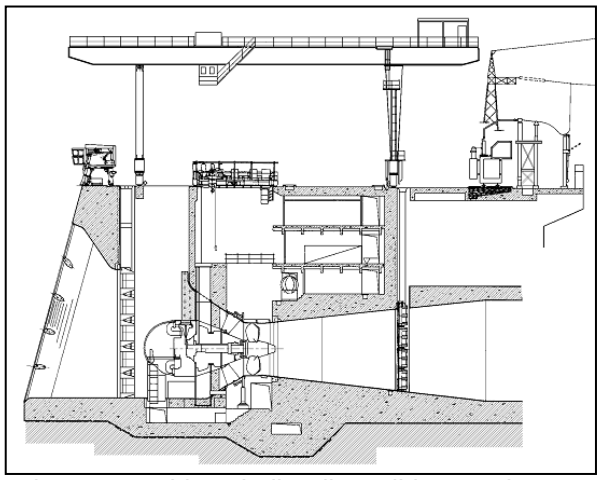


Figura 8: Turbinas bulbo disponibles en el Mercosur[1]

[1] DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA - TURBINAS HIDRÁULICAS - Pedro Fernández Díez - http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/Turbinas/Hidraulicas/index.html [24/07/2003 0:03:12]

ISBN: 978-987-1676-63-7

Estas turbinas se desarrollan en el MERCOSUR por empresas de Argentina y de Brasil. Se han mejorado los diseños respecto de las primeras (La Rance, Francia, 1966) con mejores rendimientos y menos relación Peso/Potencia.

Tabla 2: Parámetros característicos

DATOS	
PARAMETRO	**VALOR**
ALTURA [m]	4,5
RENDIMIENTO	0,85
CAUDAL [m3/s]	500
POTENCIA [kW]	18761,63
PARÁMETROS CALCULADOS	
ns_p	**1.263,40**
Velocidad de rotación [r.p.m.]	60,454
Nº pares de polos	49,0
Velocidad de rotación sincrónica [r.p.m.]	61,224
Nuevo ns_p (sincrónico)	1.279,51
Ku	2,586
Diámetro D_R [m]	7,58
Sigma	3,458
Sumergencia h_s	-5,411

Tabla 3: Dimensiones principales del bulbo

Diámetro DR [m]	7,579	m
DB	9,474	m
DC	3,244	m
DR	7,579	m
HG	3,790	m

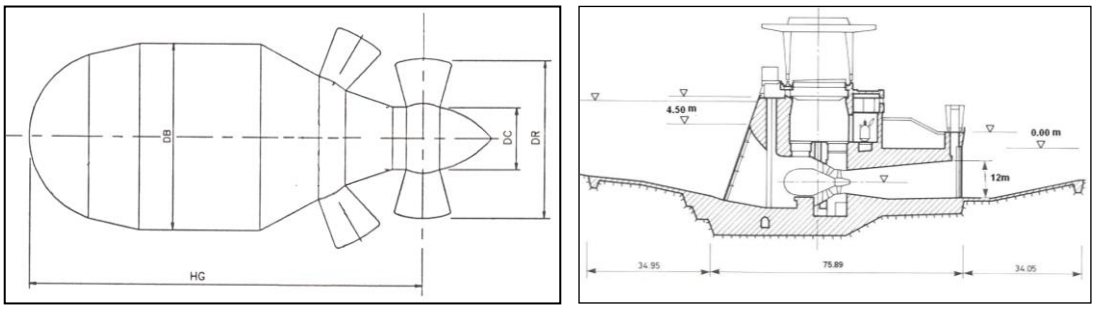


Figura 9 : Dimensiones principales del bulbo

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. OBJETIVOS:

4.1. Objetivo General

Establecer un modelo general de funcionamiento para un proyecto ejecutivo para la generación de energía mareomotriz a través de una albúfera artificial en el Bajo del Gualicho.

4.2. Objetivos Particulares

- Estimar la potencia instalada y la energía a producir a través del modelo tecnológico propuesto.
- Calcular el retorno de capital mediante Bonos Verdes.
- Analizar el Costo Global de la Instalación.
- Analizar las opciones de uso del suelo a partir de la creación del lago artificial (proyecto multipropósito), en particular los emprendimientos turísticos-inmobiliarios-ictícolas.
- Evaluar la vulnerabilidad del entorno.

5. ESTIMACIÓN DE ENERGÍA Y BONOS VERDES

En el caso de la energía suministrada, las siguientes consideraciones deben hacerse:

1. El lago artificial tendrá dos mareas diarias, de las cuales solo serán consideradas 4 horas para la generación eléctrica. El comienzo (1 h.) y el extremo (1 h.) de la marea, el nivel para el almacenamiento de agua es despreciable.

2. La potencia instalada se estima con el tamaño y número de canales y túneles.

3. Esta energía es normal, todos los días se puede obtener cuatro tiempos generación: (16hs total de la generación eléctrica en promedio) dos de 4hs correspondiente a la marea alta y dos de 4hs correspondiente a la marea baja.

4. Es predecible porque se conoce en qué momento se producen las mareas (marea alta y baja) por día, por lo que es fácil integrar las unidades de generación al Sistema Eléctrico Argentino .

5. El combustible fósil con más emisiones se toma como referencia para los gases de efecto invernadero evitadas utilizados para la estimación de los huesos verdes. Las turbinas de vapor en AES utilizan fuel-oil como combustible, la Tabla 4 muestra la comparación de las emisiones.
6. Como valor de referencia de bonos verdes se toma U$S 6,6 CO_2/tn, a diciembre de 2013 [8].

Tabla 4: Factores de Conversión y Emisión

Fuel	Factor de Conversión	Factor de Emisión	Ton CO_2/MWh
Fuel oil	11,16 KWh/Kg	3,05 KgCO_2/Kg	0.273
Gas oil	11,78 KWh/Kg	3,10 KgCO_2/Kg	0.263
Nat. gas	10,65 KWh/m^3	2,15 KgCO_2/m^3	0.202
Carbon	7,09 KWh/Kg	2,53 KgCO_2/Kg	0.357

ISBN: 978-987-1676-63-7

En el caso de las turbinas Tipo Bulbo de 18 MW cada una, habrá 4 túneles por canal, lo que resulta, a proyecto final, emplazar 400 turbinas. La potencia total instalada de turbinas bulbo será de 4000 MW.- La Tabla 5 muestra la estimación de la potencia total instalada y la generación de energía por año.-

Tabla 5: Potencia Instalada y Energía/año

Turbina	Potencia (MW)	Hs/día (h)	Energía/día (MWh)	Energía/Año (TWh)
Bulbo	4000	16	64000	23,36

Teniendo en cuenta la Tabla 4, el FuelOil es un combustible importado para turbinas de vapor y el carbón mineral se utiliza para una sola estación de energía con la producción local (Río Turbio, provincia de Santa Cruz). Combustible fosiles debe ser sustituida por la energía renovable para reducir la dependencia externa de la misma. De esta manera, el cálculo de bonos verdes está en la tabla 3:

6. PREVISIÓN DEL COSTE TOTAL

La tabla 6 muestra una estimación de los costos, teniendo en cuenta el último costo de instalación de dispositivos de energía renovables en Argentina:

Tabla 6: Costos del proyecto

Instalación y Construcción	Valor Especifico U$S	Nº Maquina	Potencia kW	Costo x 10^6. U$S
T. Bulbo	3000/kW	400	10000	12.000
Canal 100x15000x20m	2/m^3	100	---	4.500
Tunel Φ:15mx15000m	5/m^3	---	---	5.300
Concreto				9.000
			TOTAL	30.800

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La potencia instalada estimada es similar a la mitad de la demanda de Argentina en 2014 y el costo total estimado incluyendo obra civil, es de aproximadamente U$S 5000 por kW instalado. La energía media necesaria para la Argentina y por año es del orden de los 170 TWh. La energía producida por el aprovechamiento El Gualicho representa, aproximadamente, el 17% del país.

ISBN: 978-987-1676-63-7

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones:

Este proyecto es de gran envergadura y tendrá una duración de más de 10 años, por lo que éste debería estar incluido en el contexto de la política nacional energética.

Este tipo de proyectos permite disponer de una capacidad instalada de acuerdo al crecimiento de la demanda (800 MW/año). Tal energía puede ser aumentada o disminuida de acuerdo con las variaciones de crecimiento de la demanda.

Argentina importó combustibles fósiles, en particular el petróleo combustible vale U$S 8000. 10^6 /año. Dicha cifra permite construir hasta 20 combinaciones de canal/tunel con máquinas instalada y por año.

8.2. Recomendaciones:

Este trabajo toma en cuenta sólo los bussines de energía, sino que también hay uno turístico, en las orillas del lago, con anchura de al menos 3 km, lo que nos da una superficie de 600km2, tres veces el área de la ciudad de Buenos Aires. El capital obtenido por la venta de dichos terrenos debe ser estimado como parte de la rentabilidad del capital para el proyecto.

9. REFERENCIAS

[1] Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2010). Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina. Ed. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Buenos Aires.

[2] Página Web del Servicio de Hidrografía Naval: http://www.hidro.gov.ar/

[3] Chingotto M.R. (2006). Energía Mareomotriz. Boletín 813 del Centro Naval. Buenos Aires.

[4] Lizuain. A. (1983). Descripción Geológica de la Hoja 38 J, Salinas del Gualicho. Servicio Geológico Nacional. Buenos Aires.

[5] Martínez H. et al. (2001). Hoja Geológica 4166 – II “San Antonio Oeste” Bol.254. Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires.

[6] Masera R. y Guarido J. (2003). Bajo del Gualicho: una planicie patagónica bajo el nivel del mar. Min. de Salud y Desarrollo Social. Secretaría de Estado de Acción Social de Rio Negro.

[7] Servín S. (2012). Argentina y los Desafíos del Escenario Energético Global. Ed. ISEN. Buenos Aires.

[8] Dracksler, S. 2013, Final Work of Renewable Energy lecture “Anteproyecto de Cenral mareomotriz en bajo del Gualicho”, Faculty of Engineering, National University of Comahue, Neuquen, Argentina.

[9] CREE: Centro Regional de Energía Eólica del Chubut, a cargo del Dr. Mattio, ente de energía renovable que ha realizado el mapa eólico de la Argentina.

[10] COPIME, 2013: Presentation of Green Bones on Seminar of Renewable Energy and Environment organized by Professional Council of Mechanical and Electrical Engineers, Buenos Aires, Argentina.

[11] CAMMESA, 2013: Data from Annual Report 2013 by Whole Sale Market Administration Company, Rosario, Santa Fé, Argentina.

[12] GEN-REN, 2010: Mean value of kw/instaled foor Renewable energy sources fron Nacional Parchase of Renewable Energy Projects, Buenso Aires, Argentina.

[13] De Siervo,F. and De Leva, F., "Modern Trends in Selecting and Designing kaplan Turbines", Water Power & Dam Construction, 1976.

[14] A. Lugaresi and A.Massa, "Kaplan turbines:Design Trends in Last Decade", Water Power & Dam Construction , November 1987.

[15] E.C. Cruz, “Turbinas Bulbo: Pré-dimensionamento para Projeto Básico”, 3º Workshop Turbinas Hidráulicas e Hidromecánica IARH, Mendoza, Octubre 1995.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANALISIS DEL ENSAYO DEL UAV SOLODAMA "PRIMER VUELO CON ENERGIA SOLAR DE LATINOAMÉRICA"

Omar Elaskar *[1], Diego Fernandez [2] y Martín Pilati [3]

*[1] Fac. Ciencias Exáctas Fis.y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba, Av.Velez Sarfield 1600, Córodba, Argentina, oelaskar@hotmail.com
[2] Centro de Investigaciones Aplicadas - Dir. General de Investigación y Desarrollo, Av. Fuerza Aérea Argentina 6500, Córdoba, Argentina, dnfernandez187@gmail.com
[3] Fac. Ciencias Exáctas Fis.y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba, Av.Velez Sarfield 1600, Cba, Argentina, martinpilati@yahoo.com.ar

RESUMEN

Las aeronaves propulsadas con energía solar requieren poseer características estructurales, aerodinámicas y energéticas muy eficientes para poder lograr el vuelo.

El objetivo central pretende mostrar y demostrar analítica y experimentalmente el vuelo con energía solar. Como objetivo secundario se busca analizar y sacar conclusiones de los resultados obtenidos del primer ensayo en vuelo, como son su comportamiento, controlabilidad y prestaciones del UAV "Solodama".

El trabajo describe inicialmente los resultados parciales alcanzados durante el desarrollo del proyecto, especialmente los relacionados a las actividades de diseño y construcción del prototipo del UAV "Solodama". Así se abordan las etapas de análisis, estudios, e investigación de la propulsión eléctrica-solar aplicada a aeronaves, para luego continuar con los temas relacionados a las soluciones adoptadas de ingeniería de diseño y construcción del prototipo. Estos resultados parciales mencionados resumidamente ya han sido publicados en varios congresos desde el año 2010.

Posteriormente se describen las tareas que permitieron alcanzar la puesta a punto del vehículo propulsado por energía solar para su primer vuelo. Esta última actividad provee los resultados cuyo estudio, descripción y conclusiones, son objeto en el presente trabajo a tratar en detalle.

El vuelo se logró realizar positivamente en el aeródromo La Mezquita ubicado en la Ciudad de Córdoba, corroborando la posibilidad de volar con máquinas mas pesadas que el aire, propulsadas con energía solar. Con esta actividad concluida exitosamente, el presente trabajo describe cualitativamente las etapas del vuelo y los resultados obtenidos durante el ensayo.

Cabe destacar que este vuelo se realizó el 22 de Marzo de 2014, y representó un hito tecnológico en el país y en la región, ya que fue y lo es hasta la actualidad, el primer desarrollo efectivo de una aeronave, que logra volar específicamente por energía solar en Latinoamérica.

Palabras Claves: *UAV, energía solar, autopiloto, propulsión eléctrica.*

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo del UAV solar "Solodama", representó un desafío, ya que contando solo con los recursos humanos, financieros y materiales disponibles por el grupo de trabajo, se debía alcanzar un prototipo de máxima eficiencia aerodinámica y propulsiva. Para la integración se utilizaron las instalaciones del Laboratorio de Aeronáutica de la UNC, además de la participación de docentes-investigadores y alumnos que se introdujeron en el tema. Respecto al financiamiento, no tenía fondos específicos para tal fin, pero se contó con subsidios de la UNC (Secyt) [1], y del Ministerio de Defensa (Piddef) [2], destinados a proyectos de investigaciones complementarias, que aportaban al desarrollo del Solodama.

Desde el punto de vista propulsivo, el proyecto Piddef aportó una gran parte para el desarrollo del UAV, ya que de ello surgieron los estudios del grupo propulsor, con lo cual se incorporó gran experiencia en los ensayos en túnel de viento, para seleccionar los componentes a utilizar.

Además permitió adquirir conocimientos y experiencia en la aplicación y gestión de la energía solar, habiéndose logrado desarrollar una metodología para selección y ensayos de celdas fotovoltaicas, armado de paneles solares y desarrollo de la electrónica de gestión de la energía (MPPT).

En relación a lo aportado por el proyecto de la Secyt, se logró analizar la arquitectura alar más conveniente para incorporar celdas solares en el ala, diseñada para adaptarse a las capacidades constructivas propias del grupo de trabajo y con los equipos e instalaciones disponibles, dando por resultado una estructura alar capaz de albergar paneles en su interior.

2. DESARROLLO

2.1 Objetivo

Se busca como objetivo principal, realizar el primer vuelo de una aeronave desarrollada en el país propulsada por energía solar, como así también analizar las cualidades de vuelo del prototipo del UAV Solodama, para conocer y establecer sus prestaciones.

Como objetivos secundarios se busca determinar la posibilidad de controlar las variables relevantes que afectan a la eficiencia del prototipo, a fin de poder trabajar sobre ellas y mejorar las condiciones de vuelo del UAV.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2. Antecedentes

A nivel mundial existen innumerables antecedentes de desarrollos de aeronaves solares tripuladas como no tripuladas. Los registros indican más de un centenar de ellos. Además el vuelo de un UAV solar lleva varias décadas en EEUU como el Sunrise I [3], primer vuelo sustentado por energía solar del mundo. Entre los ejemplares actualmente destacados se pueden mencionar el Zephir [4], y el Solar Impulse [5], como los mas importantes no tripulados y tripulados.

A nivel nacional prácticamente no se registran antecedentes de aeronaves solares. La excepción de mayor relevancia es el proyecto del UAV Solar, que se planteó como desarrollo tecnológico en el Instituto Universitario Aeronáutico también a través de un proyecto Piddef [6]. El proyecto data del 2010. A la fecha no hay registros de que se haya logrado alcanzar un prototipo de UAV solar. Tampoco se han obtenido evidencias de que alguna aeronave haya volado con energía solar en nuestro país.

Estos antecedentes también fueron relevados en la región. Y solo se encontraron algunos casos de aeromodelos, en Brasil y México, que aficionados les incorporabas algunas celdas solares, para aportar algo más de energía al que proveen sus baterías, pero que no garantizan el vuelo pleno por esta energía.

2.3. Metodología

El desarrollo fue específicamente realizado por el grupo de trabajo, desde la concepción de la arquitectura y sus sistemas del UAV, hasta la planificación y ejecución del primer vuelo. Por lo cual hubo de diseñarse por completo la aeronave, su arquitectura conceptual, su magnitud, su estructura, su aerodinámica, sus sistemas de control y su proceso constructivo para alojar paneles solares [7]. Es destacable que toda la aeronave se realizó con elementos de aplicación comerciales y disponibles en el mercado.

La cronología del desarrollo y las metas parciales alcanzadas que permitieron alcanzar el Solodama, pueden correlacionarse también en con algunos de los trabajos que fueron publicados en congresos [8-12], donde se presentaron resultados parciales del desarrollo:

1. *Balanza para Medir el Empuje y Torque en Motores en Túnel de Viento.*
2. *Diseño, Construcción y Evaluación de Ala Fotovoltaica de Aeronaves No Tripuladas.*
3. *Diseño sistema de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) en UAV.*
4. *Diseño de prototipo de aeronave no tripulada solar.*
5. *Diseño e Integración de Aeronave No Tripulada con Energía Solar..*

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se remarca además, que una aeronave solar requiere también energía para otros subsistemas como la instrumentación, control y radio-enlace, que hace aún mas critico la optimización del uso energético en este tipo de aeronaves.

Para lograr las condiciones requeridas en la etapa de realizar los ensayos en vuelo, previamente fue necesario iniciar estudios, análisis y desarrollos tendientes a obtener el prototipo del UAV solar, y por supuesto adquirir conocimiento y experiencia en el pilotaje por control remoto de aeromodelos. Para esto último se desarrolló un ala "dummy" equivalente sin paneles solares a solo titulo de evaluar las características de vuelo y ganar experiencia en el pilotaje y control de la aeronave, previo a ensayar la propulsión solar [13].

Por último se procedió a elegir las condiciones ambientales en el campo de vuelo y poner a punto la aeronave con sus sistemas de comando y control para poder realizar este ensayo que culminaría con el primer vuelo solar, y que se describe a más abajo.

3. ENSAYO EN VUELO

2.1. Descripción y Alistamiento del UAV

El UAV "Solodama" es una aeronave de arquitectura convencional, de ala alta, empenaje convencional y tren triciclo. La propulsión es eléctrica.

Los principales materiales utilizados son, en el fuselaje Polyfoam (polietileno extrudido XPS) y balsa, poli estireno expandido y Mylar en el ala. Además se hace uso en menor escala de madera Kiri, varillas de acero, y refuerzos en fibras de carbono. La construcción es tradicional de largueros y costillas para el ala y semimoncasco para el fuselaje. Se aprecia el prototipo en la Figura 1.



Figura 1: Estructura de UAV

ISBN: 978-987-1676-63-7

El equipamiento motriz consiste en un motor "brushlees" de 350W y 1450 RpmV, que mueve una hélice SF 15x10. El variador de velocidad es de 40Amp y cuenta con un BEC de 3Amp para alimentar la electrónica de control.

En relación a la eficiencia total de su sistema propulsivo se estima que el rendimiento a obtener se compone de la siguiente relación en función de consideraciones variables [7].:

$$\eta_{total} = \eta_{celda} \cdot \eta_{panel} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{bat} \cdot \eta_{variador} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{helice} \cdot \eta_{hora} \cdot = \quad 0{,}035 - 0{,}055 \qquad (1)$$

$$\eta_{total} = 0{,}17 \times 0.98 \times 0.85 \times 0.95 \times 0.90 \times 0.80 \times 0.70 \times 0.70 = 0{,}047 \quad \text{(condición probable)}$$

Los valores de rendimientos individuales han sido considerados de la siguiente manera.

a. Celdas: según el proveedor de las mismas el rendimiento es del 17%. [14].

b. Panel: con motivo de que no se observó homogeneidad en la medición en banco de cada una de las celdas se adoptó que el rendimiento del panel no podrá ser mayor al de la celda de menor eficiencia medida [9].

c. MPPT: si bien otros dispositivos similares declaran hasta un 98% de eficiencia [7], el "MPPT-Cargador" desarrollado en el proyecto y medido en banco no resultó de alta eficiencia [10].

d. Baterías: De manuales de las mismas se establece como un régimen promedio que las mismas pueden descargar un 90% de la carga aportada. Las baterías de alta eficiencia alcanzan 95% [7].

e. Variador: No se dispone de medición del variador utilizado. Según otros estudios éste alcanza un 85% [7]. Sin embargo por ser de bajo precio y no ser de marca reconocida se adopta un 5% menos.

f. Motor: la misma consideración hecha para el variador, debe considerase para el motor utilizado. Los de marca reconocida indican 85% de eficiencia.

g. Hélice: Las hélices perfectamente adaptadas alcanzan como máximo 75%. La utilizada pudo medirse 70% con el banco de ensayo. [7,8].

h. Hora: se considera un ángulo de incidencia promedio de 45° durante el funcionamiento. En especial por haberse hecho en el mes de marzo a latitud de la ciudad de Córdoba.

La energía es provista por treinta celdas de 6x6 pulgadas de 3.5W nominal cada una [14]. La gestión de energía se realiza por un MPPT (Maximum Power Point Tracker) de desarrollo y construcción propia que carga baterías de LiPo de 7.4V y 1600Mah o dirige la energía al motor, cuando se le requiere.

Esto indica que de los 1000W/m2 en teoría considerados como condición normalizada [7,17], solo se obtendría unos 47W a la salida del motor para el ensayo.

De mediciones de laboratorio el ala solar generaba a la salida del MPPT de unos 59 Watts [11], en un día soleado al mediodía (Febrero 2014), registrándose mas de 130.000 lux, medido horizontalmente con un instrumento Tondaj LX.1010B, de adquisición comercial. La Figura 2 muestra la condición de la medición.



Figura 2: Ensayo de Ala solar

En relación al tren de aterrizaje, el mismo es convencional, y a pesar que incorpora peso se instaló, ya que es un prototipo que se utilizará varias veces en despegues y aterrizajes. El tren principal es de varilla de acero de 3mm con ruedas de foam de 4”. El tren de nariz es orientable y cuenta con una rueda de foam de 2”.

Los cinco servos utilizados son de 12gr convencionales.

Si bien en el diseño esta contemplado su integración, al prototipo ensayado no se le incluyo ningún dispositivo de piloto automático [15], ni transmisores de telemetría, ni sistema de transmisión de video. Los registros para análisis fueron tomados por cámara de video y por evaluación directa del piloto operador desde tierra.

La aeronave antes del despegue, midió su batería 8.1V (cargada). El equipo de radio-control utilizado es de 8 canales a 2.4Ghz digital.

El ala se encontraba montada con elásticos y tornillos de nylon sobre el fuselaje y se controló todos los sistemas funcionaran previo al despegue. Se realizó prueba de alcance de la señal de radio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Mayores detalles de la aeronave y los desarrollos de los sistemas instalados se encuentran en los trabajos publicado y mencionados más arriba. Características aerodinámicas calculadas [16], se muestran en Figura 3.

Los permisos de vuelo al controlador aéreo no se requirieron, ya que a la hora y fecha en que se realizó el ensayo, también se realiza actividad de aeromodelismo. Además por la planificación del vuelo no se sobrepasarían los límites previstos en la reglamentación aerodeportiva vigente y se respetarían las prácticas de vuelo seguro para este tipo de aeronaves.

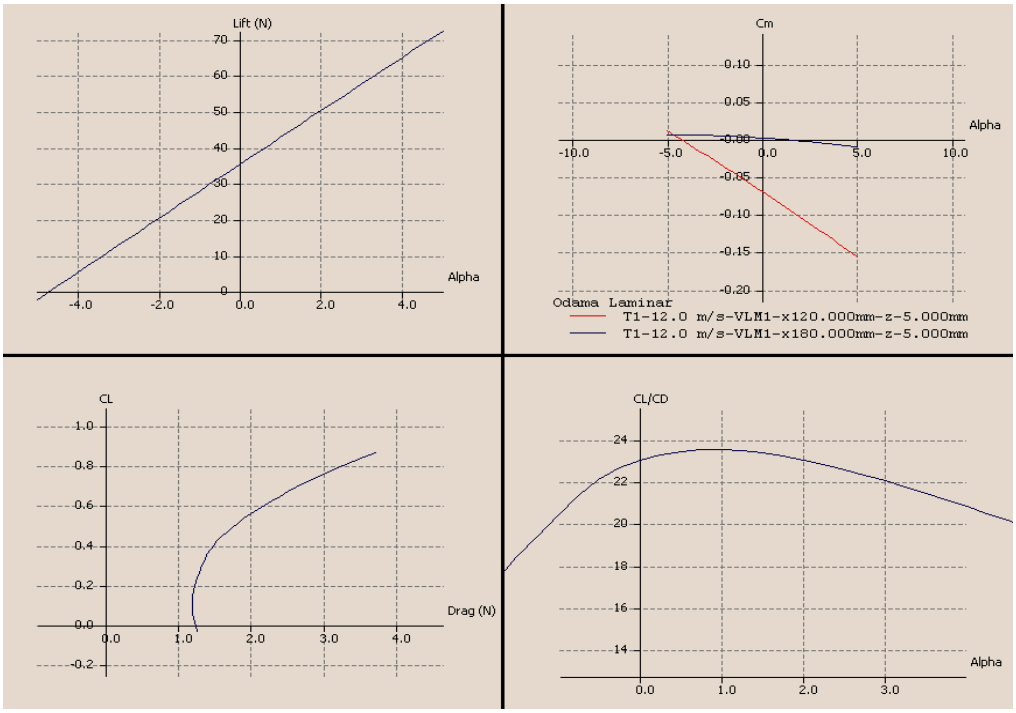


Figura 3: Características Aerodinámicas

2.2 Despegue

El vuelo se realizó en el Aeródromo de la Mezquita, predio perteneciente al Ejército Argentino.

Se eligió la calle pavimentada de acceso al predio que se dirige aproximadamente Norte Sur para el carreteo de despegue. Lo motivos de dicha elección fueron, que la resistencia al carreteo sería inferior que en pista de pasto y segundo el viento era de dirección NE, por lo que se diseccionó el despegue hacia el Norte.

En un primer intento durante el carreteo el despegue fue abortado, debido a que el UAV orientó su nariz anticipadamente hacia la dirección del viento, y se consideró que aún no había alcanzado la

velocidad suficiente de despegue y de viraje a baja altura. Por lo cual el UAV finalizó su carrera de despegue sobre los pastos laterales.

En el segundo intento se previó el efecto del viento (de unos 5 nudos, aprox. 9 km/h) del NE por lo que se corrigió la trayectoria de carreteo para compensar dicho efecto y una vez que se observó que había alcanzado la velocidad suficiente, se le aplicó comando de elevador y de dirección como para asegurar un despegue controlado. Hubo además que compensar el vuelo nivelado con aplicación de alerones.

Una vez que ganó un par de metros de altura se eliminó la compensación con timón y el Solodama dirigió su nariz en dirección al viento y nivelado por alerones prosiguió su ascenso en forma normal.

2.3 Ascenso y Crucero

Inmediatamente despegó, se ganó altura para ubicarlo en una condición de vuelo estable. Se estima visualmente un ascenso a unos 15° de pendiente de durante la trepada.

Ya con al avión a suficiente altura (40 metros aprox.) y visualmente cerca (menos de 200 metros desde el operador) se realizó un viraje de retorno y se procedió a mantenerlo en vuelo recto y nivelado. Se corroboró que era necesario hacer algunos ajustes del trimado para evitar tener que aplicar constantemente algunos de los comandos.

Este procedimiento se repitió un par de veces en distintas direcciones de vuelo para compensar efectos que el viento acentuara u ocultara.

En vuelo crucero se corroboró buena estabilidad longitudinal. Si bien no es una aeronave de gran reacción a los mandos, no se apreciaron efectos de oscilaciones marcadas, mas allá de lo normal para este tipo de avión. Se observó una aceptable estabilidad direccional, que si bien el ángulo de diedro es mínimo, el efecto estabilizante del “ala alta” podía apreciarse.

2.4 Virajes

Durante los virajes, se aplicaba alerones, sin prácticamente aplicar deriva. Debido a que la superficie de alerones es sumamente reducida para un avión de esta magnitud, su aplicación se mostraba lenta. Ello conducía a virajes de gran radio de giro y sin perder apreciablemente altura. Cuando se requirió maniobras mas exigidas hubo que aplicar además timón de dirección y elevador para mantener altura, que se penaliza por perder energía cinética. Se puede concluir que los virajes deben hacerse de manera suave ya que no responde ágilmente al control direccional sin

ISBN: 978-987-1676-63-7

tener que aplicar el resto de las superficies móviles de control que requieren de potencia motriz para mantener las condiciones de vuelo.

Sin embargo la reacción a los comando si bien no era ágil, se demostró suficientemente precisa y sin alteraciones a los movimientos de los mandos.

2.5 Tiempo de Vuelo

Este ensayo de vuelo no tenía previsto alcanzar ningún período de tiempo específico, sino que su objeto era realizar el primer vuelo de prueba y analizar su comportamiento.

Por ello una vez que se despegó se realizaron maniobras sin exigencias de cargar la estructura y mantenerlo en vuelo por control remoto y en línea directa de visión. De esta manera el avión no se alejó más de unos 500m y no superó los 300m de altura.

Los principales motivos de concluir el vuelo e iniciar la maniobra para aterrizaje, fueron que: primero ya se había probado la capacidad del vuelo solar con esta aeronave, segundo que se mostró dócil y estable, y finalmente que por estar operado a control remoto se hacía dificultoso para el piloto mantener la visión fija sobre el avión durante mas de 20 minutos. Por ello se decidió iniciar las maniobras para aterrizaje.

2.6. Aterrizaje

El aterrizaje se inició con maniobras de viraje para perder altura hasta unos 30 metros en que se realizó el último para alinear el avión para que ingrese desde la cabecera sur de la pista de pasto utilizada por los aeromodelistas y de esta forma hacer contacto en pista en contra del viento.

Una vez alineado y a 100 metros aproximadamente de la cabecera de pista se pudo controlar perfectamente la trayectoria de descenso, incluso haciendo correcciones de altura para que se pudiera hacer contacto en el punto que se deseaba posar sobre la pista.

En función de ser una aeronave de baja carga alar, perfil de gran coeficiente de sustentación (Cl), y enfrentar al viento, la velocidad de aterrizaje fue sumamente baja, lo que facilitó el pilotaje seguro y estabilizado de la misma.

El tiempo de vuelo total fue de 23 minutos 40 segundos, que representa un hito en esta materia en el país y la región. La Figura 4 muestra al Solodama despegando.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 4: Solodama en el despegue

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En función de los objetivos planteados se puede determinar los siguientes resultados.

a) En relación a las características de vuelo y controlabilidad de la aeronave no se observaron que estuvieran alejadas de los resultados teóricos obtenidos durante fase del cálculo de la misma. De ellos se había determinado una velocidad de 8,2m/s de velocidad de máxima autonomía y de 10m/s de máximo alcance. La velocidad Máxima alcanza los 16m/s con comando de elevador compensado y de 5m/s de pérdida (estimados con registros fílmicos).

b) La tensión de la batería al iniciaro el vuelo era de 8,1V, y al final fue de 7,8 V, siendo este un resultado satisfactorio. Ya que se estima por la curva de descarga de la batería a 60W promedio, que la misma se encontraba con una carga equivalente ha haber volado durante 4-6 minutos, por lo que el tiempo remanente de vuelo se propulsó básicamente con energía solar, lo que evito que se descargara aún mas la batería.

ISBN: 978-987-1676-63-7

c) Se estima que el vuelo podría haberse prolongado mientras las condiciones de radiación solar no hubieran disminuido apreciablemente. Se estima que dos horas más de vuelo con buena radiación solar era factible. (hasta las 16:00 horas).

d) El MPPT-cargador mantuvo un nivel de tensión en batería de los 7,8 Voltios mencionado arriba, por lo que se considera haber trabajado adecuadamente.

e) La velocidad de aterrizaje fue con viento en contra fue mínima, se estima en unos 3-5 m/s que se condice con el viento del momento.

4. CONCLUSIONES.

I. Con elementos comerciales disponibles en el mercado, de bajo costo, y no diseñados para uso aeronáutico, se alcanza a realizar un vuelo con energía solar exclusivamente.

II. Las eficiencias detectadas en el ensayo se correspondieron con los previstos en los cálculos.

III. Se logró por primera vez en el país y Latinoamérica, el vuelo de una aeronave de desarrollo propio con energía solar [18].

IV. La eficiencia podría aumentarse de manera importante si se utilizaran elementos de mayores prestaciones [17], como las celdas, variadores, MPPT y hélices mas adecuadas entre otros. Además el aumento de magnitud favorecería números de Reynolds mas favorables.

5. REFERENCIAS.

[1] Res.2093. Proyecto “A”, “*Estudio, desarrollo e integración en ala de UAV de celdas solares monocristalinas*”, Secyt, UNC, 2011-2013.

[2] PIDDEF 043-11, “*Análisis y evaluación experimental de sistemas Brushless –LiPo - Solar, aplicables a UAVs en régimen bajo subsónico*”, Ministerio de Defensa, 2011-2014.

[3] R. Boucher, “*Project Sunrise, Flight of the Worlds First Solar Powered Aircraft*”, Los Angeles California 1974.

[4] A. Rapinett, “*Zephyr: A High Altitude Long Endurance Unmanned Air Vehicle*”. Department of Physics, University of Surrey, April 2009

[5] Solar Impulse. "*Around the World in a Solar Airplane: Solar Impulse*". En Internet: http://info.solarimpulse.com/pdf/hb-sia/hb-sia_es.pdf . Visitado Nov.2015.

[6] PIDDEF 014-10, "*UAV Solar*". Instituto Universitario Aeronáutico. En Internet: http://www.iua.edu.ar/fi/organizacion/mecanica/proyectos.php#uav_solar. Visit. Nov.2014.

[7] A. Noth, "*Design of Solar Powered Aircraft for Continous Flight*", Autonomous Systems Lab, ETH Zurich, Switzerland, September 2008.

[8] O. Elaskar, D. Fernandez, C. Bustamante, "*Desarrollo de una Balanza para Medir el Empuje y Torque en Motores Brushless en Túnel de Viento*". Presentado en III CAIM. CABA, Nov. 2012.

[9] O. Elaskar, D. Fernández, "*Diseño de prototipo de aeronave no tripulada solar*". Presentado en XV RPIC. Córdoba, Sept. 2013.

[10] O. Elaskar, D. Fernández, "*Diseño y aplicación de un sistema MPPT en paneles solares aplicado al ala de una aeronave no tripulada UAV*", En 42 JAIIO, Córdoba, Sept.2013.

[11] O. Elaskar, R. Cavallero, D. Fernandez, "*Diseño, construcción y evaluación de ala fotovoltaica para aeronaves no tripuladas*". Presentado en XI CIBIM. La Plata, Nov.2013.

[12] O. Elaskar, D. Fernández, M Pilati. "*Diseño e Integración de Aeronave No Tripulada con Energía Solar*", Presentado en IV CAIM. Resistencia, Nov.2014.

[13] O. Elaskar, "*Informe de ensayo en vuelo de UAV Dummy Solodama*", Centro de Inv. Aplicadas, FAA, Córdoba, Argentina, Agosto 2014.

[14] Everbrigthsolar. "*6x6 Monocrystaline Sollar Cells*". En Internet http://www.everbrightsolar.net. Visitado Mar. 2013.

[15] APM-.5, "*Autopiloto de código abierto*", en Internet, https://code.google.com/p/ardupilot, visitado Oct.2012

[16] XFLR 5, "*Soft de cálculo aerodinámico*", en Internet www.xflr5.com, bajado Nov.2011.

[17] T. Markvart & L Castaner, "*Solar Cells: Materials, Manuf. and Operation*", Elsevier, UK 2005

[18] Solodama "*Primer Vuelo Solar Argentino*", en Internet: www.youtube.com/watch?v=51iBms4DIlg, visitado Mar.2014.

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO DE UN CAPTADOR SOLAR DE TUBOS DE VACÍO CON ALMACENAMIENTO INTEGRADO Y SU APLICACIÓN EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN

M. Frutos [1], J. Pulfer [1], D. Belli [1], J. Carbullanca [1] y D. Sartorio[2]

[1] Laboratorio de Mecánica y Energía, [2] Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
Ruta I Mcal. Francisco Solano López, San Lorenzo, Paraguay
correo-e: mfrutos@ing.una.py

RESUMEN

La principal ventaja de los captadores solares de tubos de vacío, en relación o los clásicos captadores planos, radica en su mayor eficiencia y en la temperatura que son capaces de alcanzar. Esta característica resulta muy interesante en ciclos de refrigeración por absorción que emplean bromuro de litio, en los cuales, la potencia nominal de refrigeración se obtiene típicamente a una temperatura del agua de 84°C [1]. El uso de captadores de tubos de vacío ha experimentado una fuerte expansión en los últimos años empleándose principalmente en aplicaciones de agua caliente sanitaria (ACS) incorporando un sistema de almacenamiento de agua caliente. Esto dificulta la determinación de su eficiencia térmica según la norma UNE-EN 12975 [2] a fin de testearlo para aplicaciones en las que no se requiere el tanque de almacenamiento. Este trabajo describe el proceso de adaptación y prueba de un banco de ensayos concebido para captadores sin almacenamiento para su uso con captadores con almacenamiento incorporado, con el propósito de utilizar un captador solar diseñado para ACS en una aplicación de refrigeración solar. Se realizan las adaptaciones físicas y matemáticas, se ensaya un captador tipo para diversas condiciones de cielo y se traza su curva de rendimiento medio diario. Seguidamente se evalúa la aplicación en una máquina de absorción de 17,5 kW de capacidad. El dimensionamiento se realiza iterativamente, partiendo de un factor solar determinado, para el mes más desfavorable del año, empleando valores históricos medidos de radiación solar horizontal y temperatura ambiente. Con el número de captadores determinado previamente, se evalúa la fracción solar anual, el ahorro y el consumo de energía eléctrica anual para atender los requerimientos de refrigeración en un año típico.

Palabras Claves: *energía solar, eficiencia térmica, captador solar, refrigeración, absorción*

1. INTRODUCCION

La demanda eléctrica en el Paraguay ha crecido a una tasa interanual media de 6,3% entre los años 1994 y 2016 (Figura 1) [3]. De mantenerse esta tendencia, lo cual es probable en base a las proyecciones económicas, sin incentivos al consumo ni grandes inversiones en nuevas centrales eléctricas, la capacidad instalada del sistema (8825MW) sería alcanzada en el 2035.

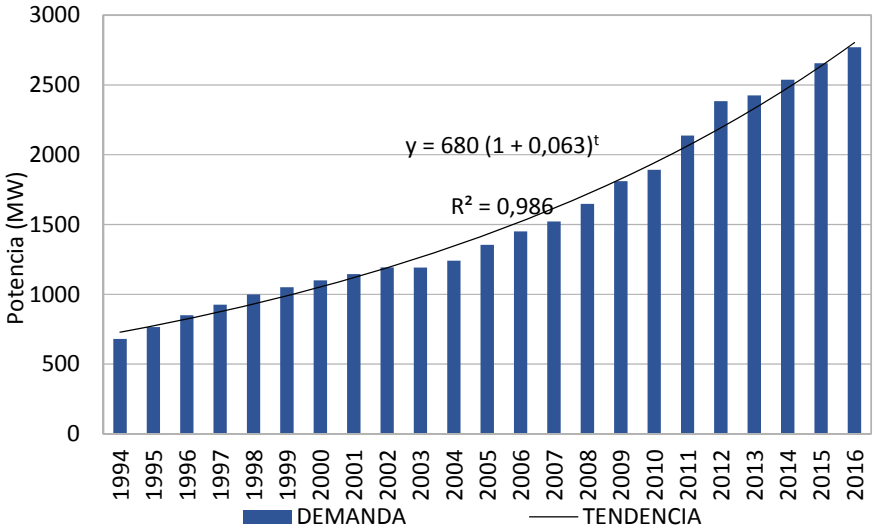


Figura 1. Evolución de la demanda eléctrica en Paraguay. Fuente: [3]

El sector residencial absorbe 43% de la demanda eléctrica del Paraguay, la contribución relativa más alta entre los países de Sudamérica [4]. En la estructura de consumo, el calentamiento de agua para uso sanitario (ACS) constituye el 23% relativo, siendo superado solamente por la demanda de refrigeración y climatización que constituye el 24% [5].

En el contexto actual, se observa una reducción histórica de los precios de la tecnología fotovoltaica, mientras que los dispositivos de calentamiento termosolar de agua ya alcanzaron precios accesibles al mercado local para su instalación en el sector residencial. En Paraguay la comercialización de estos dispositivos crece vegetativamente, sin intervención estatal de ningún tipo, a un ritmo bastante bajo [5].

Ante este escenario, la reducción de las barreras de penetración de la tecnología termosolar para calentamiento de agua podría impactar positivamente en el sistema eléctrico. Una medida que podría favorecer a este fin, sin introducir, en principio, intervencionismo estatal, es la resolución de las barreras técnicas. Entre ellas, el conocimiento de la eficiencia térmica de los captadores solares pudiera ser una de las más elementales puesto que, a partir de ella, es posible cuantificar el ahorro eléctrico posible de alcanzar con el calentamiento de agua solar.

La FIUNA ha diseñado y puesto en marcha, en el año 2013, un ***banco de ensayo de captadores solares*** (BECS) para este fin [6]. Este instrumento fue diseñado para satisfacer los requisitos de la Norma UNE-EN 12975-2 *"Sistemas Solares Térmicos y Componentes. Captadores Solares.*

ISBN: 978-987-1676-63-7

Parte 2: Métodos de Ensayo", específicamente para el ensayo de eficiencia instantánea de captadores solares de fluido sin unidad de almacenamiento [2].

El presente trabajo encara el proceso de adaptación del BECS a fin de evaluar la eficiencia de un captador de tubos de vacío con unidad almacenamiento integrada. Se elige este dispositivo por los niveles de temperatura que alcanza, su bajo coste y fácil disponibilidad en el mercado local. Estas ventajas justifican la adaptación del instrumento, a partir del cual se extraen de manera experimental los parámetros que definen su eficiencia media diaria y se evalúa su aplicación en un sistema de refrigeración de baja potencia.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Modelo y Ecuaciones

Como insumo se cuenta con el BECS, el captador de tubos de vacío (VACS), datos históricos de radiación solar, temperatura ambiente y otros parámetros meteorológicos muestreados cada 10 minutos. El BECS se compone esencialmente de un circuito hidráulico de caudal regulable, dos tanques de almacenamiento con precalentamiento de agua y el sistema de adquisición de datos. Cuenta con un sensor de radiación solar en el plano del captador, dos sensores de temperatura de agua (a la entrada y a la salida del circuito), un sensor de temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa, anemómetro para medir velocidad de viento y un caudalímetro.

El ensayo de eficiencia instantánea propuesto por la norma consiste en exponer el captador al sol durante intervalos de tiempo en los que tanto la radiación solar, la temperatura ambiente y la temperatura del fluido de trabajo se mantienen estables. Esta condición se denomina estado estacionario y emplea un modelo simplificado de captador solar en el cual se desprecia el efecto de la capacidad térmica del captador en la eficiencia instantánea. La norma [2] define la capacidad térmica de un captador solar según la siguiente expresión:

$$C = \sum_i p_i \, m_i \, c_i \qquad (1)$$

Donde p_i es el valor ponderado de la masa m_i de los i componentes del captador. El parámetro c_i representa la capacidad calorífica específica de cada componente. Los valores de ponderación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tabla de ponderación de las componentes de un captador solar para la determinación de su capacidad térmica. Fuente: [2]

Elementos	p_i
Absorbedor	1
Aislamiento	0,5
Fluido de Transferencia de Calor	1
Cubierta Exterior	0,01 *a_1
Segunda Cubierta	0,20 *a_1
Tercera Cubierta	0,35 *a_1
a_1: espesor de la cubierta	

ISBN: 978-987-1676-63-7

De esta tabla se infiere que los dos contribuyentes más importantes en la capacidad térmica de un captador solar son su absorbedor y el líquido de transferencia de calor (HTF) contenido en el mismo. Para el caso de un VACS, el absorbedor está hecho de cristal templado y la pintura absorbedora posee una masa insignificante frente a la masa del HTF. Sin embargo, la capacidad térmica de captadores solares con tanque de almacenamiento incorporado (como en nuestro caso), crece con el volumen de éste y el procedimiento de determinación de la eficiencia instantánea se hace inviable.

Para los casos en los que la capacidad térmica del captador no puede depreciarse, la norma contempla el uso de un modelo *cuasidinámico* que incorpora términos adicionales a la ecuación de eficiencia instantánea. Este modelo incluye el efecto de la capacidad térmica del captador y el procedimiento de ensayo consiste en trazar experimentalmente la curva transitoria entre dos estados estacionarios a fin de determinar la constante de tiempo τ_C (Figura 2).

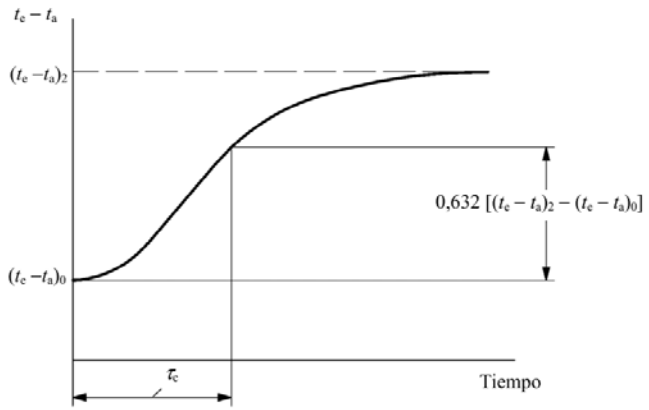


Figura 2. Constante de tiempo de un captador solar. Fuente: [3]

Sin embargo, la norma advierte de su no aplicabilidad para el caso de "*captadores en los cuales la unidad de almacenamiento sea parte integral del captador hasta el punto que el proceso de calentamiento no pueda separarse del de almacenamiento con la intención de realizar medidas de ambos procesos"*, el cual es nuestro caso y, por tanto, un enfoque diferente es necesario.

Es evidente que, si quisiéramos adaptar el BECS actual sin realizar demasiadas inversiones y sin complicar excesivamente el procedimiento de ensayo, deberíamos encontrar la forma de emplear los mismos parámetros y sensores utilizados en el modelo simplificado. Esto es posible si analizamos el problema desde el punto de vista energético. La Figura 3 muestra un problema típico de enfriamiento de una masa de fluido mediante la extracción de calor a una tasa constante, con una tasa de salida y entrada de fluido uniforme. Si reemplazamos el serpentín por un absorbedor solar e intercambiamos la situación de enfriamiento por la de calentamiento, tendríamos el caso de un captador solar con unidad de almacenamiento incorporado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

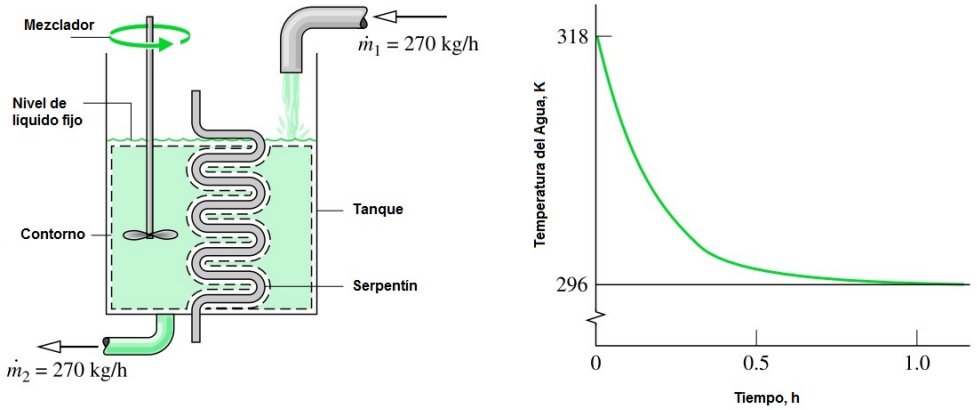


Figura 3. a) Esquema del sistema b) Respuesta en el tiempo de la temperatura. Fuente: [7]

Si bien los mecanismos de transferencia de calor en la Figura 3.a son radicalmente distintos a los de un captador solar (en este último el fluido circula por el interior de los tubos y el proceso radiativo es el preponderante), energéticamente son equivalentes y el comportamiento transitorio de la temperatura del agua en el reservorio sigue reglas similares. En la Figura 3.b se observa como ésta última evoluciona asintóticamente desde su valor inicial, siguiendo una tendencia exponencial, hasta alcanzar una temperatura de equilibrio que corresponde a un nuevo estado estacionario. La tasa uniforme de extracción de calor mediante de la serpentina de enfriamiento se puede equiparar a la irradiancia solar constante en un captador solar. Ésta es una situación real en ciertos intervalos de tiempo que, si se observa a lo largo del día, puede verse como la evolución entre dos estados estacionarios; desde antes del primer rayo de sol hasta luego del último. Desde este punto de vista, resulta inapropiado hablar de rendimiento instantáneo en un captador solar con unidad almacenamiento integrado puesto que el tiempo de respuesta podría superar el periodo en el cual la irradiancia solar puede considerarse constante. La salida que plantea este trabajo a fin de emplear los mismos parámetros del BECS y la recta clásica de eficiencia, consiste en estimar la eficiencia media diaria empleando los estados estacionarios que se dan antes de la salida y luego de la puesta de sol, integrado la irradiancia solar diaria y evaluando la temperatura de mezcla de agua (obsérvese el detalle del mezclador en la Fig. 3.a)

Como en el caso de la eficiencia instantánea, la eficiencia media diaria se puede definir como el cociente entre la energía útil transferida al fluido y la energía interceptada por el captador [2], con la salvedad de que, en lugar de tasa de energía, se utiliza la integral diaria, es decir:

$$\bar{\eta} = \frac{\int \dot{Q}_{util}\, dt}{\int \dot{Q}_{inc}\, dt} = \frac{\int c\, \dot{m}\, \Delta T\, dt}{\int G\, A\, dt} = \frac{c\, \Delta T \int \dot{m}\, dt}{A \int G\, dt} = \frac{c\, M\, \Delta T}{E\, A} \qquad (2)$$

Donde M es la masa total de fluido contenido en el captador, c es el calor específico del agua y ΔT es la variación de temperatura de mezcla del agua a lo largo del día. La integral de la irradiancia G en el plano de apertura del captador, es la energía solar diaria representada por la variable E.

Siguiendo con la lógica propuesta, la eficiencia media diaria también puede modelarse como la suma de un término independiente correspondiente al factor óptico medio del captador y un término dependiente de los parámetros medios de operación diario que fueron medidos. Este segundo término es la pendiente de la recta y representa el factor de pérdidas medio diario del captador. La ecuación de eficiencia media diaria del captador puede escribirse entonces como:

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_0 - b\,(T_m - \bar{T}_a)/\bar{G} \tag{3}$$

Donde $\bar{\eta}_0$ es el factor óptico medio diario, b es el factor de pérdidas, $\bar{T}_a$ es la temperatura ambiente media del día y $\bar{G}$ es la irradiancia media diaria en el plano de apertura del captador. La temperatura media del fluido T_m, en lugar de evaluarse como la semisuma de las temperaturas de entrada y salida, se evalúa como la semisuma de la temperatura de mezcla al inicio y al final del día. Esto es necesario puesto que este tipo de captadores carece de una entrada y salida de agua estrictamente diferenciadas ya que tanto la carga como la descarga se realizan desde el mismo reservorio.

2.2 Procedimiento de Ensayo y Adaptaciones del BECS

El circuito de ensayo sigue los delineamientos de la norma UNE-EN 12975-2 para captadores solares con cubierta ensayados al exterior. Al margen de las modificaciones estructurales que fueron necesarias para soportar la unidad de almacenamiento, el único cambio circunstancial en el circuito consiste en la reubicación de los sensores de temperatura que pasaron de uno y otro extremo donde típicamente se mide el salto de temperatura en captadores convencionales, a estar situados en las conexiones de la unidad de almacenamiento del VACS. El esquema general y los componentes de ensayo se presentan en la Figura 4.

El procedimiento consiste en la ubicación del captador en orientación norte y con una inclinación conocida (para nuestro caso 45°). A continuación, se realiza el precalentamiento del fluido térmico y se pone en marcha la bomba de circulación con el objetivo de homogenizar la temperatura del conjunto del BECS la cual será la temperatura de mezcla inicial. Todo esto se realiza minutos previos a la salida del sol.

Seguidamente se deja el VACS expuesto al sol durante todo el día, midiendo la irradiancia solar y la temperatura ambiente, con un periodo de muestreo de 1 min, cuidando que el sistema de adquisición datos opere normalmente. Minutos posteriores a la puesta del sol, se hace recircular el HTF nuevamente hasta lograr que los sensores de temperatura (símil entrada y salida del VACS) muestren valores idénticos (o casi idénticos por las pérdidas en la recirculación). Una vez lograda esta condición podemos afirmar que hemos alcanzado un nuevo estado estacionario y el valor medido corresponde a la temperatura final de mezcla.

ISBN: 978-987-1676-63-7

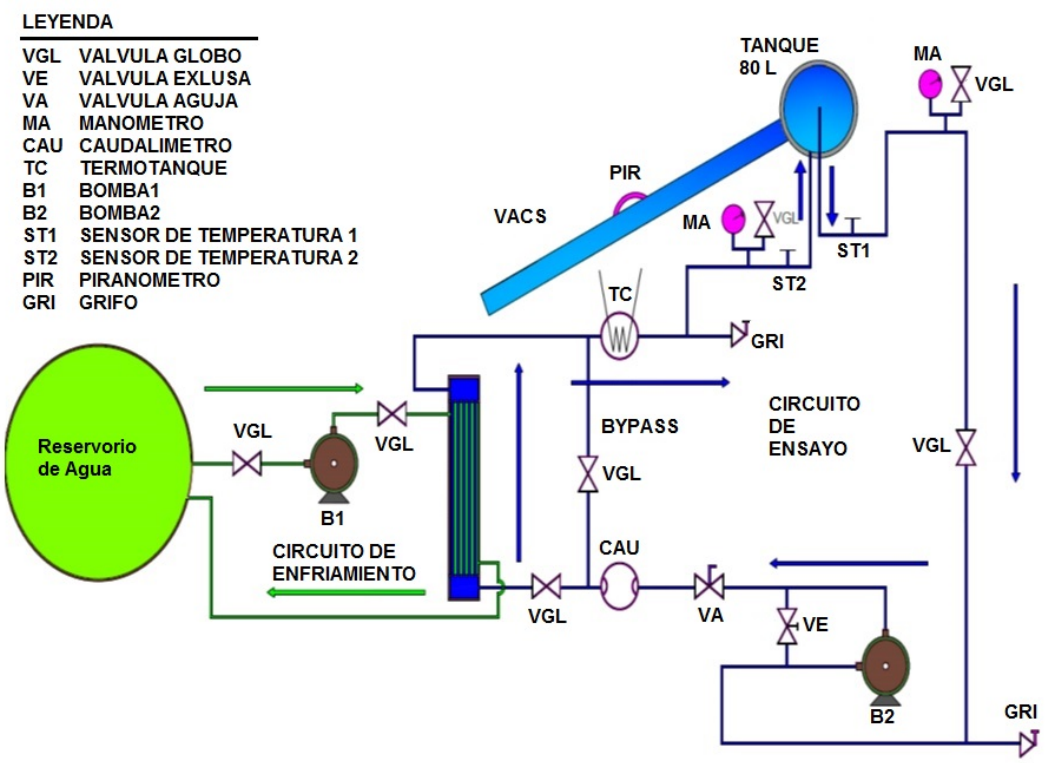


Figura 4. Esquema y componentes del bucle de ensayo. Fuente: [8]

2.3 Datos meteorológicos históricos

Para evaluar la aplicación del VACS, se emplean registros históricos de irradiancia global horizontal y temperatura ambiente promediados cada 10 minutos que fueron obtenidos por la Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción en los años 2011, 2012 y 2013. La metodología empleada para generar el año típico consta de dos pasos: a) se promedian los valores para el mismo día y hora en los tres años de datos, b) se promedian los valores diarios para obtener una única serie mensual representativa. Con esto se obtiene una serie temporal típica para cada mes del año con una resolución temporal de 10 minutos. Los valores de irradiancia horizontal típicos obtenidos se corrigen utilizando el modelo isotrópico de Liu-Jordan [9] para superficie inclinada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de la eficiencia del Captador

Los ensayos fueron realizados siguiendo los pasos descritos en el apartado 2.2 solamente en días claros o parcialmente nublados. Varias series fueron descartadas por pérdida de datos o por la aparición de chaparrones súbitos. Los ensayos se realizaron en el periodo de noviembre de 2015 a enero de 2016 obteniéndose 11 puntos que se representan en la Figura 5 en función

ISBN: 978-987-1676-63-7

del parámetro $T^* = (T_m - \bar{T}_a)/\bar{G}$, equivalente a la expresión de *Temperatura Reducida* de la norma [2].

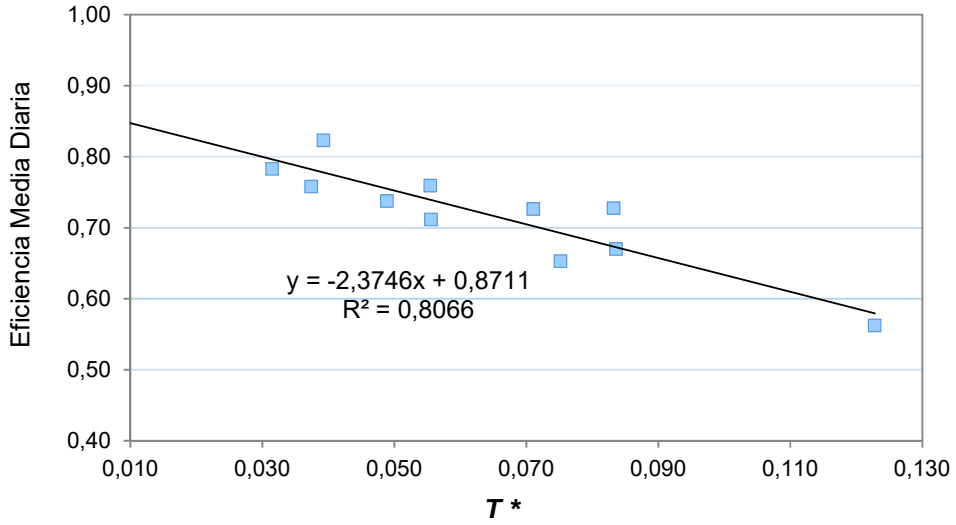


Figura 5. Recta de eficiencia media diaria del captador ensayado. Fuente: [8]

3.2 Determinación del perfil típico de temperatura ambiente y radiación solar

En la Figura 6 se representa el perfil diario típico de temperatura ambiente en la ciudad de Asunción, generado según la metodología del apartado 2.3, para los meses en los que ésta supera 25°C en algún momento del día, valor considerado como límite de confort. Esto ocurre en la fracción anual que va del mes de setiembre, coincidente con el inicio de la primavera, hasta el mes de abril, coincidente con el inicio del otoño. Esta consideración es esencial puesto que se evalúa la aplicación del VACS y su aporte energético como sistema auxiliar en un sistema de refrigeración por absorción, alimentado por agua caliente, que opera solo en los meses en que la refrigeración es requerida, en la fracción horaria de 9 a 17h. La ventaja de este sistema radica en que cuanto mayor es la demanda de refrigeración, mayor es la oferta de energía solar para alimentar la máquina de absorción. En el caso del mes de setiembre, se requeriría refrigeración activa recién desde las 11:40h.

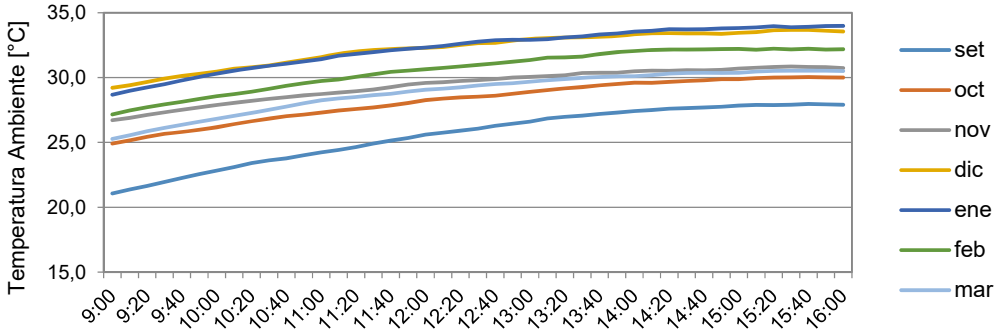


Figura 6. Perfil diario de temperatura ambiente en los meses cálidos en Asunción. Fuente: [8]

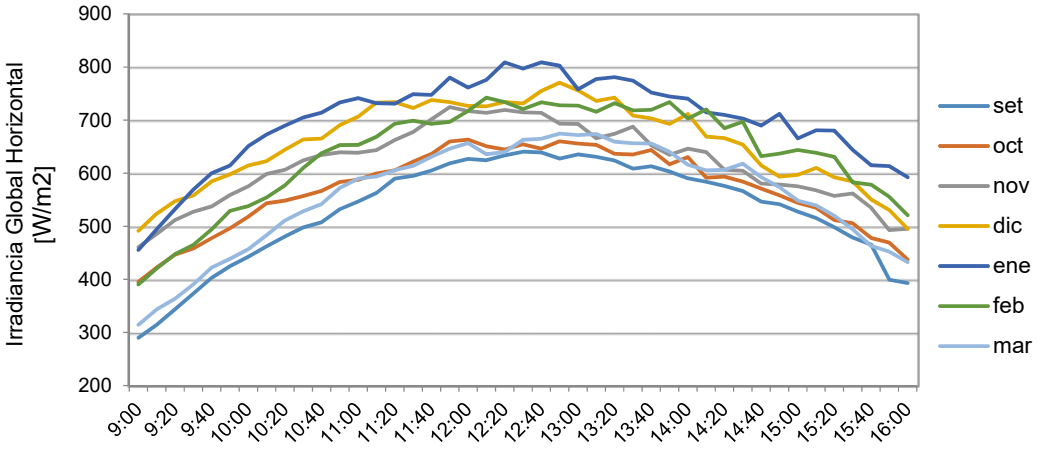


Figura 7. Perfil diario de la irradiancia solar en superficie horizontal. Fuente: [8]

En la Figura 7 se aprecia el perfil diario de radiación solar promediado en base a 3 años de medidas en tierra. De modo simplificado y a efectos de cálculos referenciales, se asume que la radiación solar típica diaria responde a dichos valores medios. Un cálculo adicional se realiza para estimar la radiación solar diaria en el plano óptimo, utilizando del modelo de Liu-Jordan [9]. Tras varias iteraciones se encuentra que el ángulo óptimo para Asunción es de 35° de inclinación.

3.3 Dimensionamiento del campo solar y determinación del ahorro

Para evaluar la demanda de agua caliente requerida por la máquina de absorción, se supone la condición más desfavorable en la que la ésta funciona a su capacidad nominal de 17,5 kW durante todo el ciclo de operación diario.

Tabla 2. Dimensionamiento del campo solar para fracción solar de 0,85. Fuente: [8]

MES	Capacidad de producción de agua, de un captador (Litros)	Volumen de agua para 85% de la demanda de agua caliente (Litros)	Cantidad de captadores para satisfacer 85% de la demanda de agua caliente
ENERO	655	29.376	45
FEBRERO	584	29.376	50
MARZO	512	29.376	57
ABRIL	405	23.868	59
MAYO	…	…	…
JUNIO	…	…	…
JULIO	…	…	…
AGOSTO	…	…	…
SEPTIEMBRE	473	20.196	43
OCTUBRE	500	29.376	59
NOVIEMBRE	545	29.376	54
DICIEMBRE	590	29.376	50

ISBN: 978-987-1676-63-7

Otra consideración esencial en el presente estudio es la de hibridar el sistema de calentamiento solar con un sistema de calentamiento eléctrico a fin de, además de estudiar su impacto económico, contemplar la realidad técnica de la intermitencia de la radiación solar. Para este caso se considera una *fracción solar* de diseño de 0,85. Empleando los parámetros de una máquina de absorción de simple efecto marca Yazaki de 17,5 kW de capacidad de refrigeración, la oferta de radiación solar en el ángulo óptimo de 35° y la función de eficiencia media diaria del captador para elevar la temperatura del agua de 83°C a 88°C (salto de 5°), se estima el número de captadores necesario mes a mes. Los resultados se muestran en la última columna de la Tabla 2.

Así, los meses de mayor demanda de agua caliente son abril y octubre requiriendo un total de 59 captadores. Por facilidad y simetría se consideran 60 captadores a los efectos de cáculo. En la Tabla 3 se estima la producción de agua caliente de un campo solar de este tamaño, así como el factor solar mensual y la energía eléctrica consumida por el sistema auxiliar. En las últimas columnas se evalúa el costo del consumo de energía eléctrica para una tarifa comercial promedio de 315Gs/kWh.

Tabla 3. Estimación de la producción del campo solar y el costo energético del sistema auxiliar. Fuente: [8]

MES	Producción de agua caliente a partir de 60 captadores (Litros)	Fs (Factor solar)	Agua calentada con resistencia eléctrica (Litros)	Energía consumida por la resistencia (Kj)	Gs por día de consumo eléctrico	Gs por mes de consumo eléctrico
ENERO	39.299	1,14	-4.739	0	0	0
FEBRERO	35.020	1,01	-460	0	0	0
MARZO	30.721	0,89	3.839	80.228	8.134	252.161
ABRIL	24.316	0,87	3.764	78.673	7.977	239.296
MAYO	…	…	…		0	0
JUNIO	…	…	…		0	0
JULIO	…	…	…		0	0
AGOSTO	…	…	…		0	0
SEPTIEMBRE	28.379	1,19	-4.619	0	0	0
OCTUBRE	30.020	0,87	4.540	94.880	9.620	298.214
NOVIEMBRE	32.682	0,95	1.878	39.246	3.979	119.373
DICIEMBRE	35.378	1,02	-818	0	0	0

Comparativamente, estimando que el consumo de un equipo de refrigeración compacto de 5TR sea de aproximadamente 7,7 kW; el gasto eléctrico mensual en las condiciones de operación descritas anteriormente sería del orden de 1300 kWh-mes. Esto equivaldría a un gasto en la factura eléctrica de aproximadamente Gs 410.000.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONLUSIONES

A través del presente estudio se ha evaluado exitosamente la adaptación de los principios de la norma UNE-EN 12975-2, concebida para captadores solares sin unidad de almacenamiento, al estudio de un captador solar con unidad de almacenamiento integrado. Las adaptaciones físicas y matemáticas necesarias para la evaluación experimental de la eficiencia del captador en estudio, han resultado sin muchas complicaciones y a un costo prácticamente nulo. Con ello se logra resolver una incógnita importante en la caracterización energética de captadores solares con almacenamiento integrado, de gran disponibilidad y bajo coste en el mercado local, allanando el camino para potenciales aplicaciones a nivel residencial e industrial.

La evaluación de su aplicación en un sistema de refrigeración por absorción, arroja luz sobre los potenciales ahorros en materia de energía eléctrica. El ahorro en costos operativos que supone la sustitución de un equipo convencional de compresión de vapor por una máquina de absorción que emplea energía térmica de origen solar, podría compensar la inversión inicial en esta tecnología luego de unos años. Con esto queda planteada la necesidad de una evaluación económica detallada. Numerosas incógnitas surgen a partir de las suposiciones realizadas en cuanto a operación del sistema, que depende grandemente de las características del edificio y de la rutina de sus ocupantes. Se plantea como necesidad la profundización en los aspectos operativos si fuese posible en una instalación experimental operativa. Se destaca y agradece la colaboración de la empresa Energía Alternativa SA por la provisión del captador solar para la realización del presente estudio.

5. REFERENCIAS

[1] Rosiek S., Batlles F.J. *Integration of the solar thermal energy in the construction: Analysis of the solar-assisted air-conditioning system installed in CIESOL building.* Renewable Energy, Elsevier Vol. 34 p.p. 1423–1431, 2009

[2] UNE-EN 12975-2 Sistemas Solares Térmicos y Componentes. Captadores Solares. Parte 2: Métodos de Ensayo. Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011.

[3] www.ande.gov.py

[4] CIER. *Síntesis Informativa Energética de los Países de la CIER. Información del sector energético en países de América del Sur, América Central y El Caribe. Datos del año 2012*. Comisión de Integración Energética Regional, Montevideo, Uruguay, 2013.

[5] VMME. *Balance Energético Nacional 2013 - En términos de Energía Final.* Asunción.

[6] Benítez A., Medina M. A. *Diseño e Implementación de un Banco de Ensayos para Caracterización de Captadores Solares Planos en la Facultad de Ingeniería.* Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, 2013.

[7] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Vol. 6th. John Wiley & Sons, 2007

[8] Belli D., Carbullanca J. *Determinación Experimental del Rendimiento de un Colector Solar Térmico a Tubo de Vacío y su uso para un Sistema de Refrigeración por Absorción.* Trabajo final de grado. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, 2016.

[9] B. Y. H. Liu, R. C. Jordan. *The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.* Solar Energy, vol. 4, no. 3, pp. 1–19, Jul. 1960.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS

M. Frutos [1], D. Sartorio [1] A. Benitez [1] y M. Medina [1]

[1] Laboratorio de Mecánica y Energía – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción
Ruta I Mcal. Francisco Solano López, San Lorenzo, Paraguay
correo-e: mfrutos@ing.una.py

RESUMEN

El rendimiento térmico de un captador solar es un parámetro esencial para el dimensionamiento de un campo solar y puede ser determinado mediante su análisis termodinámico en un banco de ensayos. El presente trabajo describe el proceso de diseño, fabricación y validación de un banco de ensayos de captadores solares basado en los principios de la norma UNE-EN 12975 [1]. Dicha norma sugiere la caracterización de captadores solares con y sin cobertura tras la determinación de la eficiencia instantánea en estado estacionario y cuasi-dinámico. Para las medidas de temperatura y caudal se emplean instrumentos industriales de mayor precisión disponibles en el mercado, adaptándolos para su monitorización con un sistema de adquisición de datos equipado con transmisión inalámbrica. La radiación solar en el plano de incidencia se mide con un piranómetro termoeléctrico calibrado en fábrica. Los parámetros meteorológicos son monitorizados mediante una estación meteorológica de buena calidad adaptada al efecto. El circuito hidráulico se diseña para aumentar la versatilidad de los ensayos llevados a cabo, incorporando un sistema auxiliar de calentamiento y almacenamiento de agua. A modo de validación, en una primera instancia se comprueba la estabilidad de los parámetros requeridos por la norma para alcanzar el estado cuasi-dinámico. En un segundo momento, se comparan los resultados del ensayo de eficiencia instantánea de un captador solar fabricado localmente, con los resultados del modelo EFICAP desarrollado paralelamente al diseño del banco. Como resultado, se demuestra la estabilidad de los parámetros térmicos requerida por la norma durante el ensayo. En cuanto a la evaluación de eficiencia instantánea, se observa una deriva importante en relación a los resultados del modelo, para lo cual se sugiere la realización de ensayos adicionales en condiciones de cielo claro y de horizonte despejado [2]. Se sugiere además la calibración del banco con un captador solar de curva de eficiencia conocida.

Palabras Claves: *energía solar, caracterización, eficiencia térmica, captador solar, banco de ensayos*

1. INTRODUCCIÓN

La matriz energética de consumo del Paraguay está compuesta por 45% de biomasa, 38% de hidrocarburos y tan solo un 17 % de energía eléctrica [3]. Esto ocurre, paradójicamente, pese a ser uno de los países con mayor producción de energía eléctrica per-cápita del mundo. Un 56% de la biomasa corresponde al consumo industrial de leña no reforestada, la cual deviene probablemente de la conversión de uso de terreno forestal en terreno agrícola.

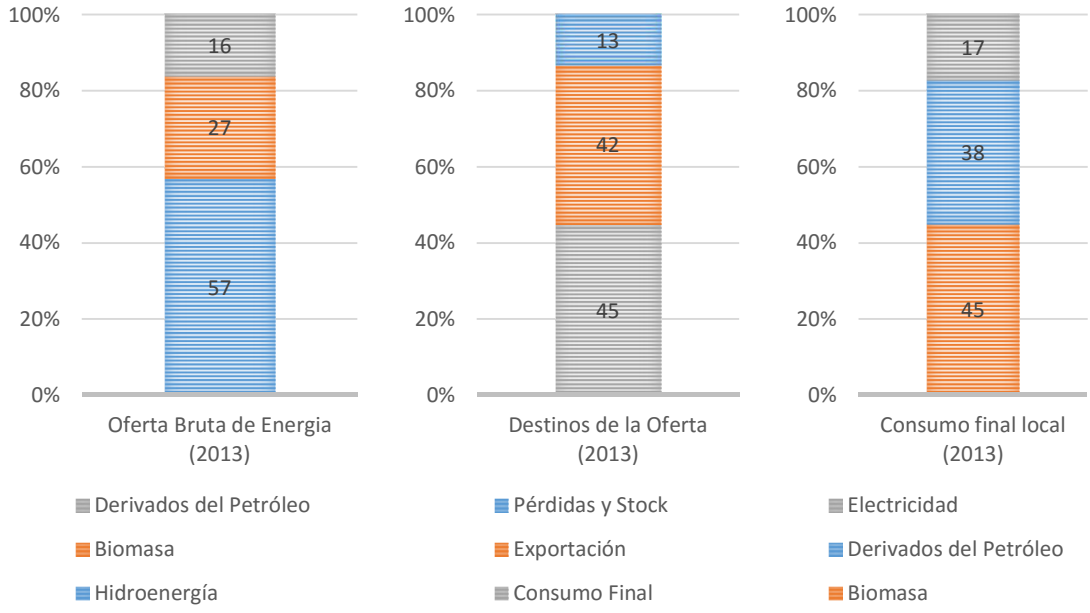


Figura 1. Estructura de la matriz energética del Paraguay del año 2013. Fuente: [3]

La demanda de electricidad crece sostenidamente a una tasa media de 9% interanual, pasando de 800MW en el año 1994 a 2500MW en el año 2014 [4]. Sin inversiones adicionales, la capacidad de generación del sistema sería alcanzada en 14 años. Sin embargo, el problema más acuciante en términos energéticos en Paraguay no deviene de su generación eléctrica sino de su baja capacidad de transporte y distribución, haciendo con que en los últimos años varios incidentes dejaran sin suministro eléctrico a más de 100 mil habitantes por varios días [5].

El sistema eléctrico paraguayo se abastece de tres centrales hidroeléctricas a saber; la binacional Itaipú en copropiedad con Brasil, la binacional Yacyretá con Argentina y la central propia de Acaray. Además, cuenta con centrales diésel en puntos aislados de la red de transmisión, totalizando una capacidad de 9425 MW [4]. El centro de carga se encuentra en la ciudad de Asunción, su capital, ubicada a 350km de la central más cercana. Esto configura una topología de red radial con alto nivel de pérdidas que, junto a una pequeña fracción de stock de energéticos, ronda el 13% [3].

ISBN: 978-987-1676-63-7

El aprovechamiento distribuido de la energía solar surge como una alternativa para atender tanto el crecimiento vegetativo de la demanda como para dar respuesta al elevado nivel de pérdidas del sistema eléctrico. Esto permitiría también diversificar la matriz energética, fortaleciendo la flexibilidad y confiabilidad del sistema eléctrico evitando la importación de energéticos y la emisión de gases. La utilización de captadores solares para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) para uso residencial, comercial o industrial surge como prioridad para la introducción de la energía solar en la matriz energética del Paraguay, gracias a la madurez y relativa simplicidad de la tecnología.

El presente trabajo atiende la necesidad de sortear una de las barreras más importantes en la utilización de la energía solar y la introducción de la tecnología al mercado como alternativa energética: la tasa de conversión de radiación solar en energía útil. El enfoque utilizado es el instrumental, más específicamente, propone el diseño, construcción y validación de un *banco de ensayos para captadores solares* (BECS) como herramienta para evaluar la eficiencia térmica de los captadores. El diseño del BECS se centra exclusivamente en captadores solares que empleen fluidos incomprensibles como fluido de transferencia de calor (HTF).

Como base para el diseño del BECS, se han utilizado los principios y esquemas representados en la norma UNE-EN 12975 *"Sistemas solares térmicos y componentes, captadores solares. Requisitos generales y métodos de ensayo"* [1]. Con ello se busca acortar los pasos de diseño y ceñir los ensayos a un marco de referencia internacional de manera a hacer comparables los resultados obtenidos. Un motivo no menos importante para la utilización de dicho estándar es la intención de capitalizar la experiencia generada a lo largo de años de investigación y desarrollo a nivel global en el contexto de la fabricación y prueba de captadores solares.

A modo de comprobación de operación del BECS, se realizan ensayos de campo a fin de verificar la continuidad y estabilidad de sus parámetros. Seguidamente, se comparan con simulaciones computacionales de un captador solar de referencia, modelo que fue generado paralelamente. Los resultados muestran que el BECS cumple los requisitos esenciales para realizar ensayos acordes a la norma. En base a los resultados se demuestra también el potencial del BECS para ajustar los parámetros del modelo a fin de validarlo experimentalmente.

Como conclusión, el trabajo aporta un primer impulso al desarrollo de la disciplina de la energía solar en Paraguay. El objeto de la incursión del sector académico en esta área, es el de auxiliar a las instituciones públicas en la redacción de políticas, planes y estándares. Además, pretende animar al sector privado a la utilización de la tecnología mediante la resolución de incertidumbres técnicas. La iniciativa constituye una propuesta estratégica que pretende explotar las competencias existentes en la academia en beneficio de la sociedad. El proyecto fue financiado con fondos de investigación del Rectorado de la Universidad Nacional de Asunción y fondos propios de Facultad de Ingeniería.

2. ECUACIONES Y METODO

2.1 Transferencia de calor en un Captador Solar

En un captador solar típico, los procesos de intercambio de energía se efectúan en virtud de una combinación de transferencia de calor por *conducción*, *convección* y *radiación* involucrando un fluido de transferencia de calor (HTF) que aprovecha solo el efecto del calor sensible. Si bien existen captadores que aprovechan el efecto de cambio de fase del HTF, extrayendo aún mayor energía en forma del calor latente, éstos escapan al alcance del presente estudio.

Los procesos de *conducción* se dan principalmente en la transferencia de calor desde el absorbedor hasta los tubos por los que circula el HTF, siendo por tanto un proceso crucial para el desempeño térmico. Los materiales utilizados son buenos conductores de calor, Ej.; el acero, aluminio o cobre. Ésta juega un papel preponderante también en las aislaciones entre el conjunto absorbedor y las superficies que se encuentran en contacto con éste. En éste caso se busca reducir al máximo las pérdidas empleando materiales aislantes. La ecuación que rige este modo de transferencia es la Ley de Fourier para flujo unidireccional de calor entre dos superficies a diferentes temperaturas [6].

La trasferencia de calor por *convección* se da en el intercambio de calor entre las paredes de los tubos del absorbedor y el HTF, siendo por tanto igualmente crítico para el desempeño térmico. Existen igualmente procesos convectivos que deben ser reducidos o evitados. Tal es el caso de la convección que se efectúa externamente a los tubos del absorbedor que, de no contar con una cubierta protectora, se enfriarían indeseablemente reduciendo el rendimiento del captador. Para ellos se agrega una cubierta de vidrio (o una doble pared en el caso de tubos de vacío) generando una cámara de aire de aislación o, en otros casos, mediante una cámara de vacío.

Debido a la naturaleza radiativa del sol, los procesos de conversión térmica asociados a la transferencia de calor por *radiación* ejercen un rol fundamental en el desempeño térmico. Es fundamental la selección apropiada de materiales y texturas de manera a que los parámetros de *absortancia* (α), *transmitancia* (τ) y reflectancia estén en la relación adecuada para cada parte específica del captador.

Por ejemplo, es importante prever que la cubierta transparente que evita las pérdidas convectivas no obstruya el paso de la radiación visible que proviene del sol. Igualmente es deseable aprovechar esta cubierta para evitar las pérdidas radiativas que se dan en el sentido inverso, desde el absorbedor hacia el ambiente, en el espectro infrarrojo [6]. La absortancia del absorbedor es un parámetro esencia para convertir la mayor cantidad de energía solar incidente en energía útil. Este proceso adquiere una relevancia mayor desde que la Ley de Stefan-Boltzmann nos dice que la energía transferida por radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura del cuerpo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2 Balance de Energía y Eficiencia de un Captador Solar

La relevancia de los modos de transferencia de calor en un captador solar está en el interés de detectar los parámetros esenciales a tener cuenta en el diseño óptimo, así como para estudiar el balance de energía y la eficiencia térmica. La combinación de mecanismos de transferencia de calor se puede sintetizar en varios modos de pérdidas térmicas que se esquematizan en la Figura 2.

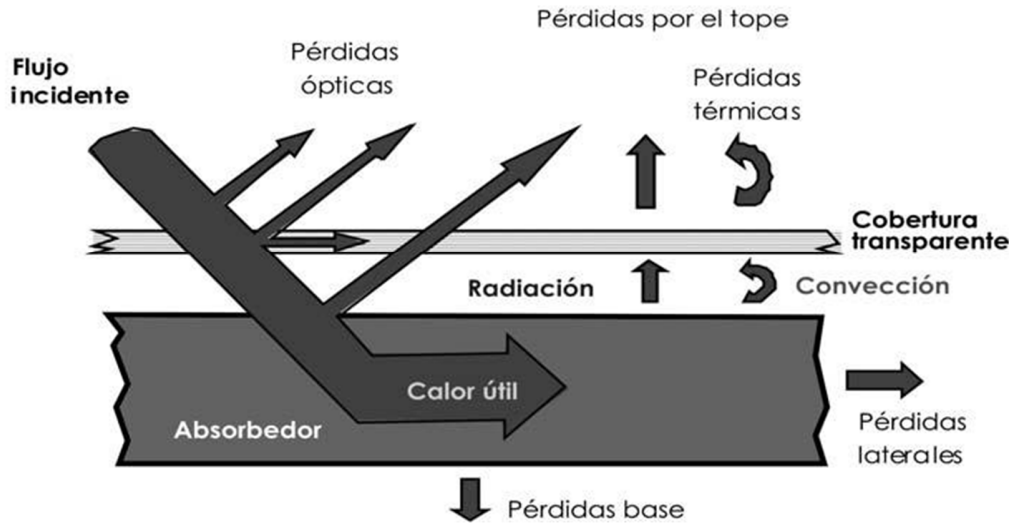


Figura 2. Pérdidas y balance de Energía en un captador solar. Fuente: [7]

A partir de ello se desarrollan las ecuaciones de balance de energía de un captador solar. En estado estacionario, la energía efectivamente transmitida al HTF se denomina *calor útil* y se evalúa como la diferencia entre la radiación solar absorbida y el calor perdido por el captador. El *calor absorbido* efectivamente por la placa es lo que resta de la radiación solar que logró atravesar la cubierta del captador, función de su transmitancia, y que fue capaz de convertirse en energía térmica, lo cual es directamente proporcional a la absortancia de la placa absorbedora de área A_p. Luego:

$$\dot{Q}_{abs} = \tau\, \alpha\, G\, A_p \tag{1}$$

Los parámetros τ y α dependen tanto de la longitud de onda como del ángulo de incidencia de la radiación solar. El parámetro G representa la *irradiancia global* en el plano del captador de banda ancha, es decir, a lo largo de todo el espectro de onda corta. Por ende, los parámetros de absortancia y transmitancia aquí empleados corresponden también a valores de banda ancha, es decir, la integral de la función espectral. El efecto del ángulo de incidencia puede despreciase siempre y cuando éste no supere los 20° [1].

Las distintas pérdidas que se dan en un captador solar pueden resumirse en un factor global de pérdidas por unidad de área del absorbedor (U_l) y puede sintetizarse en una ecuación que depende

ISBN: 978-987-1676-63-7

linealmente de la diferencia de temperatura entre la placa absorbedora (T_p) y la temperatura ambiente (T_a). Así, el *calor perdido* por el captador solar es:

$$\dot{Q}_{perd} = U_l \, A_p \, (T_p - T_a) \tag{2}$$

El *calor útil* transferido al HTF se puede escribir como:

$$\dot{Q}_{util} = \tau \, \alpha \, G \, A_p - \, U_l \, A_p (T_p - T_a) \tag{3}$$

La energía que incide en el área de apertura A_a del captador se evalúa por:

$$\dot{Q}_{inc} = A_a \, G \tag{4}$$

La eficiencia térmica instantánea de un captador solar se define como el cociente entre el calor útil y la energía solar incidente, o sea:

$$\eta = \frac{\tau \, \alpha \, G \, A_p}{G \, A_a} - \frac{U_l \, A_p \, (T_p - T_a)}{G \, A_a}$$

La temperatura de la placa es difícil de evaluar y es preferible expresar la ecuación anterior en términos de la *temperatura media* del fluido (T_m). Si tomamos en cuenta que en la realidad esta última no es exactamente igual a la temperatura de la placa, es necesario incorporar una corrección mediante el coeficiente FR conocido como *factor de remoción* de calor que tiene en cuenta la eficacia del intercambio de calor entre los tubos y el HTF. Si consideramos que en muchos casos el área de apertura del captador es equivalente al área del absorbedor, podemos escribir:

$$\eta = FR \, \tau \, \alpha - FR \, U_l (T_m - T_a)/G \tag{5}$$

La Ecuación (5) expresa la eficiencia instantánea de un captador solar según el modelo simplificado clásico. El producto $FR \, \tau \, \alpha$ se define como el *factor óptico* y representa la capacidad de absorción bruta de radiación solar. El término $FR \, U_l$ se conoce como el factor de pérdidas y representa en forma global el nivel de aislación térmica del captador.

2.3 Determinación experimental de la curva de eficiencia térmica

Los ensayos de eficiencia de un captados solar se realizan en condiciones estacionarias, esto es, en un momento del día en que la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura ambiente y de entrada del fluido son virtualmente constantes [1]. La duración del ensayo coincide con un periodo de tiempo en el que la temperatura de salida del fluido y el calor extraído tampoco varían apreciablemente. Si asumimos que el factor de pérdidas no depende de la temperatura del fluido, lo cual es una suposición razonable para un modelo simplificado [6], con el término $(T_m - T_a)/G$ conocido como *temperatura reducida* como variable independiente, la eficiencia es una recta con término independiente $FR \, \tau \, \alpha$ y pendiente $FR \, U_l$, como se muestra en Figura 3.

ISBN: 978-987-1676-63-7

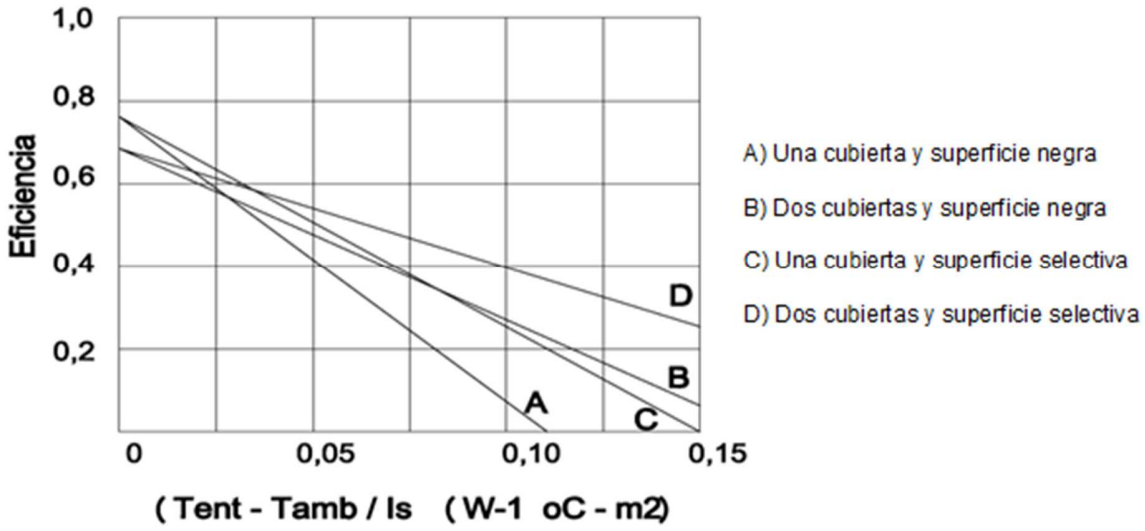


Figura 3. Curva de eficiencia instantánea de cuatro tipos de captadores solares. Fuente: [7]

Para el ensayo, se expone el colector a la radiación solar en incidencia casi normal ($\theta < 20°$) registrando y manteniendo la temperatura de entrada del fluido constante (T_e). A continuación, se mide la temperatura de salida (T_s), el caudal másico ($\dot{m}$) y la radiación solar incidente en el plano del captador. Se registra además la temperatura ambiente y la velocidad media del viento en el plano de inclinación del captador verificando que esta última se encuentre en el rango de variación máxima propuesta por la norma.

El *calor útil* se evalúe entonces por:

$$\dot{Q}_{util} = \dot{m}\, c\, (T_s - T_e) \tag{6}$$

Para encontrar los demás puntos de operación, se modifican los parámetros hasta alcanzar estado estacionario y se vuelve a realizar el ensayo. Una vez generada una nube de puntos de eficiencia, se ajusta una recta por el método de los mínimos cuadrados para así obtener finalmente el *factor óptico* y el *coeficiente de pérdidas* del captador de forma empírica.

3. CONFIGURACION DEL BECS

3.1 Sensores, instrumentación y circuito hidráulico

La Norma UNE-EN 12975-2 describe el tipo y la precisión requerida en la instrumentación, así como la forma de montaje de los sensores. Se ha intentado por todos los medios alcanzar dicho estándar, sin embargo, esto no ha sido del todo posible por indisponibilidad de instrumentos en el mercado o, en su caso, por el elevado costo de importación. En la Tabla 1 se resumen las características de los sensores exigidos por la norma y los efectivamente implementados en el BECS.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Instrumentación requerida por la norma y la implementada en el BECS. Fuente: [1, 7]

REQUERIDO POR LA NORMA		IMPLEMENTADO	
Instrumento / Parámetro	**Características**	**Sensor**	**Características**
Piranómetro / Radiación global de onda corta	Rango espectral: 0,285 a 2,800 µm Precisión: Clase I o superior	Piranómetro termoeléctrico	Rango espectral: 0,3 a 2,8 µm Rango: 0 a 2000W/m2 Precisión: Clase I
Termómetro / Temperatura ambiente	Incertidumbre típica: 0,5 K	Termistor NTC	Rango: ±50°C Precisión: ±0,1°C Cte. de tiempo: 10s
Termómetro / Temperatura de fluido	Incertidumbre típica: 0,1 K Resolución digital: ±0,02 k	Sonda de temperatura PT-100	Precisión: clase A ±0,15°C; ±0,06 Ω 4 hilos
Caudalímetro / Caudal másico	Incertidumbre típica: ±1% del valor medido	Caudalímetro tipo Bourdon muelle tubular	Precisión: clase B Temperatura máxima: 90°C
Anemómetro / Velocidad del viento	Incertidumbre típica: 0,5 m/s	Anemómetro tipo hélice	Rango: 0 - 100m/s Umbral: 1m/s Resolución: 0,1m/s Precisión: ±0,3m/s

La norma sugiere dos configuraciones de circuito hidráulico: uno abierto y otro cerrado. Ambas tienen en común el control de la temperatura de entrada del agua sugiriendo para ello un control redundante. El único elemento diferenciador entre ambas configuraciones es el *calentador/enfriador de control de temperatura primario,* el cual para el primer caso se basa en un intercambiador de calor y en el segundo en un estanque de enfriamiento.

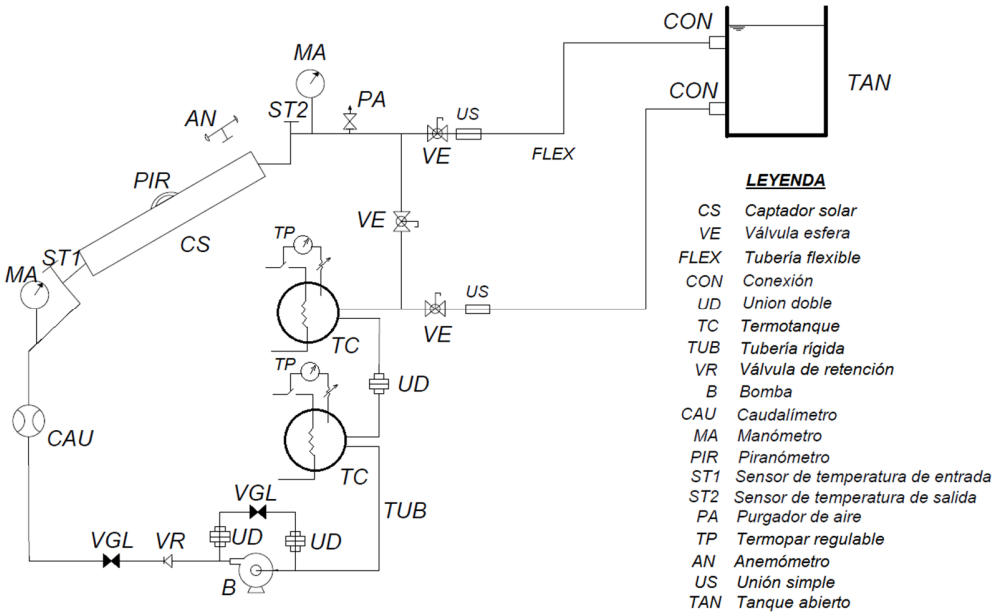


Figura 4. Esquema del circuito hidráulico del BECS. Fuente: [7]

ISBN: 978-987-1676-63-7

Algunas simplificaciones fueron hechas por razones económicas cuidando de mantener los principios de la norma: 1) el circuito hidráulico se diseña para operar tanto en bucle abierto como cerrado 2) se reemplazan los reguladores de temperatura primario y secundario por dos termotanques aislados de 80 litros conectados en serie, dotados de una resistencia eléctrica y termopares regulables 3) se suprime el pirgeómetro y el generador de viento limitando el flujo de radiación infrarroja y la velocidad de viento actuando sobre las condiciones de ensayo 4) se suprimen el visor y el filtro por el control previo del fluido. El circuito final se muestra en la Figura 4. Pese a lo anterior, las modificaciones no distorsionan el objetivo inicial del trabajo de arrojar luz sobre la adaptación de una metodología estándar a las condiciones y disponibilidades locales.

3.2 Características del captador ensayado

Para la comprobación del funcionamiento del BECS, se ensaya un captador solar fabricado localmente por la empresa CEDESOL con el objeto de conocer detalladamente sus componentes y poder simular computacionalmente su comportamiento térmico. Para ello fue empleado el programa EFICAP [2] desarrollado paralelamente al presente proyecto. Dicho programa fue validado mediante la comprobación de sus salidas con las curvas de eficiencia de varios captadores solares comerciales bien conocidos. Así, con el programa validado, se estima la curva de eficiencia del captador de CEDESOL y se comparan con los resultados del ensayo en el BECS.

Las características de dicho captador se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del captador solar CEDESOL ensayado. Fuente: [2]

General	Tipo: Dimensiones:	Placa plana 2 x 1 m
Cubierta	Nro. de Cubiertas: Material de cubierta:	1 Vidrio común
Absorbedor	Área: Material (placa/tubos): Tratamiento superficial: Capacidad de los tubos: Número de tubos: Diámetro de los tubos: Peso en vacío:	1,8 m^2 Acero / Cobre Pintura negra 2 litros 6 ¼” 68 kgf
Aislación	Espesor (lateral/posterior): Material:	10mm / 30mm Fibra mineral
Límites	Temperatura máxima: Presión máxima:	90°C 10 kgf/cm2

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. RESULTADOS

4.1 Comprobación de la estabilidad de los parámetros

Para asegurar la operación del BECS en estado estacionario, la norma acota el nivel de variación de los parámetros de ensayo durante su realización. Los valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Desviación permitida de parámetros durante el ensayo en estado estacionario. Fuente: [1]

Parámetro	Desviación permitida del valor medio
Irradiancia global:	± 50W/m^2
Temperatura ambiente:	± 1,5 K
Caudal másico del fluido:	± 1%
Temperatura del fluido (entrada):	± 0,1 K

En un ensayo preliminar, se estudia la estabilidad de los valores de irradiancia solar en el plano de apertura del captador (45°) en orientación norte, comparándolo con valores de irradiancia medidos simultáneamente en superficie horizontal. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 5 los resultados de las mediciones realizadas en un día del mes de julio. Se comprueba que la irradiancia en superficie inclinada es substancialmente mayor a la de superficie horizontal lo cual era de esperarse especialmente en los meses de invierno.

La irradiancia en superficie inclinada se mantiene dentro del rango de variabilidad exigido por la norma por un el intervalo de casi 1,5h desde las (10.48 hasta las 12.15), tiempo suficiente para realizar el ensayo. Esta comprobación se realiza para todos los días de ensayo.

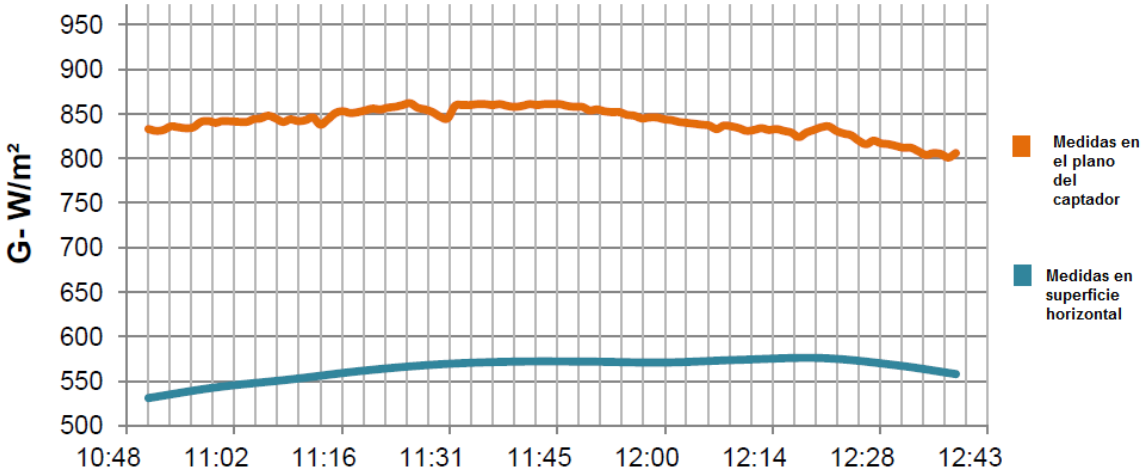


Figura 5. Comprobación de la estabilidad de la irradiancia solar durante el periodo de ensayo. Fuente: [7]

En cuanto a la temperatura de entrada de fluido la norma es bastante. En la Figura 6 se representa el comportamiento de los parámetros de temperatura de entrada y salida del captador para el mismo

día. Se muestra también la transición que se da al inicio del ensayo, cuando habiendo un gradiente de temperatura dentro del circuito, se arranca la bomba para iniciar la circulación del fluido y se alcanza un régimen estable luego de un tiempo. Al tratarse de una irradiancia también estacionaria, la temperatura de salida del captador es bastante estable.

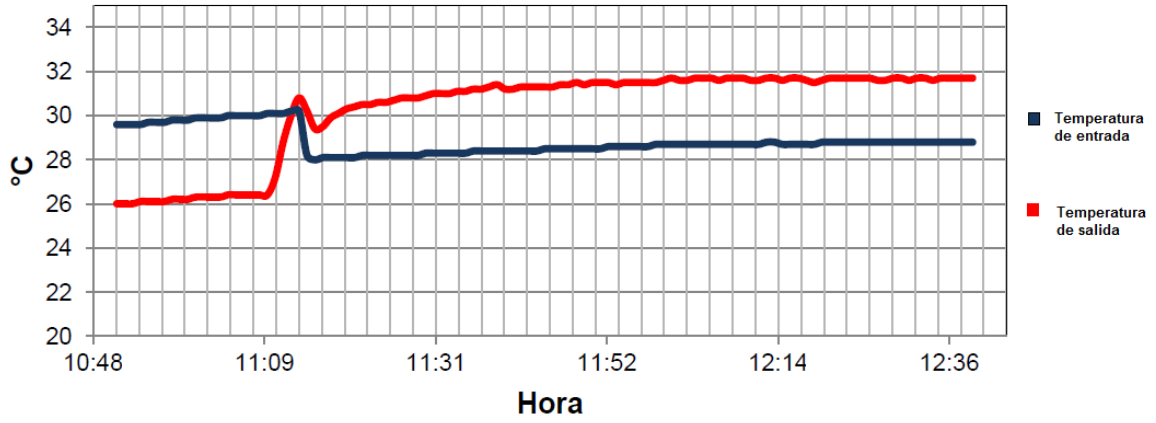


Figura 6. Comprobación de la estabilidad de la temperatura de entrada del fluido. Fuente: [7]

En lo que refiere a la temperatura ambiente, la variación permitida por la norma es mayor. En la Figura 7 se representan los valores medidos por dos sensores distintos ubicados en la misma propiedad, pero en distintos sitios. En ella se puede apreciar la estabilidad de la temperatura ambiente en torno al captador solar durante el periodo de ensayo.

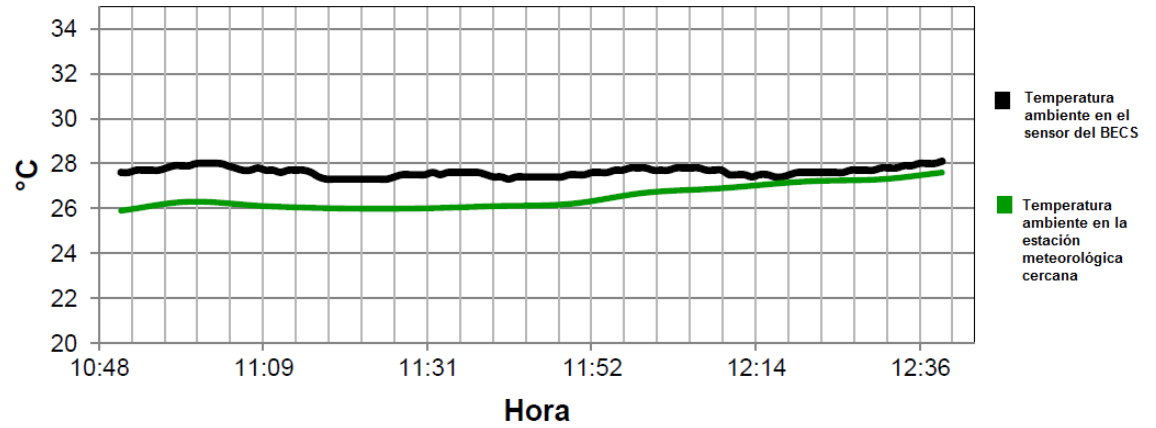


Figura 7. Comprobación de la estabilidad de la temperatura ambiente durante el ensayo. Fuente: [7]

La norma exige la comprobación de la estabilidad del caudal de dos formas: durante el ensayo y entre ensayos. En este caso, el sistema de adquisición de datos para el caudalímetro aún no se encuentra en operación y solo se lleva a cabo la segunda. La Figura 8 muestra los resultados, comprobándose la dificultad de mantener el caudal dentro del rango del 10% requerido. Esto se debe probablemente a la gran variabilidad de las condiciones de ensayo y al uso de un caudal muy pequeño. La incertidumbre de estos valores es grande debido al método de medición utilizado de visor y cronómetro. Con la implementación del sistema digital, estos problemas serán resueltos.

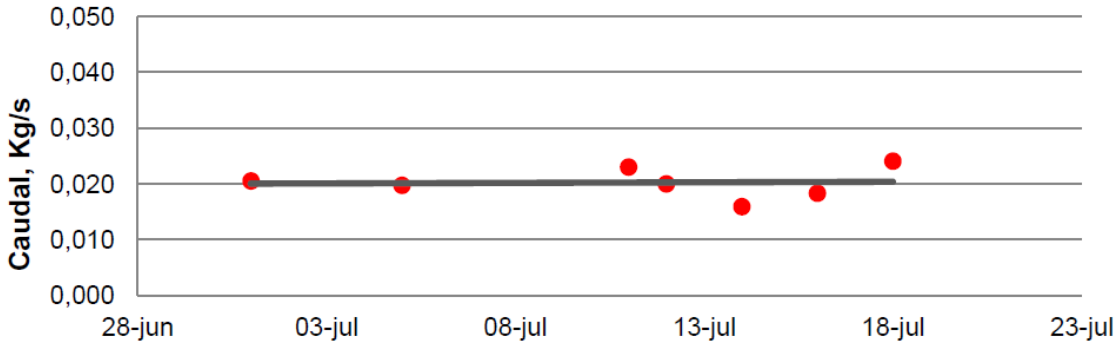


Figura 8. Comprobación de la estabilidad del caudal de ensayo. Fuente: [7]

Finalmente, se muestra en la Figura 9 el resultado de ajuste de la curva de eficiencia instantánea a los puntos ensayados. Se contrastan además los valores de factor óptico y factor de pérdidas generados con el EFICAP. El acuerdo entre ambas curvas se alcanza luego de aplicar ajustes que tengan en cuenta la visión parcial del horizonte. La tendencia lineal pareciera forzada para la nube de puntos generada mediante ensayos. Esto se puede deber a que, durante algunos días de ensayo, la fracción difusa pudo haber superado el 30%, máximo admitido por la norma. Esto no puedo ser constatado por falta de instrumentos. Para mejorar estos aspectos de los ensayos se propone reubicar el banco de ensayos y verificar la fracción difusa de la radiación global.

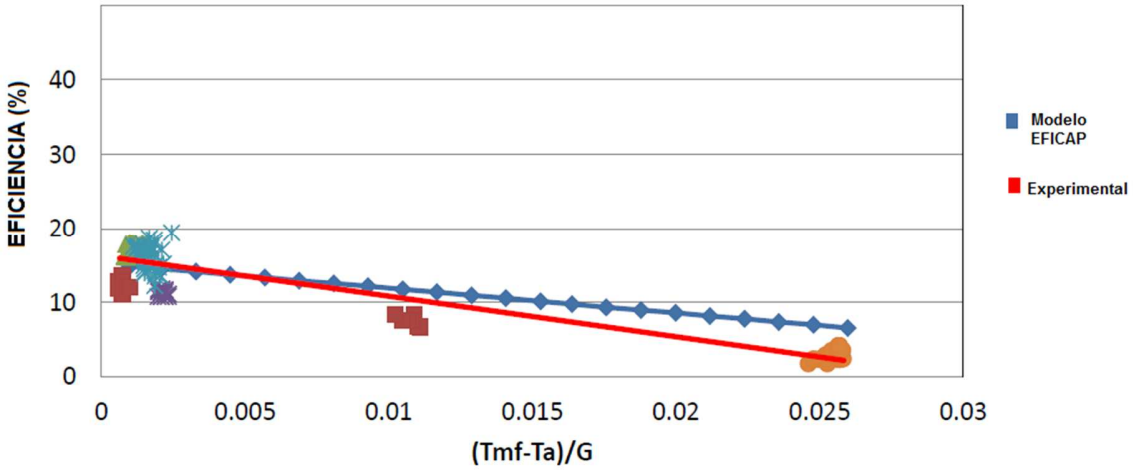


Figura 9. Eficiencia del captador CEDESOL ensayado. Fuente: [2]

5. CONCLUSIONES

La construcción del banco de ensayos para captadores solares fue posible empleando know-how, mano de obre y recursos técnicos disponibles localmente. Se ha demostrado además que éste puede operar muy cercanamente a las condiciones exigidas por uno de los estándares internacionales más exigentes en materia de captadores solares. Si bien fueron hechas simplificaciones a los esquemas exigidos por la norma, lo cual impacta naturalmente en la incertidumbre de los resultados, una buena primera idea sobre la eficiencia de un captador solar puede ser obtenida con el instrumento. Esto es muy útil en el caso de fabricantes artesanales como CEDESOL, quienes se benefician de la información generada pasando del absoluto desconocimiento de la eficiencia de su producto a una buena idea sobre él.

El modelo computacional EFICAP, previamente validado con la curva de captadores certificados por la Norma UNE 12975-1, ajustado a las características del captador ensayado, muestra buen acuerdo con los resultados experimentales preliminares. Esta es otra comprobación importante para la validez de la metodología y las adaptaciones realizadas. El estado actual del banco de ensayos constituye la línea base desde la cual serán realizados todos los ajustes y mejoras necesarios para reducir los errores en las mediciones. Una vez hecho esto podrá evaluarse el nivel de incertidumbre de los resultados. Se propone como objetivo inmediatamente posterior a este estudio, el contraste de las curvas experimentales de los captadores caracterizados en laboratorios certificados, con las curvas generadas empleando el banco construido.

El instrumento fabricado, la experiencia adquirida y los conocimientos generados mediante el presente trabajo, son de importancia cabal a los intereses públicos y privados. En el sector público tanto el gobierno central, el viceministerio de minas y energía y la academia pueden ver plasmados los primeros esfuerzos por el desarrollo de la disciplina de energía solar, un área transversal a los intereses nacionales. A nivel privado, el sector industrial, manufacturero y energético pueden ver potenciales beneficios en la concepción, fabricación y comercialización de nuevos productos asociado a la disciplina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. REFERENCIAS

[1] UNE-EN 12975-2 *Sistemas Solares Térmicos y Componentes. Captadores Solares. Parte 2: Métodos de Ensayo.* Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011.

[2] Salinas M., Ovando, M. *Diseño de un captador solar plano para el aprovechamiento de la radiación solar.* Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, 2013.

[3] VMME. *Balance Energético Nacional 2014, en Términos de Energía Final*. VMME, Asunción, 2015.

[4] *www.ande.gov.py*

[5] *http://www.hoy.com.py/nacionales/incendio-de-ande-deja-sin-luz-a-100.000-familias-y-sin-agua-a-10.000*. Diario Ultimahora. Viernes, 19 de febrero de 2016.

[6] Duffie J., Beckman W. *Solar engineering of termal processes.* 2da Edicición. John Willey and sons. 1979

[7] Benítez A., Medina M. A. *Diseño e Implementación de un Banco de Ensayos para Caracterización de Captadores Solares Planos en la Facultad de Ingeniería.* Trabajo final de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, 2013.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

VALORACIÓN ENERGÉTICA DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE LA REGIÓN CHAQUEÑA – PODER CALORÍFICO DEL BIODIESEL DE SEMILLA DE ALGODÓN

Leiva Azuaga Agripina[1]- Aeberhard, María Raquel[1]- Martina, Pablo Ernesto[1]- Corace, Juan [1]

[1]G.I.D.E.R.- grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas - Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727- 3500- Resistencia - Chaco- Tel. 0362 - 4420076

correo-e: mimaleiva@gmail.com

RESUMEN

Es conocida a nivel mundial la situación respecto al incremento de precios de los combustibles derivados del petróleo y los problemas ambientales ocasionados por los mismos, mencionando también, la limitación de estos recursos.

En la actualidad hay una búsqueda incesante para conseguir combustibles alternativos y renovables, que no contaminen el medio ambiente y que sean de costos accesibles.

Ante el desafío de utilizar los residuos generados en la región chaqueña, con la posibilidad de lograr a partir de ellos una fuente de energía barata, no contaminante, fácil de usar y viables a todos, el grupo G.I.D.E.R. (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energías Renovables), de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, está desarrollando un proyecto sobre el aprovechamiento de la biomasa.

Uno de los residuos que actualmente es aprovechado en la zona, por su gran potencial energético es la semilla de algodón.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del poder calorífico del biodiesel del aceite de las semillas de algodón, facilitado por la empresa BIOENERGY de la Localidad de Fontana, Chaco.

Para la realización de las experiencias, se diseñó y se calibró una bomba calorimétrica de Mahler, con el propósito de obtener las características energéticas de combustibles generados en la zona.

Este dispositivo permite determinar el poder calorífico de combustibles sólidos y líquidos a volumen constante, como indica la Norma ASTM D240.

Los resultados alcanzados están dentro de los rangos de valores obtenidos en la bibliografía, lo que impulsa al grupo de investigación a seguir incursionando en la evaluación de los recursos regionales, desde el punto de vista energético.

***Palabras Clave**: Combustibles líquidos - Bomba calorimétrica - Poder calorífico - Biodiesel*

1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la difícil situación, respecto a la problemática de los combustibles derivados del petróleo y los inconvenientes ambientales ocasionados por los mismos, sin dejar de mencionar la limitación de estos recursos, que es conocida mundialmente. Existe una continua búsqueda en obtener combustibles alternativos y renovables, que no contaminen y que sean de precios accesibles.

Una opción con mucho auge en los últimos años es el biodiesel, que es una fuente de energía limpia, renovable, de calidad y económicamente viable, que además favorece a la conservación del medio ambiente, por lo que constituye una alterativa a los combustibles fósiles.

Este producto es obtenido a partir de aceites naturales como ser aceites vírgenes, principalmente colza, soja, también de girasol, canola, ricino, y otros frutos y semillas. También se utilizan los residuos de aceite vegetal, ya sean industriales o de cocinas y las grasas animales.

A nivel mundial es conocida la situación respecto al incremento de precios de los combustibles derivados del petróleo y los problemas ambientales ocasionados por los mismos sin dejar de mencionar lo limitado de este recurso.

En la actualidad hay una búsqueda incesante para conseguir combustibles alternativos y renovables, que no contaminen el medio ambiente y que sean de precios accesibles.

El biodiesel es un combustible ecológico que puede ser usado en motores diesel con pocas o ninguna modificación y se obtiene a partir de un proceso de transesterificación que consiste en combinar el aceite (normalmente aceite vegetal) con un alcohol ligero, normalmente metanol, dejando como residuo el glicerol, sin olvidar que dicho producto también es un combustible (como se verá más adelante).

Presenta cuantiosas ventajas para el medio ambiente ya que es de origen vegetal, la materia prima del cual se obtiene es totalmente renovable [1], evita la emisiones de SOx (lluvia ácida o efecto invernadero) ya que no contiene prácticamente nada de azufre, reduce las emisiones de hollín, y es fácilmente biodegradable, etc.

Una manera de valorar potencialmente un combustible es considerando, su disponibilidad, y por otra conociendo su poder calorífico [2]. Se podría pensar que la principal característica de un combustible es su poder calorífico, considerado como la cantidad de calor que se obtiene mediante la combustión completa de la unidad de masa de un combustible sólido o volumen de un combustible líquido, como se demuestra en este trabajo, quedando los productos de la combustión a la misma temperatura que la inicial en la que se encuentra el combustible y el comburente, es

ISBN: 978-987-1676-63-7

decir que el poder calorífico es el calor de la reacción de combustión efectuada a temperatura constante.

En general los combustibles que se utilizan en la práctica normalmente contienen hidrógeno combinado y muchas veces también humedad. El agua que produce el primero, más la que constituye la humedad pasan a formar parte de los productos de la combustión. Según las condiciones en que se realice la combustión, puede ocurrir que toda el agua que integra los productos de la combustión quede gaseosa, es decir en forma de vapor, o que toda el agua quede líquida o parcialmente líquida y parcialmente vaporizada [3].

En cada caso la cantidad de calor que se consiga será diferente, se obtendría así una infinidad de poderes caloríficos, conjunto que adquirirá dos valores extremos. Se define entonces como poder calorífico superior (PCS) corresponde al caso donde toda el agua producto de la combustión queda líquida y como poder calorífico inferior (PCI), caso en que toda el agua producto de la combustión queda gaseosa.

En el presente trabajo se obtuvo el poder calorífico de biodiesel obtenido a partir del aceite de semillas de algodón, que actualmente es uno de los cultivos más importantes de la Provincia del Chaco y provee, según el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología, COFECYT, del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, el 63,3% de la producción total nacional.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El grupo GIDER (Grupo de Investigación y desarrollo en Energías Renovables) busca la forma de utilizar los residuos de la región chaqueña, con la posibilidad de lograr a partir de ellos una fuente de energía barata, no contaminante, fácil de usar y que esté al alcance de todos. Es por ello que se diseñó y se puso a punto la bomba calorimétrica de Mahler, con el fin de obtener las características energéticas de combustibles generados en la zona chaqueña.

2.1. Descripción del Equipamiento

Para la obtención experimental del poder calorífico se utilizó una bomba de Mahler. Este dispositivo consiste en un recipiente de paredes metálicas resistentes, que se cierra herméticamente, donde se introduce una muestra del combustible cuyo poder calorífico se quiere determinar, como se observa en las siguientes figuras (Figura 1 y Figura 2):

ISBN: 978-987-1676-63-7

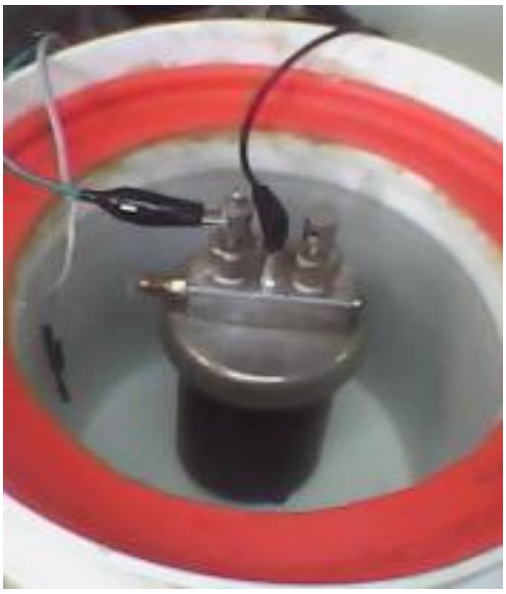


Figura 1: Bomba Calorimétrica

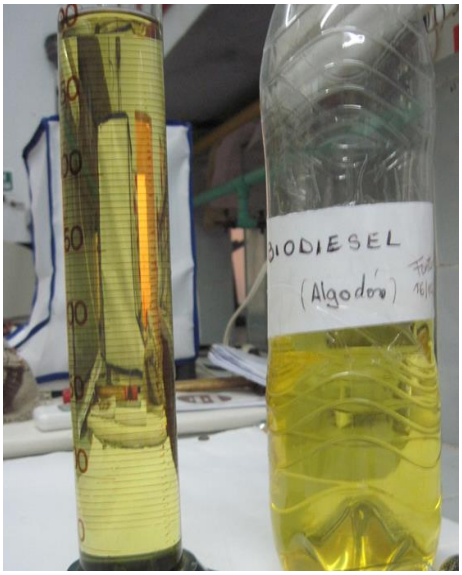


Figura 2: Muestra de combustible

La bomba es introducida en un calorímetro de agua, perfectamente termostatado, y la combustión se inicia mediante ignición con un conductor eléctrico en cortocircuito (Figura 3 y Figura 4). El calor desprendido se mide por la elevación de la temperatura del agua del calorímetro, tras realizar los ajustes necesarios para relacionar esta variación de temperatura con el calor desprendido en el proceso [2].



Figura 3: Calorímetro con agua



Figura 4: Equipo eléctrico de medición

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. ENSAYOS Y CÁLCULOS REALIZADOS

3.1. Determinación experimental de la densidad del combustible

Previo a la determinación del poder calorífico, se obtuvo la densidad de la muestra proporcionada por la Empresa BIOENERGY mediante Picnómetro, instrumento de medición cuyo volumen es conocido y permite determinar la densidad o peso específico de cualquier fluido ya sea líquido o sólido mediante gravimetría a una determinada temperatura. El procedimiento está descrito en la norma ASTM D4052 [4].

Los datos obtenidos se observan en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1: valor de Densidad

$Peso_1$ (picnómetro) (gr)	16,5967
$Peso_2$ (gr)	38,8644
Capacidad (picnómetro) (ml)	25
Peso final	$P_2 - P_1$
Densidad (gr/ml)	0,890

La norma ASTM D4052 [4], establece como rango de densidad 0,860 – 0,900 g/ml a 15°C.

La realización de la determinación de densidad se observan en las Figura 5 y Figura 6:



Figura 5: Picnómetro



Figura 6: Determinación de densidad

3.2. Determinación experimental del poder calorífico del biodiesel de aceite de semillas de algodón

Previo a la realización de los ensayos se determinó el equivalente en agua E (capacidad calorífica de la bomba), utilizando una sustancia patrón, cuyo poder calorífico es conocido.

La sustancia utilizada para el cálculo de E fue ácido benzoico C_6H_5-COOH, cuyo poder calorífico es 26.550 joul/gr.

El valor calculado del equivalente en agua fue de: E = 1993 cal / ºC.

Una vez obtenido el equivalente en agua del calorímetro se procedió a determinar el poder calorífico del biodiesel.

Para ello se alojó en el crisol 1,7 ml de la muestra a estudiar, cuyo color era amarillo semejante al aceite. Sostenido por los electrodos de platino, se sumergió el alambre de Nicrome (80%Niquel-20%Cromo) de 0.35mm de diámetro en el combustible, (Figura 7 y Figura 8).



Figura 7: Electrodos de Platino y alambre

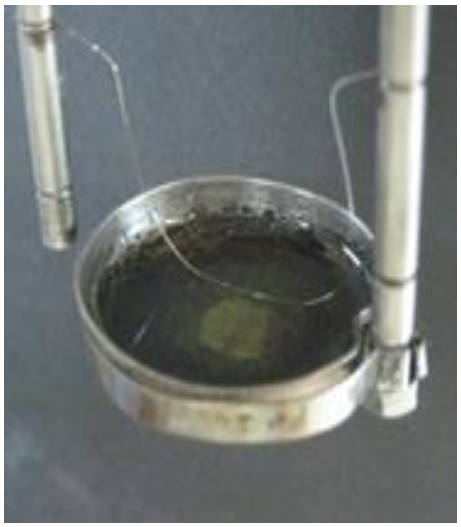


Figura 8: Crisol con biodiesel

Una vez alojado el crisol en la bomba, se cerró la tapa en forma manual y se ajustó mediante una llave de apriete. Se cargó el obús con oxígeno puro a presión = 20kg/cm^2, venteando previamente el aire inicial para asegurarse que sólo quede oxígeno en el interior evitándose de esta manera la corrección por formación de ácido nítrico (Figura 9).

Una vez inyectado el oxígeno, se produce una descarga eléctrica en la bomba. Se quema así el filamento (alambre de Nicrome) y la muestra (biodiesel), genera calor, aumentando la temperatura del recipiente calorimétrico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Terminado el ensayo se abre el obús y se observa el resultado de la combustión para las correspondientes correcciones (Figura 10).



Figura 9: carga de oxígeno a la bomba



Figura 10: Crisol con productos de la combustión

Con todas las lecturas realizadas se calculó el poder calorífico a través de la siguiente ecuación:

$$PCS = \frac{E.\Delta T - C_3}{m_c} \quad (1)$$

Donde:

m_c = masa de combustible utilizado = 1,7ml

Δt = variación de temperatura lograda en el ensayo = 7,456ºC

C_3 = corrección por el alambre de Nicrome utilizado = 35.9cal

E = equivalente en agua del calorímetro = 1993cal / ºC

Y reemplazando valores en (1):

$$PCS = \frac{E.\Delta T - C_3}{m_c} = 8719{,}9 \text{Kcal/l}$$

O, expresado en otras unidades: PCS = 41010KJ/Kg

La norma ASTM D240 [5] establece como requisito que el poder calorífico oscile alrededor de 39500 KJ/Kg.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la siguiente (Tabla 2) se presenta la comparación de los poderes caloríficos para diferentes biodiesel (metilésteres) [6] y el obtenido experimentalmente por el GIDER para aceite de semillas de algodón:

Tabla 2: Comparación de valores de poder calorífico

Tipo de Biodiesel	PCS (MJ/KG)
Palma	39,8
Higuerilla	37,5
Girasol	39,7
Soja	39,8
Algodón (GIDER)	41,01

4. CONCLUSIÓN

Se ha obtenido el poder calorífico del biodiesel a partir del aceite de semillas de algodón, utilizando la bomba calorimétrica de Mahler.

Las diferencias entre los valores obtenidos calorimétricamente están dentro de los rangos aceptados, según la bibliografía, para diferentes biodiesel derivados de aceites vegetales convencionales. Este resultado era de esperar ya que los valores de PCS de los metilésteres de cadena larga, tanto saturados como insaturados, varían en un rango estrecho.

Los resultados alcanzados permiten inferir que la utilización de este producto, como alternativa para la producción de energía, mejora no sólo las condiciones ambientales y de seguridad sino que también aporta una solución a la industria, e incentiva al grupo de investigación a ampliar la búsqueda de nuevas fuentes energéticas a partir de recursos biomásicos regionales.

5. REFERENCIAS

[1] Lin Lin, Dong Ying. SumpunChaitep.SaritpornVittayapadung,*"Biodiesel production from crude rice bran oil and properties as fuel". Applied Energy*. Vol. 86, pág 681–688. (2009).

[2] Leiva Azuaga Agripina, Martina Pablo, Aebherard Raquel, Corace Juan José, Mendivil Carlos, García Solá Emilio *Tecnología de la medición del poder calorífico de combustibles sólidos y líquidos con bomba calorimétrica de Mahler*. 2013.

[3] García, C., *Termodinámica Técnica*, Editorial Alsina, pp. 336. (2002).

[4] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. *Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter*. United States, 1996 (ASTM D4052-96)

[5] AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. *Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter*. United States. (ASTMD240).

[6] Benjumea, P., Agudelo, J. y Ríos, I. (2009). *Biodiesel: Producción, calidad y caracterización*. 3, 100-115.

[7] Márquez F. Cordero T., Rodríguez J., Rodríguez J. 2001 *Estudio Del Potencial Energético De Biomasa* PinusCaribaeaMoreletVar. Caribaea(Pc) Y PinusTropicalisMorelet (Pt); Eucaliptus SalignaSmith (Es), EucalyptusCitriodoraHook (Ec) Y EucalytusPellitaF. Muell (Ep); De La Provincia De Pinar Del Río. RevistaChapingoSerieCienciasForestales y del Ambiente 7(1):pp: 83-89.

[8] Manish Attal, Chirag Dave, A M. Mahalle *Experimental Investigation On Performance Of A Diesel Engine Using GarciniaIndica* (Kokam) And Rice Bran Oil Based Biodiesels As Fuels. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)- e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 11, Issue 5 Ver. II (Sep- Oct. 2014), PP 01-07

[9] Norma IRAM 17016, *Método de Determinación del Poder Calorífico*.

[10] Ogara, M.R., Berset, A., Gronhut, E. 1987. *La biomasa forestal como fuente de energía. Sistemas y posibilidades.* 11 Jornadas Mes Forestal de Entre Ríos. Concordia. 4.1 - 4.34.

[11] Rabou L., Van der Drift A., Van Doorn J., 2002. *Analysis of biomass* data in ECN database Phyllis, ECNRX- 02-014.June, Amsterdam, the Netherlands.

[12] Rasmussen A., 2004. Final report *Waste Incineration*. Thesis to obtain the Master of Science. Deparment of Chemical Engineering of University of Denmark, 2004.

[13] Relova I., Hernández E., García J., Cándano F., Coro R., Fernández L. 2000. *Potencial de aserrín de la industria del aserrado de Pinus Caribaeavar con fines energéticos*. Centro de Información y Gestión Tecnológica. CIGET Pinar del Río. Vol. 2, No.1 enero-marzo, 2000. ISSN 1562-3297

Agradecimientos:

Los autores de este trabajo agradecen a la Empresa BIOENERGY por la buena predisposición en la provisión del fluido biodiesel para la realización de los ensayos.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO DE UNA PICO TURBINA AXIAL PARA APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS DE MUY BAJO SALTO

Ariel R. Marchegiani[1], Fabián Rojas[2]

[1,2] Laboratorio de Máquinas Hidráulicas – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina
correo-e: ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar.

RESUMEN

Para la mayoría de las personas que participan en la industria de la energía hidroeléctrica, es sabido que en circunstancias normales de inversión, el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico con menos de 3 m de salto neto, sobre todo en pequeñas potencias, no es una inversión económicamente racional. Sin embargo, si tomamos en cuenta el potencial hidroeléctrico disponible de dichos sitios y pensando en el tan buscado concepto de desarrollo sostenible, se hace evidente que un esfuerzo para desarrollar un método que permita utilizar este potencial energético debe realizarse, sobre todo si se piensa que esto puede resolver situaciones de falta de energía en sitios aislados. Además, el creciente desarrollo de herramientas informáticas con algoritmos más eficientes ha permitido una mejora sustancial en el diseño de las pequeñas turbinas hidráulicas y su rendimiento.

En este trabajo se presenta el diseño de una pequeña turbina hidráulica axial que ha sido pensada para caudales entre 80 l/s a 150 l/s, y alturas entre 1 m y 2 m, con una generación aproximada de 1 kW.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una turbina optimizada y con un enfoque particular en la facilidad de fabricación, un diseño simple, compacto y de bajo costo. Se presenta, además, una amplia gama de medidas de optimización tanto geométricas como hidráulicas realizadas, sobre todo en el rotor de la turbina, cuyos álabes se han diseñado utilizando la teoría clásica. Se ha planteado una regulación de la potencia en forma electrónica y una generación por medio de un motor asincrónico utilizado como generador. Además, se han aplicado elementos de Fluidodinámica Computacional (CFD) para predecir el comportamiento de la turbina.

Se ha logrado un diseño que puede brindar un servicio confiable en condiciones de trabajo continuo y escaso mantenimiento, ya que esta turbina posee robustez y confiabilidad.

Palabras Claves: *pico turbina, turbina axial, microaprovechamiento, hidroelectricidad*.

1. INTRODUCCIÓN

Un concepto recurrente en los actores que participan en la industria de la energía hidroeléctrica, es que en circunstancias normales de inversión, el desarrollo de un proyecto hidroeléctrico con menos de 3 m de salto neto, sobre todo en pequeñas potencias, no es una inversión económicamente racional. Sin embargo, si tomamos en cuenta el potencial hidroeléctrico disponible de dichos sitios y pensando en el tan buscado concepto de desarrollo sostenible, se hace evidente que un esfuerzo para desarrollar un método que permita utilizar este potencial energético debe realizarse, sobre todo si se piensa que esto puede resolver situaciones de falta de energía en sitios aislados.

Atendiendo a esto, se ha pensado en el desarrollo de una picoturbina hidráulica de tipo axial de muy baja potencia para satisfacer el requerimiento de energía de viviendas aisladas que cuenten con el recurso hídrico adecuado.

2. PARÁMETROS DE DISEÑO

En muchas zonas de nuestro país existen recursos hídricos donde alturas que oscilan entre 1 y 5 metros y caudales disponibles de hasta 200 litros por segundo son fácilmente obtenibles y además existen costos de transmisión que pueden ser muy altos en comparación del costo de producción de la misma.

Para llegar a obtener el valor límite del campo de aplicación se debió realizar, previamente, un relevamiento de los recursos hídricos de posible aplicación de la máquina. Además se tuvo en cuenta que para una vivienda ubicada en un lugar aislado de la zona cordillerana antes mencionada y habitada por una familia tipo (cuatro personas), se tiene un consumo promedio de 800 y 1000 W, y unos 2800 kWh. Como conclusión de este análisis se llega a los siguientes parámetros operativos límites: un rango de Altura de 1 a 3 metros y un rango de Caudales de 80 a 150 l/s.

Estos rangos de operación cubren un gran espectro de los pequeños recursos hídricos existentes de la zona de estudio. Del análisis de estos rangos surgen como parámetros más convenientes para el diseño un salto de 1,5 m y una potencia de 1000 W.

Además de la condición respecto al salto disponible para la turbina, se plantean otras restricciones enfocadas a reducir los costos de la instalación y simplificar su operación. Estas consisten en la utilización de un motor de inducción como generador eléctrico o un generador de imanes permanentes, y prescindir de un sistema de regulación mecánico de caudal, es decir generar a carga constante utilizando un regulador electrónico y carga balasto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como existe la posibilidad de utilizar un motor como generador, se adoptó una velocidad de rotación de 1040 rpm para compensar el resbalamiento.

3. PROCESO DE PREDIMENSIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LA TURBINA

Una turbina hidráulica se caracteriza por su velocidad específica (ecuación (1)) que vincula los parámetros de diseño.

$$n_q = \frac{n.Q^{1/2}}{(H_n)^{3/4}} \tag{1}$$

Donde, n_q es la velocidad específica en función del caudal, n es la velocidad de rotación (rpm), Q es el caudal (m^3/s) y H_n es el salto neto (m), todos en el punto de funcionamiento óptimo.

Existe una relación entre salto y velocidad específica que es el resultado de la evolución de cada tipo de turbina, esta tendencia se refleja en análisis estadísticos realizados por distintos autores con información de cientos de máquinas instaladas en todo el mundo. Las metodologías más divulgadas y aún utilizadas pertenecen a F. de Siervo [1], Lugaressi [2] y Schweiger [3] en el rango de grandes potencias (>5MW), y Marchegiani [4] en el rango de bajas potencias.

Otros parámetros son importantes para la determinación de un buen diseño; estos son el Coeficiente de Velocidad Periférica y el Coeficiente de Cavitación, que los trabajos mencionados anteriormente expresan como una función de la velocidad específica, es decir k_u=f(n_q) y σ =f(n_q)

3.1. Coeficiente de Velocidad Periférica

El Coeficiente de Velocidad Periférica, k_u, puede ser usado para calcular el diámetro de descarga, D_e, característico de la máquina (mostrado en las figura 1). Este coeficiente está definido por:

$$k_u = \frac{\pi.D_e.n}{60.\sqrt{2.g.H_n}} \tag{2}$$

Donde, n es la velocidad de rotación de la turbina (rpm), H_n es el salto neto de la máquina (m), ambos en el punto de funcionamiento óptimo de la turbina, y g es la aceleración de la gravedad.

3.2. Coeficiente de Cavitación

El Coeficiente de Cavitación σ puede ser obtenido en base a la altura de presión a la salida del tubo de aspiración o la altura de presión aguas abajo de la central. Durante el diseño preliminar,

ISBN: 978-987-1676-63-7

se adoptan el eje de los álabes distribuidores (en unidades verticales), y el nivel de descarga aguas abajo, como niveles de referencia, a fin de simplificar el cálculo del coeficiente.

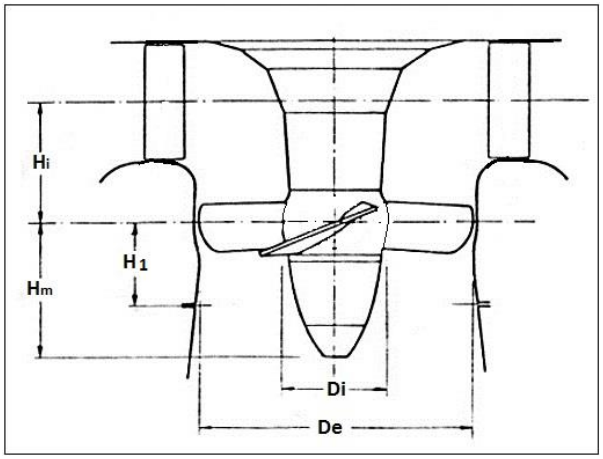


Figura 1- Dimensiones generales turbina hidráulica axial.

El coeficiente de cavitación σ, resulta de dividir la altura neta de presión de aspiración (NPSH) por la altura de diseño H_n,

$$\sigma = (h_{at} - h_v - h_s) \times H_n^{-1} \quad (3)$$

Donde h_{at} es la altura de presión atmosférica, h_v la altura de presión de vapor, y h_s la altura de aspiración.

El coeficiente así definido se transforma en un parámetro indicativo del margen de seguridad de operación de la turbina con referencia a la cavitación.

3.3. Expresiones estadísticas de los Coeficientes

Las expresiones utilizadas en el presente diseño que fueron obtenidas de los diferentes autores mencionados anteriormente y son las siguientes:

Velocidad Específica	$n_q = 322{,}58\ H_n^{-0{,}178}$	(4)
Coef. de Veloc. Periférica	$K_u = 3.478\ 10^{-3}\ n_q + 1{,}148$	(5)
Coef. de Cavitación	$\sigma = 0{,}00000107\ n_q^{2.57}$	(6)

Los valores de estos parámetros obtenidos estadísticamente representan apenas una referencia para el diseño de la turbina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.3. Diámetro y Dimensiones generales de la turbina

La determinación del diámetro característico de la turbina se realiza a partir de su velocidad específica, de la siguiente manera:

$$D_e = \frac{60.k_u.\sqrt{2.g.H_n}}{\pi.n} \tag{7}$$

Una vez determinado el diámetro del rotor D_e, las dimensiones principales de los pasajes hidráulicos pueden ser determinadas en función de este parámetro, por medio de coeficientes en una relación del tipo y= k×D_e. Las dimensiones generales restantes indicadas en la figura 1, se determinaron a partir de lo propuesto por los trabajos enumerados más arriba.

Tabla 1: Parámetros nominales de la picoturbina**.**

H_n [m]	Q [m³/s]	n [r.p.m]	n_q	σ	h_{smax} [m]	D_e [m]	D_i [m]
1,5	0.133	1040	280	1.88	6.8	0.21	0.075

4. DISEÑO DEL ROTOR

El diseño del rotor está gobernado por la ecuación fundamental de las turbomáquinas (eq. 8). La aplicación de ésta a las turbinas axiales es válida bajo ciertas hipótesis entre las cuales se debe asumir que las superficies de corriente son cilindros concéntricos al eje de la turbina (figura 2a) cuya componente radial de velocidad es nula.

$$H_u = \frac{u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}}{g} \tag{8}$$

Donde u es la velocidad tangencial de la turbina (subíndices 1 a la entrada, 2 a la salida) y c_u es la componente de la velocidad absoluta C en la dirección tangencial (figura 2). En la figura 2b se observan los triángulos de velocidades a la entrada y salida en dos posiciones radiales genéricas del rotor de una turbina axial.

El diseño se plantea para un punto de funcionamiento óptimo en el cual la turbina desarrolla su máximo rendimiento. Para satisfacer esta condición se deben buscar las componentes de velocidad que maximicen la altura útil, que se dan cuando la componente de velocidad absoluta a la salida de la turbina es completamente axial, o sea, cuando el ángulo de la velocidad absoluta a la salida es α_2=90º.

En la resolución de las componentes del triángulo de velocidad además de las relaciones gráficas de los mismos debe contemplarse la conservación del caudal y por lo tanto la componente meridional C_m permanece invariable en su paso por el rotor.

ISBN: 978-987-1676-63-7

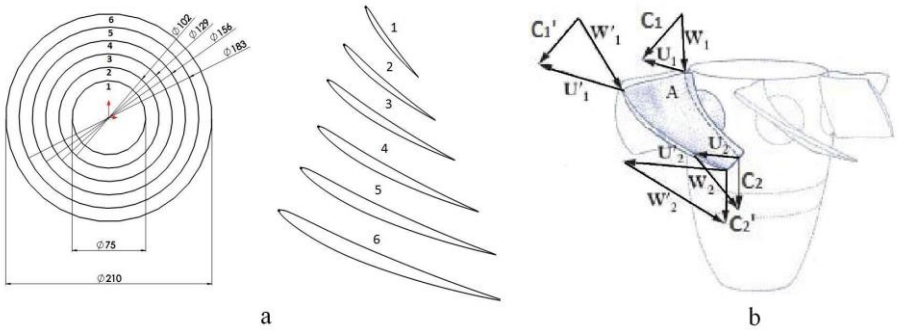


Figura 2 – Triángulos de velocidades

El rotor de una turbina hélice consta de un número variable de álabes que dependerá del salto y el caudal. Para la turbina diseñada se han adoptado 4 álabes fijos y una relación de cubo de 0.35.

Cuando se trata de analizar máquinas de elevado número específico, en las que el escurrimiento meridiano se produce en dirección diagonal o axial y el número de álabes es pequeño, con ausencia de corona exterior no quedan bien definidos los pasajes fluidos, se utiliza entonces, la teoría bi-dimensional (aerodinámica) aplicada a las máquinas hidráulicas.

El flujo a través de las máquinas axiales puede ser estudiado como una cascada de álabes representada en la figura 3.

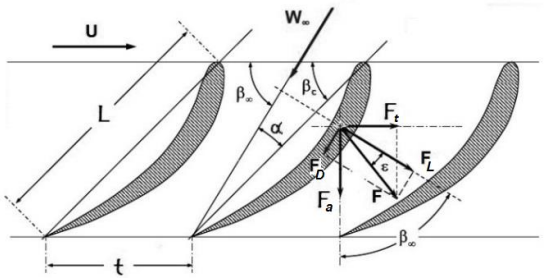


Figura 3- Enrejado de álabes y sus características principales

Esta cascada puede interpretarse como el desarrollo en el plano de uno de los sucesivos cilindros coaxiales que forman las superficies de corrientes en máquinas axiales, descriptas por la ec. (9):

$$C_L\left(\frac{l}{t}\right) = \frac{2.g.H_n}{w_\infty^2}\,\frac{c_m}{u}\,\frac{\cos(\varepsilon)}{sen(\beta_\infty + \varepsilon)} \tag{9}$$

Donde, C_L coeficiente de sustentación, l/t relación de paso a cuerda, H_n salto neto, c_m componente meridional del triangulo de velocidades, w_∞ velocidad media de la corriente lejana, u velocidad de

arrastre y *g* aceleracion de la gravedad, *t* es la distancia entre álabes, *l* es la cuerda de los perfiles, α es el ángulo formado entre la corriente libre (w_∞) y la cuerda del perfil. También se indican las fuerzas que aparecen aplicadas en el centro de presión de cada uno de los álabes en dónde; F_L es la fuerza de sustentación encargada de impulsar el movimiento y F_D es la fuerza de arrastre que genera empuje axial, ε es conocido como ángulo de planeo y surge como consecuencia del comportamiento real del fluido.

Para la selección de perfiles no existe un criterio bien establecido y con una metodología a seguir. Solo se tuvieron en cuenta algunas consideraciones realizadas por Stepanoff respecto al espesor, curvatura y la relación (t/l) [5]. También debe considerarse la distribución de presiones sobre el perfil que se desee utilizar ya que no todos presentarían buen comportamiento a la cavitación. El perfil elegido fue un NACA 4406 y se buscó optimizar la relación entre coeficientes de arrastre y sustentación

El rodete diseñado se representa en la figura 4. En la actualidad con el desarrollo de software de CAD se plantean alternativas muy competitivas a las tradicionales, como la impresión 3D[6],[7],[8].

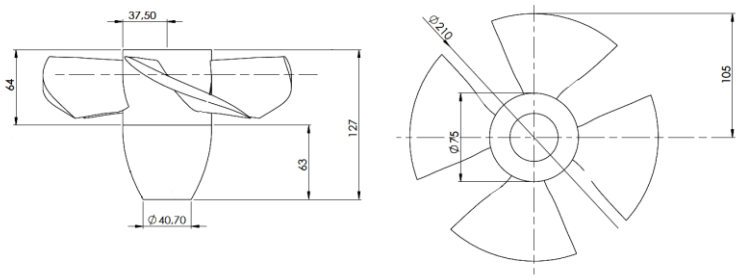


Figura 4: dimensiones del Rotor

5. CÁMARA ESPIRAL

Dadas las características de baja potencia y bajo salto del aprovechamiento resultó conveniente utilizar una cámara espiral abierta de admisión parcial. Dicha selección fue hecha dadas las características de este proyecto, y justificada por una sustancial reducción en los costos de los materiales y del proceso de fabricación.

El diseño hidráulico de la cámara se realiza suponiendo un flujo irrotacional e incompresible, aplicando la ley del vórtice libre o ley del torbellino potencial. La ecuación de la cámara espiral:

$$r_\theta = r_d . e^{\left(\frac{Q}{360.C.B}\right)\theta_i} \qquad (10)$$

En donde, r_θ: radio en la posición θ de la cámara, r_d radio externo del distribuidor, Q caudal de diseño, B altura de la cámara espiral, C constante de la teoría de vórtice libre y θ ángulo de desarrollo de la cámara espiral.

Dado que se utiliza una cámara espiral abierta se debe considerar la posible formación de vórtices debido a la superficie libre del flujo en la entrada, las diferentes direcciones del flujo al ingresar al distribuidor y otras variables. Con lo cual la altura de la cámara debe ser suficiente para evitar el ingreso de aire en la admisión de la máquina. En el cálculo de la altura mínima se utilizaron diferentes estudios experimentales que arrojan una buena aproximación para la prevención de este fenómeno [8],[9].

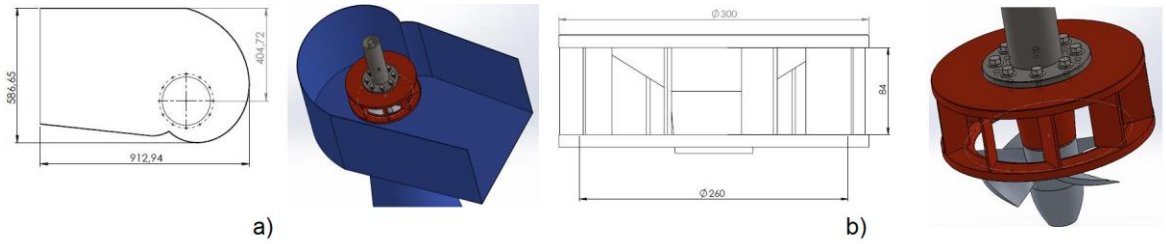


Figura 5 – a) cámara espiral b), Distribuidor.

En la figura 5 b) puede observarse una imagen con dimensiones y una perspectiva del distribuidor. El mismo posee un diámetro de 0.3m y 9 álabes. En la tapa superior e inferior posee los agujeros roscados para la sujeción del tubo cobertor y el tubo de aspiración respectivamente.

7. Tubo de Aspiración

El tubo de aspiración cumple una función recuperadora en términos de altura estática y dinámica. En las turbinas de elevado número específico, desempeña un rol fundamental y sobre todo en la turbina que se describe ya que la misma funciona a presión atmosférica a la entrada de la cámara espiral, con una pequeña diferencia entre el salto bruto y el neto debido a la caída de presión por el pasaje del fluido a través de la cámara-distribuidor.

Para el diseño se utilizó la ecuación de continuidad para un fluido incompresible, considerando una longitud mínima igual al salto bruto y un ángulo máximo de 6º para evitar los problemas de desprendimiento de la capa limite. Se verificó a la cavitación la sumergencia mínima, utilizando el Coeficiente de Cavitación obtenido anteriormente.

En la figura 6 a) se aprecian la forma y dimensiones del tubo de aspiración diseñado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

8. ENSAMBLAJE

El sistema de generación hidroeléctrico completamente armado se puede observar en la figura 6 b). En la parte superior se ubica el generador soportado por un tubo cobertor que contiene al eje.

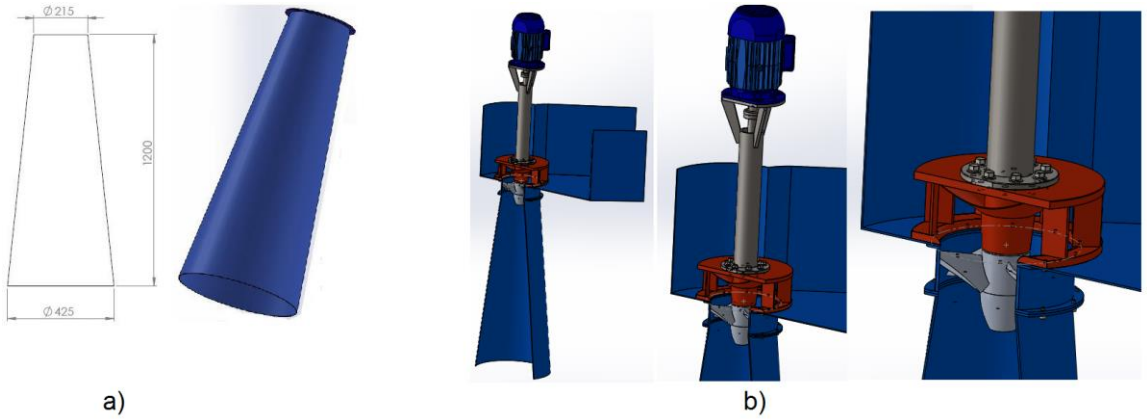


Figura 6 – a) Tubo de aspiración, b) Conjunto de picogeneración completo.

9. REGULACIÓN DE POTENCIA

La regulación de la generación será realizada mediante un sistema electrónico desarrollado en la Universidad Nacional del Comahue que trabaja en el modo de derivación de cargas en forma automática hacia el banco de resistencias que lleva incorporado. El banco de resistencias disipa la energía al medio ambiente calentando el aire circundante o agua para uso doméstico. Se basa en un dispositivo electrónico microcontrolado destinado a regular frecuencia por absorción de carga. El regulador de frecuencia mide la frecuencia de línea y adecua el valor de la carga secundaria (resistencias) para mantener la frecuencia constante. Según su principio de funcionamiento, cualquier modificación en la carga primaria o en la carga hidráulica que produzca una variación de la velocidad de la máquina, será contrarrestada desconectando carga secundaria si la frecuencia se encuentra debajo del límite inferior establecido (por ejemplo 49.5 Hz), o aumentando el valor de ésta si la frecuencia excedió el límite superior programado (por ejemplo 50.5 Hz).

10. COSTOS Y ANALISIS ECONÓMICO

En el análisis y evaluación del costo de la máquina se define el aspecto económico que marca el criterio para realizar la fabricación de la turbina. Se realizó un estudio de mercado analizando la disponibilidad de materiales y tecnología existentes tanto en la zona como en otros lugares.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los costos de producción están formados por siguientes elementos: materia prima, mano de obra directa e indirecta, ganancias, impuestos. Teniendo en cuenta estos costos, se obtuvo el precio final estimado para la venta que es de U$S1900,- (a junio de 2015).

Este precio incluye turbina, motor para ser usado como generador, banco de capacitores para el motor, Regulador de frecuencia y tensión, Tablero de comando y conjunto de Resistencias.

En el mercado nacional no se encuentran fabricantes de turbinas similares con lo cual la búsqueda se extendió al ámbito internacional. Se analizaron las alternativas disponibles y se llevó a cabo una comparación económica entre la máquina descripta en este trabajo y un equipamiento de origen canadiense de similares características**.** La turbina de origen canadiense es de la firma Energy Systems & Design, (PO Box 4557, Sussex, NB, Canadá, E4E 5L7), cuyo precio es de U$S 2975,- precio FOB, a lo que se le debe adicionar costos por flete, seguros e impuestos de importación, lo que arroja un valor total de U$S 5312,-.

Como vemos el costo de comercialización de esta turbina estaría más de un 50% por debajo de la alternativa importada. Esto demuestra que el proyecto es rentable, frente a las opciones de mercado. Con lo cual resulta propicio desarrollar una turbina de estas características, de fabricación local.

11. CONCLUSIONES

Se ha presentado aquí el diseño de una picoturbina hidráulica para bajos saltos y baja potencia. Las ventajas inherentes a su concepción y diseño hacen factible su fabricación en industrias locales que no posean tecnologías de producción complejas; además, esto otorga una seguridad respecto de la disponibilidad de repuestos, lo cual puede definir, en muchos casos, la aplicación del equipamiento propuesto.

En situaciones de aplicación como las expuestas, donde los equipos deben brindar un servicio confiable en condiciones de trabajo continuo y escaso mantenimiento, el equipamiento empleado debe tener robustez y confiabilidad, requisitos éstos, que la turbina diseñada reúne ampliamente.

Más allá del caso específico presentado en este trabajo, la metodología propuesta para la turbina descripta se puede extrapolar a diferentes situaciones de recurso hidráulico, generando así una guía para el desarrollo de pico y micro-turbinas hidráulicas de bajo salto.

Las nuevas tecnologías en materia de diseño asistido por computadora ofrecen alternativas de estudio y optimización de cuestiones que antiguamente demoraban y encarecían el desarrollo de proyectos hidroeléctricos de pequeña escala.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La Pico-generación es una oportunidad para enfrentar la crisis energética aprovechando parte del recurso hídrico que hasta el momento no ha sido plenamente explotado en nuestro país, promocionando alternativas limpias y duraderas para la generación de energía eléctrica pensando en el medio ambiente para las futuras generaciones.

12. REFERENCIAS

[1] De Siervo, F y De Leva, F. Modern trends in selecting and designing Kaplan turbines - Water Power and Dam Construction, Part I, dec 1977, 51-56 y Part II, Jan 1978, 52-58, 1977.

[2] Lugaresi A. and Masa A., "Designing Kaplan Turbines: Trends in Last Decade", Water Power & Dam Construction, May 1988, 12-17, 1988.

[3] F. Schweiger.and J.Gregori (1987), Development in the design of Kaplan Turbines, Water Power & Dam Construction, Nov. 1987, 16-20, 1987.

[4] Marchegiani A., Metodología de diseño preliminar para pequeñas turbinas de reacción, VII Encuentro Latinoamericano en Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos, Cajamarca, Perú, pp 161-171, 1997.

[5] Stepanoff A.J., Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, design and application, Wiley, New York, pp138-156, 1957.

[6] Aye-Addo N., O`Connor J., Perez R., Design of a Scale Model TeThered Undersea Kite for Power Generation, Report, Worcester Polytechnic Institute, pp. 28-37, 2014.

[7] Clark S., Hall D., Sebastian J., Ram L., Air Turbine Blue Team, ME160 Final Project Report, RAT Engineering, Hamilton Sundstrand Electric Systems, pp.19 -23, 2008.

[8] Gordon, J. , Vortices at Intakes, J. Water Power, 22(4), pp 137-138, 1970.

[9] Gulliver, S. and Rindels, A., Weak vortices at vertical intakes, J. Hyd.Div., ASCE. 113(9), pp 1101-1116, 1986.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INFLUENCIA TÉRMICA EN EL RENDIMIENTO DE AEROGENERADORES

Provenzano, Pablo G [1], Fernández, Luis A.[2] y Fauroux, Luis E.[3]

[1,2,3] Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas –
Universidad Nacional de La Matanza.
Florencio Varela 1903 – San Justo- Provincia de Buenos Aires – Argentina.
pprovenzano@unlam.edu.ar

RESUMEN

La influencia térmica ha sido estudiada detalladamente cuando se trata de máquinas eléctricas y termomecánicas, en aspectos como el rendimiento que éstas pueden alcanzar en distintos escenarios ambientales. La temperatura ambiental es un factor que incide directamente en su eficiencia puesto que las máquinas eléctricas y las térmicas alcanzan su mejor performance cuando se logra ajustar la disipación de energía térmica (energía generada por fricción mecánica, extracción de calor por efecto Joule, entre otros) hacia el ambiente según las indicaciones de la data técnica de la máquina, y ese flujo térmico hacia el entorno está supeditado a la temperatura del ambiente donde se emplaza la misma.

Menos contemplada ha sido la incidencia del factor térmico ambiental en la performance de aerogeneradores. Si bien esta performance depende fundamentalmente del régimen de velocidades del viento, la temperatura del aire en movimiento ejerce también su influencia en el rendimiento de la máquina eólica.

Se presenta un trabajo donde se analiza este factor en el rendimiento del generador eólico asincrónico Hussumer Schiffswerft (HSW-30), de 18 kW de potencia nominal en escenarios térmico-ambientales diferentes. Han sido aplicadas expresiones de cálculo de potencia extraíble al fluido y se ha encontrado una ecuación matemática que permite estimar la potencia extraíble al viento en relación con la temperatura del mismo.

Los resultados obtenidos muestran que la temperatura del aire provoca variaciones perceptibles de la potencia extraíble al viento desde diferencias de temperaturas de 10°C, hecho que está indicando que la temperatura del lugar debería ser incluida siempre en el estudio de emplazamiento de molinos eólicos.

Palabras Claves: **VIENTO - TÉRMICO – POTENCIA- VARIACIÓN.**

1. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de toda máquina o sistema eléctrico o térmico está condicionado por la temperatura ambiental del lugar de servicio. La generación de energía calórica por efectos de rozamiento mecánico, calor del flujo de vapor que abandona la turbina de una instalación termomecánica o el Efecto Joule en sistemas eléctricos debido a la resistividad que presentan los materiales que lo componen, es disipada, en parte, hacia el medioambiente. Esta energía generada se verifica por el calentamiento del cuerpo y componentes de la máquina, cuya temperatura (θ_M) se eleva progresivamente sobre la del entorno, generándose un desequilibrio térmico que provoca el flujo calórico hacia el medioambiente hasta lograr el punto de equilibrio manifestado por el cese del incremento térmico en la máquina. La temperatura (θ_M) se mantendrá estacionaria (θ_{MF}) cuando la proporción de calor que se genera equipare a la disipación hacia el entorno. Y en este proceso es fundamental el valor de la temperatura ambiente (θ_0) puesto que la efectividad de la disipación depende directamente de la posibilidad de alcanzar la diferencia térmica adecuada ($\Delta\theta$) entre la superficie del sistema y el medio que la rodea, evitando que la temperatura del sistema sobrepase cierto límite de seguridad. Y en este tema tiene importancia determinante la temperatura del entorno: La siguiente figura expresa este fenómeno [1]

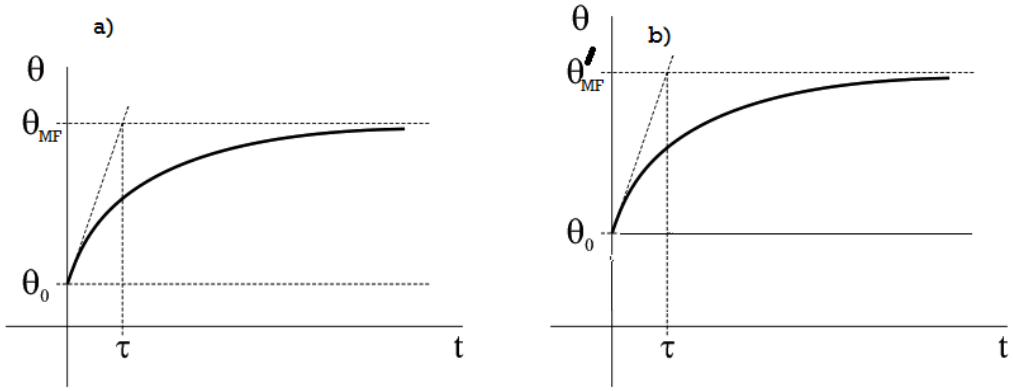


Figura 1: Curva de calentamiento de la máquina. θ_{MF} es la temperatura a la cual la proporción de energía térmica generada es equivalente a su disipación, y depende de θ_0

Se observa en la figura b) que una temperatura ambiental mayor implica una temperatura estacionaria de máquina (θ'_{MF}) proporcionalmente mayor para lograr la disipación térmica que garantice el funcionamiento seguro y rendimiento esperado, pero esta nueva temperatura puede generar riesgo de deterioro en los materiales aislantes comprometiendo la integridad de algunos componentes y afectando su rendimiento. Por lo tanto, el funcionamiento del dispositivo eléctrico está condicionado directamente por la temperatura del medioambiente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La energía eólica ha sido aplicada al trabajo mecánico desde algunos siglos anteriores a nuestra Era. Prueba de ello son los molinos de viento de eje vertical de Persia, erigidos seis siglos antes del nacimiento de Cristo y cuyas ruinas llegan hasta nuestros días [2,3]. Diseños posteriores como los erigidos en Grecia desde la Antigüedad y también los clásicos molinos holandeses, desde la Edad Media, han acompañado el desarrollo de las economías en vastas regiones de Europa. Sin embargo, en términos de eficiencia, llegan a valores menores, 0,17 para el caso de estos últimos [2,4]. El desarrollo de unidades para conversión de energía eólica en eléctrica ha sido notorio en cuanto a diversidad de modelos y mejora del rendimiento desde los últimos ciento cincuenta años. Aunque es necesario destacar que los mejores diseños aerodinámicos (bipala y -tripala en forma de hélice) no superan un rendimiento del orden de 0,47, hecho que obedece a principios de la Fluidodinámica y a la inclusión de efectos de rozamiento mecánico de los componentes rotantes del eólico [5].

1.1 *Energía del viento*

En todo fluido en movimiento sus moléculas conllevan energía cinética. Esta energía es directamente proporcional al cuadrado del módulo de la velocidad. Un sistema eólico es capaz de captar y transformar parte de esa energía en trabajo de eje, que puede utilizarse para realizar trabajo mecánico como también en impulsión de agua y en generación de energía eléctrica. Un primer interés en este tema radica en la posibilidad de estimar el potencial de energía que se puede extraer del viento, concretamente, si toda la energía por unidad de masa de fluido en movimiento puede ser captada o si solamente parte de ella es extraíble. La *ecuación de Betz* permite realizar esta estimación [5,8]:

$$P_{eol.} = 0.59 \cdot \rho \cdot D^2 \cdot v^3 \qquad (1)$$

Ecuación de Betz

Se observa que la potencia (P_{eol}) depende de la densidad (ρ), de la velocidad (v) al cubo del fluido y del diámetro (D) al cuadrado del área de barrido de las palas, y que estos factores están afectados por un coeficiente de valor 0,59. Este coeficiente, conocido como *coeficiente de Betz*, indica la limitación de extracción de energía que, en condiciones tecnológicas ideales, alcanza al cincuenta y nueve por ciento del total disponible en el viento. Se trata de una situación ideal, que no incluye en el cálculo los efectos de disipación de energía debido a fricción mecánica de componentes rotantes de la turbina. Estos efectos son contemplados a través del *coeficiente de potencia mecánica* (C_p) del eólico, indicador del rendimiento de la turbina en la estimación del potencial aprovechable.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los aerogeneradores con rotor bipala y tripala y diseño de palas en forma de hélice son las máquinas que presentan el mejor rendimiento dentro de la vasta gama de eólicos, llegando a una performance máxima del 47 por ciento en la captación y conversión de energía del viento [4-6].

El diámetro de área de barrido es un dato fácilmente obtenible desde la data técnica del equipo, donde se indica la longitud axial de las palas y la disposición angular entre ellas. El anemómetro provee la velocidad del viento en intervalos de tiempo regulares, en el lugar de emplazamiento de los equipos. La densidad del aire, en cambio, es la variable más controvertida de las tres aplicadas en la *ecuación de Betz* porque existe una tendencia a trabajar con ella operando con criterios aplicables a fluidos líquidos, donde su variación con la temperatura (dentro de un rango de temperatura ambiental de cincuenta grados) es notoriamente menor en comparación con los fluidos gaseosos. Esta variación en el caso del agua a presión atmosférica, cuando su temperatura es elevada de 0°C a 50°C, es del 1,18 por ciento [7]. Una consideración común cuando se trabaja en sistemas con circulación de agua, dentro de ese margen de temperaturas, consiste en adoptar un valor *standard* de la densidad del agua, por ejemplo, a 10°C, lo que no produce una distorsión significativa en los cálculos. Pero esta consideración es inválida en el caso de los gases dada la sensibilidad que muestra este parámetro en ese estado de la materia. La densidad del aire se reduce en el orden 18 por ciento para el mismo rango de variación de temperatura, hecho que muestra esa sensibilidad [7]. Otros parámetros como la viscosidad varían también pero su efecto se muestra irrelevante dentro del rango de temperatura evaluado puesto que el flujo presenta un fuerte predominio de las fuerzas inerciales (que es donde tienen injerencia la velocidad del fluido y su densidad) sobre las viscosas (determinadas por la viscosidad dinámica) como ya lo muestra el valor de número de Reynolds (Re) declaradamente turbulento (del orden de $1{,}5.10^6$) calculado para una condición de velocidad de viento poco favorable (2 m/s) y a 40°C de temperatura del aire. Es necesario, entonces, incluir en el estudio de emplazamiento de aerogeneradores información referente a la temperatura de la zona de emplazamiento (promedios y valores extremos estacionales) y emplear reglas o algoritmos que permitan la estimación adecuada de la densidad en función de las temperaturas esperables para distintos periodos en el año en cada locación.

El análisis de la influencia del factor térmico en el rendimiento de estas máquinas ha sido realizado desde un enfoque teórico, los resultados se han obtenido mediante aplicación de expresiones de cálculo del potencial eólico y datos tabulados de las propiedades del fluido [7,10].

ISBN: 978-987-1676-63-7

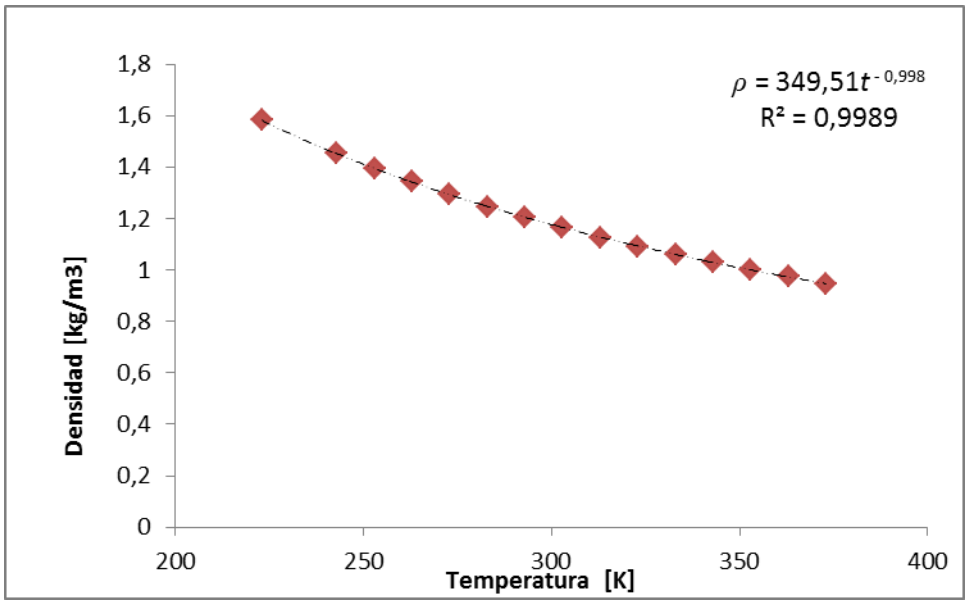
1.2 *Objetivos*

El objetivo de este trabajo ha sido contribuir a mejorar la predicción de la calidad del recurso eólico y, consecuentemente, lograr un mayor ajuste en la estimación del rendimiento del aerogenerador en el área de emplazamiento, mediante la formulación de una herramienta matemática que permite obtener un valor más acotado de la densidad del aire como función de la temperatura del lugar.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 *Variación de la densidad del fluido*

Se procedió a determinar una formulación matemática que exprese la variación de la densidad del aire a presión atmosférica normal, en función de la temperatura. Se muestra en la siguiente figura el resultado obtenido para un rango de temperaturas ambientales medible en la superficie terrestre (-50°C a 50°C y extendido hasta 100°C). Cada punto de color rojo indica un par de valores discreto densidad-temperatura del aire seco, medidos a la presión de una atmósfera [7] y la curva de trazo guionado es la curva de ajuste que surge de la ecuación (2) (en el margen derecho de la figura 2), obtenida mediante aplicación del Método de Mínimos Cuadrados.



(2)

Figura 2: Curva de variación de la densidad del aire en función de la temperatura

El cálculo del *Coeficiente de Determinación* R^2 (en el margen derecho de la figura) indica una buena correlación de la curva de ajuste. La densidad muestra, entonces, una relación de clase potencial decreciente como función de la temperatura ambiente, para la condición de presión establecida en este análisis.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2 *Análisis de potencial eólico*

Se ha realizado el análisis del potencial eólico disponible en cinco áreas de La Argentina con buena calidad del recurso y características térmicas ambientales bien diferenciadas. Se trabajó con los datos de temperatura promedio de los meses enero y julio propios de las ciudades que se indican en tabla 1, para el cálculo de la densidad del aire en cada localidad.

Tabla 1**:** Temperatura promedio para los meses de enero y julio correspondientes a localidades de cinco áreas climáticamente diferenciadas localidades de la Argentina [9]

Localidad	Temperatura media enero [°C]	Temperatura media julio [°C]
San Salvador de Jujuy (Noroeste Argentino)	27,0	10,0
San Juan (Cuyo)	27,0	8,0
Villa Gesell (Pampa Húmeda)	21.1	5,0
Comodoro Rivadavia (Patagonia)	18.7	6.7
Ushuaia (Patagonia trasandina)	9.1	1,0

La ecuación (2) ha sido de utilidad para el cálculo de la densidad del aire correspondiente a cada temperatura. Los valores obtenidos se muestran en tabla 2:

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2**:** Densidad del aire como función de la temperatura promedio de las localidades de cinco áreas climáticamente diferenciadas de La Argentina para los meses de enero y julio.

Localidad	Temperatura media enero [°C]	Densidad del aire [kg/m^3]
San Salvador de Jujuy (Noroeste Argentino)	27.0	1.178
San Juan (Cuyo)	27.0	1.178
Villa Gesell (Pampa Húmeda)	21.1	1.202
Comodoro Rivadavia (Patagonia)	18.7	1.212
Ushuaia (Patagonia trasandina)	9.1	1.253
Localidad	**Temperatura media julio [°C]**	**Densidad del aire [kg/m^3]**
San Salvador de Jujuy (Noroeste Argentino)	10.0	1.249
San Juan (Cuyo)	8.0	1.258
Villa Gesell (Pampa Húmeda)	5,0	1.271
Comodoro Rivadavia (Patagonia)	6.7	1.264
Ushuaia (Patagonia trasandina)	1.0	1.290

Se ha evaluado la performance del aerogenerador asincrónico bipala *Hussumer Schiffswerft* modelo HSW-30, de 18 kW de potencia nominal en cada locación.

Los valores de densidad obtenidos han sido empleados para estimar la máxima potencia extraíble al viento mediante aplicación de la *Fórmula de Betz* (ecuación (1)), considerando el diámetro de barrido de este modelo de aerogenerador, de 12,60 metros de longitud entre los extremos de las palas, y evaluando la potencia del recurso a la misma velocidad de viento (10 m/s) en cada caso.

2. RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos del análisis en las figura 2 y 3:

ISBN: 978-987-1676-63-7

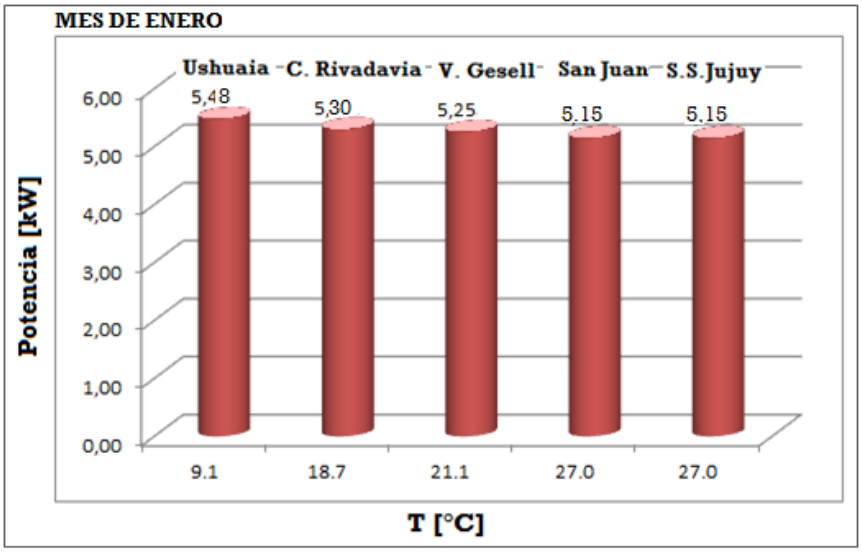


Figura 2**:** Potencia eólica máxima extraíble en función de la temperatura promedio para el mes de enero correspondiente a localidades de cinco áreas climáticamente diferenciadas

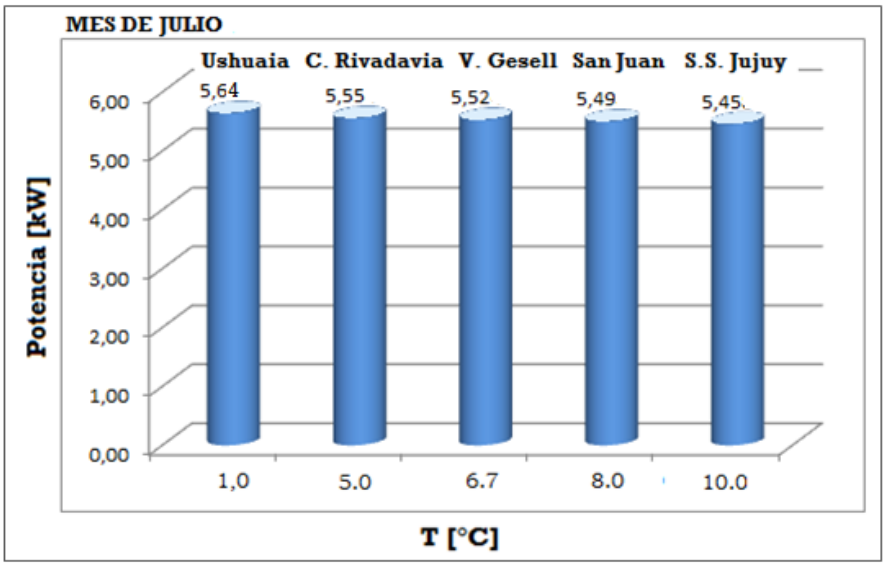


Figura 3**:** Potencia eólica máxima extraíble en función de la temperatura promedio para el mes de julio correspondiente a localidades de cinco áreas climáticamente diferenciadas

Cada columna de la figura 2 indica el máximo potencial extraíble al viento con el modelo eólico en cada localidad estudiada para el mes de enero y para el modelo de molino eólico estudiado, operando en régimen nominal y con la misma velocidad de viento en cada localidad. Se indica el valor en kW hallado sobre cada columna y en el caso de la localidad de Ushuaia, donde se registra la menor temperatura promedio (9,1°C) (y consecuentemente la mayor densidad del aire)

ISBN: 978-987-1676-63-7

la máxima potencia (ideal) extraíble al viento con el aerogenerador evaluado es de 5.48 kW. En la ciudad de Villa Gesell, donde la temperatura promedio es de 21,1°C, es decir, más de 10°C respecto de Ushuaia, la potencia obtenible es de 5,25 kW y la menor performance se registra en la ciudad de San Juan, donde la máxima potencia extraíble es de 5,15 kW. Una situación similar se presenta en el mes de julio, donde se repite la performance en cada localidad aunque las diferencias entre ellas son menores respecto de los resultados en el mes de enero.

La siguiente tabla cuantifica esas diferencias que se traducen en un rendimiento distinto del eólico al ser emplazado en cada uno de estos puntos geográficos. Se ha indicado como valor de referencia la potencia obtenible en Ushuaia, donde el aerogenerador HSW-30 muestra la eficiencia más alta en relación al aspecto térmico ambiental.

Tabla 3: Relación entre potencia extraíble al viento en cada localidad respecto de la extraíble en Ushuaia para las mismas condiciones operativas del modelo HSW-30.

Localidad	Eficiencia relativa respecto de la ciudad de Ushuaia –mes enero	Eficiencia relativa respecto de la ciudad de Ushuaia –mes julio
San Salvador de Jujuy (Noroeste Argentino)	0.939	0.966
San Juan (Cuyo)	0.939	0973
Villa Gesell (Pampa Húmeda)	0.958	0.979
Comodoro Rivadavia (Patagonia)	0.967	0.984
Ushuaia (Patagonia trasandina)	1.000	1.000

Esta tabla muestra que las posibilidades de explotación de energía del viento difieren en las distintas latitudes estudiadas debido a la variación de la densidad del fluido como función de la temperatura local. Se observa que el caso más extremo se da una reducción en la captación del orden del 6,1 por ciento entre las ciudades de San Juan y de San Salvador de Jujuy respecto de Ushuaia, para el mes de enero y una reducción del 3,4 por ciento en San Salvador de Jujuy respecto de Ushuaia para el mes de julio.

4. CONCLUSIONES

La temperatura ambiental ha quedado evidenciada en materia eólica como un factor de peso en la calidad energética del recurso y del rendimiento del molino.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Afecta perceptiblemente a la densidad del aire y si bien es menos preponderante que la velocidad del fluido no debe desestimarse e en el momento de realizar una evaluación de las posibilidades del recurso en un área geográfica.

La ecuación de *Betz* cuantifica la injerencia de la densidad en la calidad del potencial energético del viento y la temperatura ambiental ejerce, entonces, una influencia (indirecta) sobre la performance del recurso. No obstante, la inclusión de la densidad en trabajos de evaluación del recurso está menos documentada, restringiendo generalmente su ponderación a aspectos cinéticos del fluido y a las características aerodinámicas y mecánicas del molino.

Frecuentemente, la idea extendida de considerar que los fluidos presentan una variación mínima de la densidad frente a cambios de temperatura en el rango de valores ambientales puede conducir a aplicar un valor de densidad “representativo” (por ejemplo, trabajar con el valor correspondiente a la temperatura de 10°C) hecho que sería admisible en el caso de fluidos líquidos, pero deja de serlo cuando se trabaja con fluidos gaseosos (como puede observarse en la Tabla 2).

La reducción de algo más del 6 por ciento en la captación de potencia eólica del aerogenerador estudiado, como se ha encontrado en la evaluación de su instalación en la ciudad de San Juan en comparación con su emplazamiento en la ciudad de Ushuaia (para las mismas condiciones operativas), debido a la diferencia de temperatura media estival entre ambas localidades está indicando, por ejemplo, una diferencia de 982,1 kWh para el mes de enero en favor de los instalados en Ushuaia para un emplazamiento de veinte aerogeneradores del modelo HSW-30 en cada ciudad y asumiendo que la quinta parte de los treinta y un días del mes de enero (esto es, seis días y cinco horas) el viento alcanza una velocidad de 10 m/s. Y es probable que se pueda pensar (erróneamente) en que esta diferencia de rendimiento se origine por algún desperfecto que afecte a las máquinas instaladas en San Juan o por problemas de interconexionado, o provenientes del sistema de transmisión de la energía eléctrica desde los molinos hacia servicio.

Por otra parte, la expresión para el cálculo de la densidad (ecuación (2)) resultó una herramienta de interés práctico puesto que, en contraste con las tablas de densidad de fluidos que se confeccionan en intervalos discretos de temperaturas (generalmente dado en intervalos de 10°C), evita la realización de cálculos de interpolación (en ocasiones tediosos) permitiendo estimar el valor de densidad en una sucesión continua de temperaturas, en el rango de -50°C a 100°C.

Los resultados obtenidos muestran, entonces, que la temperatura medioambiental es un parámetro que influye en el sistema eólico, del mismo modo que sucede con las máquinas eléctricas y térmicas, y que debería ser incluida siempre en el estudio de emplazamiento de molinos eólicos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. REFERENCIAS

[1] Cortés Cherta, M.. 'Curso Moderno de Máquinas Eléctricas' –Ed. Editores Técnicos Asociados S.A. – Barcelona (1990)

[2] Sprague De Camp, L. ´Energía y Potencia´ Organización Editorial Novaro S.A. – Western Publishing Company - México (1966)

[3] Mataix Plana, C. ´Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas´ 2° Edición - Ediciones Del Castillo – Madrid (1986).

[4] Rapallini, A – Moragues, J., 'Energía Eólica' - Instituto Argentino de la Energía General Mosconi –(2003).

[5] Spinadel, E.- 'Curso Intensivo de Energía Eólica' – Asociación Argentina de Energía Eólica – (2001)

[6] Harper, H.- 'Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica'- Editorial LIMUSA, Grupo Noriega Editores (2009).

[7] Smith, J.; Van Ness, H.; Abbott, C. 'Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química' 5° edición – Editorial Mc Graw- Hill – México- (1997).

[8] Heier, S. 'Explotación de la energía eólica a gran escala técnica', Foro: Energía Eólica en Argentina y en el Cono Sur – AHK – Cámara Argentino Alemana (12: 2008).

[9] www. Climate-Data.org

[10] Kundu, P.; Cohen, I. 'Fluid Mechanics' 2° edición, Universidad de Pensylvania - Philadelphia- Academic Press – U.S.A.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE UN MICROGASIFICADOR PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOMASA RESIDUAL EN EL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA (COLOMBIA)

L.G. Riveros[1], J.F. Arcila [2] J.F. Arango [3] J.M. Mendoza [4] R.D. Gómez[5]

[1 2 3 5] Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería.
Cra. 6 No. 97 A - 99, Montería, Colombia
[4] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba.
Correo-e: jorgemmf@gmail.com

RESUMEN

El departamento de Córdoba (Colombia), se caracteriza por ser un gran productor agrícola y pecuario, por ejemplo, en el 2013 la producción de maíz fue de 252.504 Toneladas [1], con una generación de Tusa de maíz que compone el 17% de la masa total de la producción [2] lo que se traduce en grandes volúmenes de biomasa residual provenientes de la agroindustria, los cuales tienen poco o ningún valor agregado en la región puesto que normalmente su destino final es la incineración al aire libre. Esta investigación consiste en el desarrollo de un microgasificador para la producción de gas combustible a partir de biomasa residual proveniente del departamento de Córdoba, el diseño fue realizado con base en referentes bibliográficos en materia de gasificación como *Construction of an Updraft Biomass Gasifier and Composition Analysis* [3], y usando tusa maíz como biomasa residual se alcanzó un poder calorífico del gas de alrededor de 2000 kJ/kg.

El microgasificador diseñado cuenta con un sistema de acondicionamiento de gas el cual está compuesto por un ciclón, donde se realiza la separación de las partículas sólidas presentes en el gas obtenido gracias a la acción de la fuerza centrífuga; y un filtro el cual está compuesto por una tela fina que restringirá el paso de partículas sólidas garantizando el correcto acondicionamiento del gas, este sistema es desarrollado con miras al aprovechamientos de los residuos en zonas no interconectadas del departamento de Córdoba.

Palabras Claves: *Microasificación de biomasa, Diseño, Gasificación,*

1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Córdoba en Colombia, es una zona reconocida por su alta producción de recursos agrícolas, es el principal productor de algodón en Colombia con una producción en el 2013 de 34.366 toneladas, en arroz tuvo una producción de 97.947 toneladas en el 2013 y también Maíz, con una producción de 252.504 toneladas. lo anterior se traduce en una alta producción de residuos provenientes de esta actividad, los cuales en la zona no son aprovechados, lo que causa una acumulación de estos residuos que se ve reflejado en un problema económico puesto que se está empleando espacio para su almacenamiento y no en otros procesos, por esta razón normalmente la disposición que los agricultores le dan a estos residuos es la quema a cielo abierto y de manera no controlada, generando problemas de salud en las zonas aledañas debido al material particulado y los gases contaminantes. Ahora bien, en Córdoba durante el 2012 el 60,2% y 27,3% se encuentran en estado de pobreza y pobreza extrema respectivamente [1] y más del 15% de la población se encuentra habitando en zonas no interconectadas a la red pública [2]. Caso curioso es, que las zonas no interconectadas se encuentran en las zonas de mayor producción agrícola y asimismo estas se encuentran ubicadas en los focos de pobreza y pobreza extrema en el departamento.

La anterior situación, es un escenario donde se puede plantear la gasificación de biomasa como una solución, para así darle un valor añadido a la biomasa residual producida, llevar energía a las zonas no interconectadas y mejorar la calidad de vida de las personas con bajos recursos. Normalmente las plantas de gasificación son muy grandes y de generación a gran escala, pero la producción agrícola en las zonas es extensiva dificultando la distribución de energía. Por lo que se plantea el diseño de microgasificadores de producción a pequeña y mediana escala para la generación de energía en las zonas agrícolas.

Con respecto al diseño de micro gasificación, se han llevado a cabo diferentes investigaciones. En "*Design and Development of an Energy Efficient Turbo Stove: a "Micro-gasifier" based on Biomass Gasification Technology"* se diseñó un microgasifcador con alta eficciencia debido a la convección. En este diseño se tuvieron en cuenta 3 puntos importantes, el reactor, la coraza y la zona de entrada de aire [3]. En "*Construction of an Updraft Biomass Gasifier and Composition Analysis for Different Biomass Fuels"*, se desarrolla un gasificador tipo Updraft de manera exitosa, en este artículo se muestra la construcción de gasificador paso a paso usando materiales reciclados [4]. En "*Diseño de un Reactor Continuo de Gasificación de Biomasa",* se presenta el diseño de un gasificador tipo Downdraft para alimentación continua por pellets, en este documento se

ISBN: 978-987-1676-63-7

desarrollan todo el diseño desde la selección del tipo de gasificador hasta los sistemas de control [5].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Especificaciones del Microgasificador

El microgasificador construido es de tipo lecho fijo updraft, en el cual el sólido y el gas se desplazan en sentido contrario, esta es la configuración más común para los sistemas de gasificación en donde la biomasa se mueve en sentido descendente y el gas en ascendente [6]. Se optó por este tipo de microgasificador debido a que su construcción y operación es sencilla. En este se logra una elevada eficiencia térmica pero, aun así la temperatura del gas de salida es baja, permitiendo realizar, en muchos casos, una combustión directa del gas obtenido sin contar con sistemas de refrigeración.

El Microgasificador diseñado consta de 3 partes principales: sistema de gasificación, sistema de acondicionamiento del gas y sistema de generación de energía. Para el dimensionamiento y diseño de cada uno de estos componentes se tuvo en cuenta características tales como diámetros de los conductos de comunicación, la temperatura que debe resistir cada componente y en ensamble de cada uno de estos. Los diferentes datos e información sobre el proceso de gasificación se obtuvieron durante una etapa de investigación.

El sistema de gasificación está compuesto por un reactor y una coraza. En el reactor se realizan las reacciones termoquímicas necesarias para transformar la biomasa en un gas de bajo poder calorífico. Luego que se produce el gas, este llega al sistema de acondicionamiento del mismo, este sistema está compuesto por un ciclón y un filtro de tela. En primera instancia el gas llega al ciclón, donde se retiran la mayor cantidad de cenizas, material particulado, alquitranes y otros elementos de la corriente gaseosa que generan problemas ambientales y riesgos contra la salud, seguidamente el gas será conducido hasta el filtro, donde se fuerza a circular a través de una malla fina la cual se encarga de atrapar las partículas en suspensión restantes. Finalmente, el gas llega al sistema de generación de energía, el cual está compuesto por un quemador, este puede ser acoplado a un motor de combustión interna para la generación de energía eléctrica.

2.2. Materiales

Todas las medidas para el dimensionamiento mostradas a continuación se encuentran en milímetros a menos de que se especifique lo contrario. Para la construcción del sistema de

gasificación compuesto por el reactor y la coraza, se optó en primera instancia por cilindros de gas de 30 y 100 psi respectivamente. Puesto que en la literatura encontrada se observó las medidas recomendadas para la manufactura de Microgasificadores, donde se utilizaban cilindros de gas como herramienta base para su dimensionamiento, el libro de Ben Peterson *"Wood Gasifier Builde's Bible"* [7], resalta el uso de estos debido a su gran resistencia a altas temperaturas y presiones, además de su facilidad de ser encontrados en el medio. Ahora bien, debido a su disponibilidad se decidió adaptar un dispositivo que se acoplaba a las medidas planteadas inicialmente a la coraza del microgasificador, esto se hizo con el fin de aprovechar elementos que no tenían ninguna función y estaban prestos a ser desechados, demostrando así que se pueden emplear elementos reciclables para la construcción de equipos de generación de energía.

Mientras que, para el sistema de acondicionamiento del gas comprendido por el ciclón y el filtro de tela, se utilizaron materiales que son económicos y abundantes en el mercado. Para el dimensionamiento y posterior construcción del ciclón, se utilizó como referencia el artículo de Carlos Echeverry "Diseño óptimo de ciclones*",* el cual indica los criterios que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un ciclón [8]. Para la construcción del ciclón se utilizó láminas de acero al carbono debido a su maleabilidad, resistencia a altas temperaturas y economía. Luego el gas entra en el interior del filtro, donde un conjunto de fibras, gránulos o superficies porosas atraparan todo o parte de los residuos que no se alcanzaron a retirar por parte del ciclón. Una de las principales ventajas que presenta el filtro es que la caída de presión es invariable por grandes cargas de entrada de partículas, lo que ayuda a que su eficacia de separación alcance hasta el 99%, Para la selección del tipo adecuado filtro de tela se tuvo en cuenta tanto la temperatura, como la resistencia química que tiene a ciertos contaminantes.

El sistema de generación de energía que está compuesto por un quemador en el cual el gas se encenderá, de modo que no se libere al entorno un volumen de gas que es totalmente toxico, también se tuvo en cuenta la cantidad de calor que lleva el gas producido para la selección del tipo material. Estos elementos serán fabricados en tubería y láminas de acero al carbono por los puntos expuestos anteriormente.

2.3. Biomasa

La biomasa empleada para la evaluación de micrograsficador fue la tusa de maíz, debido a que la producción de maíz en el departamento de córdoba fue de 252.504 toneladas en el 2013 [9] y cuya producción de tusa es del 17% de la producción total [10]. En la Tabla 1 se observan los análisis próximos y últimos de la biomasa.

Tabla 1: Análisis Próximo y Último de la tusa de maíz.

Análisis Próximo del Maíz		Análisis ultimo del Maíz	
Humedad Residual (%)	10,52	**Carbono (%)**	39,4
Cenizas (%)	7,71	**Hidrógeno (%)**	4,27
Volátiles (%)	65,23	**Oxígeno (%)**	55,63
Carbono fijo (%)	16,54	**Nitrógeno (%)**	0,7
Azufre Total (%)	0,09		
Poder Calorífico Superior (kJ/kg)	15865,728		

2.4. Aspectos teóricos

Modelo del Poder calorífico Inferior (PCI)

Para la evaluación del poder calorífico del gas obtenido del proceso, se toman muestras mediante una conexión directa a un cromatógrafo de gases 490 Micro-GC Agilent Technologies de tres columnas que analiza cuantitativamente los gases para determinar la concentración en porcentaje mol a mol (n/n) de los gases combustibles. El cálculo para el PCI fue hecho por los valores parciales de poder calorífico inferior de especies combustibles de componentes del gas como se muestra en *Análisis Exergético de la Gasificación de Biomasa* [11]..

$$PCI_{gas} = \frac{yCO * PCI_{CO} + yH_2 * PCI_{H_2} + yCH_4 * PCI_{CH_4}}{M_{gas}} \quad (1)$$

Donde:

- yCO: Fraccion molar de Monóxido de Carbono.
- yH_2: Fraccion molar de Hidrogeno.
- yCH_4 : Fraccion molar de Metano.
- PCI_{H_2}: Poder calorífico inferior de Hidrogeno en kJ/kmol.
- PCI_{CO}: Poder calorífico inferior de Monóxido de Carbono en kJ/kmol.
- PCI_{CH_4}: Poder calorifico inferior de Metano en kJ/kmol.
- M_{gas}: Masa molar del gas de gasificación.

Dimensionamiento del ciclón

Para realizar el correcto dimensionamiento del ciclón se tuvo como referencia artículo de Carlos Echeverry *"Diseño óptimo de ciclones"* [8], empezando por el cálculo del diámetro del ciclón como base para el posterior cálculo de las demás medidas que componen el ciclón.

$$Q = A * V \quad (2) \qquad a = 0{,}75 * Dc \quad (3)$$

$$A = a * b \quad (4) \qquad b = 0{,}375 * Dc \quad (5)$$

Donde:

- A= Área del ducto de entrada

- V=Velocidad del gas a la entrada del ciclón
- Q= Caudal volumétrico del gas
- Dc=diámetro del ciclón

Se calcularon las diferentes medidas de las partes que componen el ciclón de acuerdo al diámetro del ciclón.

Altura entrada al ciclón (a) = 0,75*Dc	(6)	Altura de la parte cilíndrica (h)= 1,5*Dc	(7)
Ancho de entrada al ciclón (b)=0,375*Dc	(8)	Altura de la parte cónica (z) = 2,5*Dc	(9)
Ancho de entrada al ciclón (b)=0,375*Dc	(10)	Altura total del ciclón (H)= 4*Dc	(11)
Altura de la salida (S)= 0,875*Dc	(12)	Diámetro de salida de partículas (B)= 0,375*Dc	(13)
Diámetro de salida (Ds)= 0,75*Dc	(14)		

Al estar seguros de que no hay resuspensión de material particulado, se realizaran los respectivos cálculos para hallar la eficiencia del ciclón, para ello se necesita determinar 3 variables:

- Factor de configuración (G).
- Tiempo de relajación (ti).
- Exponente del vórtice (n).

Para calcular el exponente del vórtice (n) hace falta la siguiente ecuación:

$$n = 1 - (1 - 0{,}67 * Dc^{0{,}14}) * \left(\frac{T}{283}\right)^{0{,}3} \quad (15)$$

- Donde:
- Dc= diámetro del ciclón
- T= temperatura del gas

A continuación, se calcula el tiempo de relajación (ti) en base a la siguiente ecuación:

$$ti = \frac{\rho_p * {D_{pi}}^2}{18\,\mu} \quad (16)$$

En la cual

- $\rho_p = densidad\ de\ particula = 2000 kg/m^3$
- μ = viscosidad del gas a la entrada del ciclón
- ${D_{pi}}^2$ = diámetro de la partícula

A continuación, se muestra la forma del cálculo de la eficiencia para los diferentes tamaños de partícula:

$$\varepsilon = 1 - e^{(-2*(\frac{G*ti*Q*(n+1)}{Dc^3})^{\frac{0{,}5}{n+1}}} \quad (17)$$

Donde:

- G= factor de configuración = 29,79
- ti= tiempo de relajación
- Q= Caudal volumétrico del gas $=154{,}32 m^3/h = 0{,}0428 m^3/s$

- Dc= diámetro del ciclón = 87,22mm = 0,0872m
- n= exponente del vórtice = 0,72

Finalmente se calcula la eficiencia total, de acuerdo al a siguiente ecuación:

$$\text{Ɛ}\, total = \sum \text{Ɛ} * \text{mi} \quad (18)$$

Donde:

- Ɛ= Eficiencia del ciclón según el tamaño de partícula
- mi=Porcentaje másico de la partícula

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Diseño del Microgasificador

Reactor

El reactor cuenta con una geometría sencilla, no es más que un cilindro con algunas perforaciones de entrada y salida de flujo

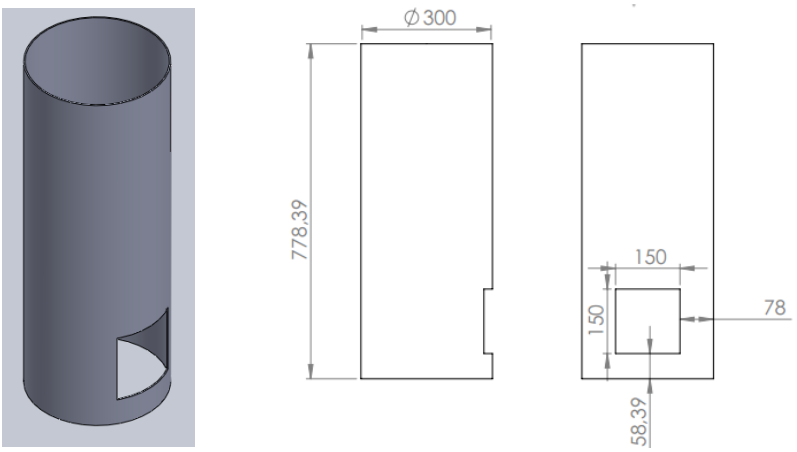


Figura 1: Reactor (Izq.) CAD del reactor (Der.) Plano de construcción

Este reactor cuenta con una medida de 300 mm de diámetro y una longitud de 778 mm, basadas en el confort, para la alimentación del microgasificador.

Coraza

La coraza es el cuerpo del microgasificador, será quien sostenga el reactor y contenga los ductos para el ingreso y salida de los flujos que intervienen en el proceso (Agente gasificante y gas producido). Se planteó el desarrollo de este elemento con un cilindro de gas de 100 Psi, pero en el momento se contaba con una caldera que se encontraba sin uso y presentaba las medidas que se habían planteado, así que se acoplo este elemento al diseño del microgasificador a construir.

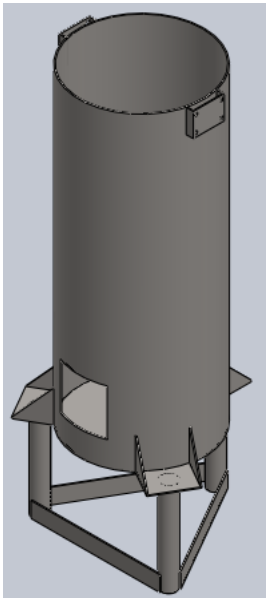


Figura 2: Coraza del microgasificador

Ciclón

En la Figura *3* se puede observar el ensamblaje del microgasificador, el ciclón se encuentra en la parte inferior para así realizar una regeneración del calor en el proceso. Además, en la figura se pueden apreciar las diferentes medidas del ciclón obtenidas de los cálculos mencionados anteriormente. Por otra parte, en la Figura *4* es mostrada una vista de corte de microgasificador con el fin de detallar la configuración interior.

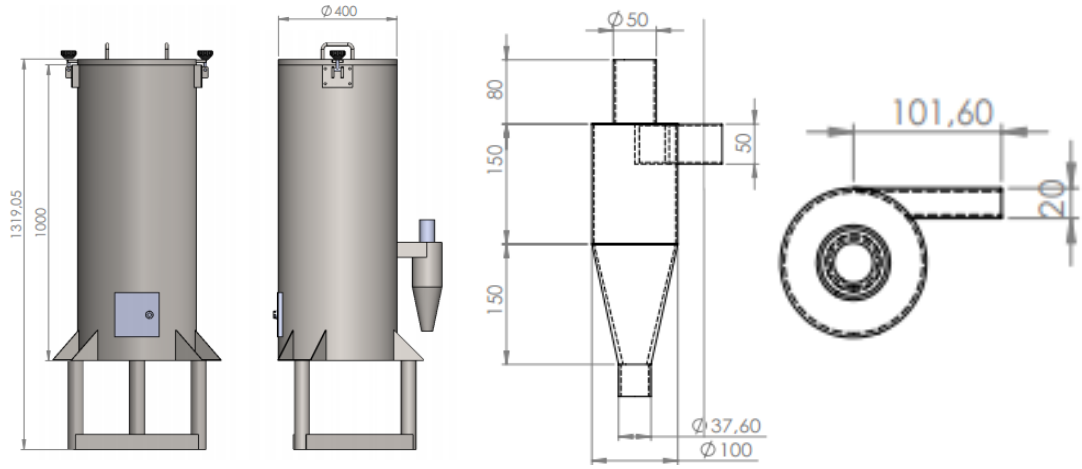


Figura 3: Medidas y ubicación del ciclón

ISBN: 978-987-1676-63-7

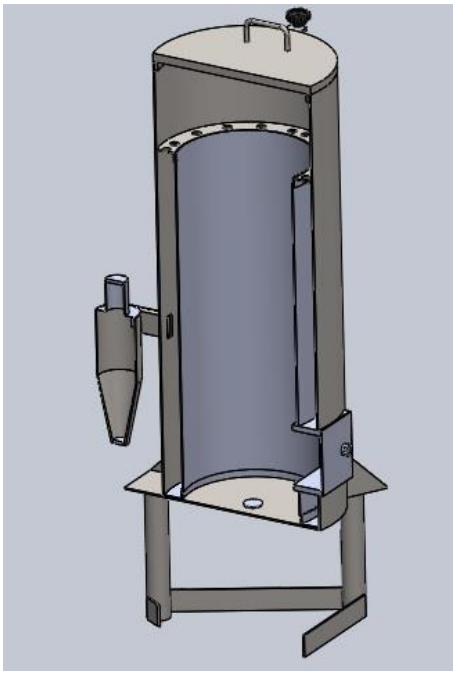


Figura 4: vista de corte

Para los diferentes cálculos mencionados anteriormente se utilizó la tabla proporcionada por el estudio denominado "*Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa"*, el cual muestra las diferentes propiedades del gas producto de la gasificación de pellets de madera. Seguidamente se realizó la Tabla 2 donde se muestra los respectivos datos de eficiencia y tiempo de relajación para cada tamaño de partícula los cuales se encontraron también en la investigación del Estudio *"Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa"* [12].

Tabla 2: Eficiencia Alcanzada Por El Ciclón De Alta Eficiencia según tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	mi (%)	Dp(µm)	ti(s)	Ɛ	Ɛ*mi (%)
más de 1000	1,03%	1000	2,64E+00	1	1,03%
1000 - 250	14,92%	625	1,03E+00	1	14,92%
250 - 102	14,32%	176	8,20E-02	1	14,32%
102 - 75	4,29%	88,5	2,07E-02	1	4,29%
75- 60	5,02%	67,5	1,20E-02	0,99	4,96%
60 -50	7,25%	55	8,00E-03	0,99	7,18%
50 – 30	10,27%	40	4,23E-03	0,98	10,07%
30 - 10	15,71%	20	1,05E-03	0,94	14,77%
10 - 5	27,19%	7,5	1,48E-04	0,8	21,75%
				Ɛ total	93,29%

3.2. Evaluación experimental

En la Tabla 3, se muestra los valores resultantes de la experimentación en el microgasificador. Se puede observar un ER de 0.42, lo cual indica que sí se encuentra en zona de gasificación. Además de la aparición de componentes típico de la gasificación como el metano, el hidrógeno, y el

ISBN: 978-987-1676-63-7

monóxido de carbono en alta proporción [6]. Es necesario evaluar la posibilidad de generar de energía a través de motores de combustión interna, y así mismo es necesario realizar una caracterización energética exhaustiva del equipo con otras biomasas con el fin de determinar el potencial de generación de energía en las condiciones del equipo.

Tabla 3: resultados experimentales del microgasificador.

Biomasa (kg)	**Cenizas (kg)**	**Flujo de aire (m^3/h)**	**ER**	**Hidrogeno**	**Oxigeno**	**Nitrógeno**
1,654	0,14	13,13	0,42	0,01427243	2,37479094	10,4517995
Metano	**Monóxido**	**Dióxido**	**Etano**	**Propano**	**PCI**	
0,05294025	0,53751382	2,28365296	0,00210483	0,73948321	2036,31	

4. CONCLUSIONES

- El diseño del ciclón es uno de los aspectos más importantes para el desarrollo de un microgasificador, puesto que los sistemas posteriores a este no podrían funcionar sin un correcto acondicionamiento del gas.
- La ubicación del ciclón se hizo con el fin de regenerar el calor contenido en los gases de gasificación.
- Se logró diseñar un microgasificador usando materiales reciclados y con manufactura simplificada.
- Se presentan los componentes típicos de la gasificación de biomasa.
- El poder calorífico promedio de la evaluación energética fue de 2036.31 kJ/kg, con un valor de ER de 0.42.
- Nuevas evaluaciones energéticas necesitan ser realizadas de manera exhaustiva con el fin de evaluar el potencial de generación de energía en las condiciones del equipo.

REFERENCIAS

[1] DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística, «Pobreza monetaria y multidimensional en Colombia - 2012,» 2012.

[2] DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística, «Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI),» 2014.

[3] V. Kumar Singh y P. Raman, «Design and Development of an Energy Efficient Turbo Stove: a "Micro-gasifier" based on Biomass Gasification Technology,» de *PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND ENVIRONMENT*, 2009.

[4] P. Yadav, P. Sharma, D. B. Gupta y D. M. Pandey, «Construction of an Updraft Biomass Gasifier and Composition Analysis,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),* vol. 2, pp. 660-667, 2013.

[5] A. M. Castello Belmar, Diseño de un Reactor Continuo de Gasificación de Biomasa, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2014.

[6] P. Basu, Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory, Burlington: Elsevier, 2010.

[7] B. Peterson, Wood Gasifier Builder's Bible, Redmond, Washington: Wood Gasifier Plans.

[8] C. A. Echeverri Londoño, «Diseño Optimo De Ciclones,» *Resvista Ingenierias Universidad de Medellin,* vol. 5, nº 9, pp. 123-139, 2006.

[9] Agronet, «Agronet,» 2013. [En línea]. Available: http://www.agronet.gov.co/Paginas/estadisticas.aspx.

[10] C. Padilla Merlano, Estudio de pre-factibilidad de una empresa de recolección y adecuación de biomasa en el municipio de suan - atlántico, Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte, 2007.

[11] J. M. Mendoza, A. J. Bula, R. D. Gómez y L. A. Corredor, «Análisis Exergético de la Gasificación de Biomasa,» *Información tecnológica,* pp. 86-96, 2012.

[12] C. G. Cuba Arroyo, «Piloto de gasificador downdraft operado con biomasa,» Barcelona, 2011.

[13] McKenna, JD., Mycock, JC. y T. L., Handbook of Air Pollution Control Engineering and Technology., BOCA RATON, FL 33431 (USA). : CRC PRESS, LEWIS PUBLISHERS, 1995.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS

Eduardo M. Roa [1], Rafael D. Gómez [1], Víctor A. Nova[2], Jorge M. Mendoza[2] y Yahir E. Gonzalez[2]

[1] Esc. de Ingeniería, Fac. de Ingeniería Mecánica, Univ. Pontificia Bolivariana, Cra 6 N° 97ª-99, Montería-Colombia
[2] Fac. de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Univ. de Córdoba, Cra 6 N° 76-103, Montería-Colombia
correo-e: eduardroalp700@gmail.com

RESUMEN

Los biocombustibles solidos densificados desde el punto de vista de su producción deben cumplir unas normas de calidad: Alto poder calorífico, Muy buena resistencia a la compresión y durabilidad. En este artículo se basa en evaluar la resistencia a la compresión y la durabilidad por caída libre e impacto de los biocombustibles solidos densificados en base a una mezcla compuesta de cascarilla de arroz, ajonjolí, cacota de algodón, tusa de maíz y fibra de coco. Estas dos últimas propiedades dependen de la morfología de los residuos como de su composición de lignocelulosa. La evaluación de las características de las briquetas y pellets por medio del proceso de densificación ayuda a mejorar sus propiedades de manipulación, transporte y almacenamiento, para garantizar una mejor calidad de las briquetas de biocombustibles, se debe hacer unas pruebas de propiedades mecánicas y durabilidad que garanticen la reducción de niveles de emisión de gases de efecto invernadero de acuerdo a la caracterización de la biomasa, las briquetas de combustible son una fuente de energía renovable debido a que estas cumplen con requisitos como lo son la sostenibilidad, un bajo costo de producción y son de fácil acceso a los consumidores, por esto es una alternativa ideal para usar combinada a combustibles como lo son la leña y el carbón vegetal usada en alimentos, de esta manera se puede reducir así el uso excesivo de combustibles tradicionales que generan daños severos al ambiente, el objetivo de este trabajo es determinar las propiedades mecánicas de la resistencia a la compresión y de la durabilidad por caída libre e impacto en mezclas de biocombustibles solidos densificados.

Palabras Claves: *Biomasa, Propiedades mecánicas, Durabilidad*

1. INTRODUCCIÓN

El término biomasa es utilizado actualmente en contextos energéticos para dirigirse a aquellos recursos biológicos de origen vegetal, animal o producto de su transformación, de los cuales se pueda obtener combustibles energéticos, también denominados biocombustibles. En la actualidad, el 90% del consumo de energía de la biomasa tiene lugar en los países en vías de desarrollo. En algunos de los países más pobres del mundo, la biomasa significa entre el 80 y el 90% del consumo energético. Para 2.000 millones de personas, la biomasa es la principal fuente de energía para usos domésticos. [1]

Se entiende por biocombustible cualquier tipo de combustible sólido, líquido o gaseoso que proviene de la biomasa, por lo que su energía proviene de la diversidad biológica del carbono. Su materia prima es renovable y a la hora de la combustión generan menos emisiones de gas de efecto invernadero que en los combustibles fósiles [2] [3]. Los biocombustibles desarrollados a partir de estos productos, pueden ser usados en motores convencionales sin ningún cambio de consideración, ya que debido a su poder diluyente, solo requieren el reemplazo de mangueras de conducción del combustible por elementos no fabricados sobre la base de caucho o espuma de poliuretano [4]. Las briquetas de combustible son una fuente de energía renovable debido a que estas cumplen con requisitos como lo son la sostenibilidad, un bajo costo de producción y son de fácil acceso a los consumidores, de esta manera se puede reducir así el uso excesivo de combustibles tradicionales que generan daños severos al ambiente [4]. La densificación de la biomasa se encarga de reducir el volumen de la misma a través de los métodos de compactación [5]. Este proceso mejora sus propiedades físicas y mecánicas, al ocupar menor volumen [6]. Existen 2 alternativas para llevar a cabo la compactación. Una es el peletizado, en donde la biomasa se compacta a través de unos rodillos sobre una matriz de orificios con tamaños variables en función del tipo de pellet a obtener. El número de rodillos puede ser de 1 a 5 y los orificios que compone la matriz tienen un diámetro desde 0,25 a 0,5cm [7]. El otro es el briqueteado, donde las briquetas se obtienen mediante la generación de grandes presiones que provocan altas temperaturas y la plastificación de la lignina presente en la temperatura. Durante su proceso se generan mecánicamente a altas presiones (200 MPa/cm^3), que provocan un incremento térmico de 100 a 150°C donde la lignina se plastifica (la lignina actúa como elemento aglomerante de las partículas de madera en otras biomasas) [8]. Desde el punto de vista de producción, un biocombustible solido densificado cumple con las normas de calidad bajo estos 3 parámetros: alto poder calorífico a la hora de la combustión, buena resistencia a la compresión y alta durabilidad. Estas dos últimas propiedades dependen de la morfología de los residuos como de su composición de lignocelulosa [9]. Para garantizar una mejor calidad de las briquetas de biocombustibles, se debe hacer unas pruebas de propiedades mecánicas y durabilidad que garanticen la reducción de niveles de emisión de gases de efecto invernadero de acuerdo a la caracterización de la biomasa.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El objetivo de este trabajo es determinar las propiedades mecánicas de durabilidad y resistencia en mezclas de biocombustibles solidos densificados que están hechos a base de tusa de maíz, fibra de coco, cascarilla de arroz, algodón y ajonjolí.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Investigación

Analizar la bibliografía existente sobre las propiedades mecánicas de compresión y durabilidad de biocombustible solidos densificados, es necesario leer sobre las diferentes normativas de la ISO, CEN, ASTM que nos permite conocer los respectivos procedimientos a seguir. Investigar e indagar sobre estudios realizados anteriormente que tengan que ver con el trabajo de investigación a realizar, los parámetros y las condiciones a seguir.

2.2. Contenido de humedad total en base humedad

La determinación de humedad total de la biomasa se realizó bajo la norma española UNE-EN 14774-1:2009 que es el método de secado por la estufa, por el método de referencia. “La muestra del biocombustible se seca a una temperatura a 105°C en una atmosfera del aire hasta que se alcanza una masa constante. Ahí se pesa una bandeja vacía y limpia y se traslada la muestra a la bandeja donde se distribuye de manera uniforme. Se pesa una bandeja idéntica (de referencia). El embalaje se pesa antes y después del secado para realizar el respectivo cálculo del contenido de humedad en base húmeda” [10]. El porcentaje de humedad total en base humedad se calcula mediante la siguiente ecuación 1:

$$\mathbf{M_{ar}} = \frac{(\mathbf{m_2} - \mathbf{m_3}) - (\mathbf{m_4} - \mathbf{m_5}) + \mathbf{m_6}}{(\mathbf{m_2} - \mathbf{m_1}) + \mathbf{m_6}} \times \mathbf{100} \quad (1)$$

Dónde:

- $\mathbf{M_{ar}}$: El porcentaje de humedad en base humeda.
- $\boldsymbol{m_1}$: La masa en gramos de la bandeja vacía.
- $\boldsymbol{m_2}$: La masa en gramos de la bandeja antes del secado.
- $\boldsymbol{m_3}$: La masa en gramos de la bandeja después del secado.
- $\boldsymbol{m_4}$: La masa en gramos de la bandeja de referencia antes del secado. (peso a temperatura ambiente).
- $\boldsymbol{m_5}$: La masa en gramos de la bandeja de referencia después del secado. (peso a temperatura ambiente).
- $\boldsymbol{m_6}$: La masa de la humedad del embalaje

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3. Proceso de elaboración

En el proceso de elaboración de biocombustibles solidos densificados se clasifica cada una de las biomasas, para las que son de gran tamaño se dividen en fragmentos pequeños. Colocar la biomasa en el túnel de secado a una temperatura de 40°C a 50°C y a una velocidad de 2 a 3m/s para remover el mayor contenido de humedad posible, Si la biomasa es muy pequeña se programa a una velocidad de 2m/s. Luego, se tritura la biomasa en el menor tamaño. En el proceso de tamizado, la biomasa triturada se lleva a la tamizadora para reducir las partículas a grano fino, a un tamiz de 250 micras. En el densificado se mezcla la biomasa con el aglomerante de maíz (un 5%) y agregar la mezcla en el molde cilíndrico (en el molde de la briqueteadora), comprimir la mezcla dentro del tubo con un embolo, aplicar presión a la mezcla a través de un gato hidráulico de 6 toneladas (a 3000psi o a 25 golpes), esperar 15 minutos a que a mezcla se compacte para poder retirar la briqueta formada.

2.4. Ensayo de compresión.

En base a la Norma ASTM D695, que es el ensayo de compresión para materiales compuestos, Se coloca la briqueta en la máquina de compresión. Graduar el medidor de desplazamiento y de carga a cero. Someter la briqueta bajo compresión y tomar la lectura de la carga y desplazamiento hasta que fracture. Retirar la Briqueta. El desplazamiento se toma cada 0,05 a 0,1 pulgadas para tomar la lectura de la fuerza. Y se realiza su respectiva grafica de esfuerzo – deformación para las muestras. Para calcular su resistencia se reemplazaba la lectura obtenida en la maquina mediante la Ecuación 2:

$$\mathrm{F\ (lbf)} = 0{,}5624(\mathrm{lectura}) + 2{,}756 \tag{2}$$

2.5. Ensayo de durabilidad por caída libre

Este ensayo se realizó bajo la ley de conservación física, se pesa la briqueta antes dejarla caer, la altura de caída fue de 1m, después de dejarse caer se escogen los fragmentos más grandes (no cuentas partículas de polvo que se desprenden de la briqueta, debido a que representan un porcentaje de error) y se pesan en la balanza. Este procedimiento se repite 4 veces. Y la fórmula para calcular el índice de durabilidad se denomina mediante la ecuación 3:

$$\text{Indice de Durabilidad} = \frac{\mathrm{Mf}}{\mathrm{Mi}} * 100 \tag{3}$$

Donde Mf es la masa después de que la briqueta se haya dejado caer, Mi es la masa antes de dejarse caer la briqueta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.6. Ensayo de durabilidad por impacto

Este ensayo simula el transporte del biocombustible sólido densificado, se basa en la norma CEN/TS 15210. Se pesa la briqueta en la balanza universal, para obtener la masa inicial. Colocar la briqueta en la cámara de ensayo rotatorio [11]. Se programa la cámara de ensayo, con una velocidad angular de 86rpm. Mantener la briqueta dentro de la cámara mientras está en funcionamiento durante 2 minutos. Después de eso, retirar los fragmentos de la briqueta que quedan y pesarlos en la balanza para obtener la masa final. Calcular el índice de durabilidad. Repetir el procedimiento 2 veces.

2.7. Diseño de experimentos y Modelo de regresión multivariable

El diseño de experimentos está basado en mezclas. En donde las características de la calidad de la mezcla de un producto dependen de las proporciones con las que participan los ingredientes y no de la cantidad absoluta de ellos [12].

El diseño de mezclas tiene las siguientes restricciones:

- Cada mezcla contiene las 5 biomasas, que están compuestas de cascarilla de arroz, ajonjolí, cacota de algodón, tusa de maíz y fibra de coco.
- El porcentaje de arroz y ajonjolí varían entre 0 y 30%, la primera por su alto contenido de azufre y porque debilita físicamente la briqueta y la segunda porque es muy escaso y por el azufre. El resto de las biomasas están entre el 0 y 100%.

Realizar un modelo de regresión multivariable en los biocombustibles solidos densificados que exprese las propiedades mecánicas a la compresión y durabilidad más deseables, en función de la cantidad de cada biomasa que se va a proporcionar en la briqueta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis próximo y elemental

En el análisis próximo se determinan las características físicas de la biomasa in situ. En cambio, el análisis elemental determina la composición química de la biomasa (carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y azufre). Estos análisis fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín como se nota en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis próximo y elemental de las biomasas.

Análisis próximo					
Ensayo	**Maíz**	**Arroz**	**Coco**	**Algodón**	**Ajonjolí**
Volátiles	65,23%	64,67%	57,24%	68,42%	55,43%
Carbono fijo	16,54%	16,82%	25,72%	15,63%	16,88%
Ceniza	7,71%	8,33%	5,10%	5,44%	16,98%
Ceniza base húmeda	8,57%	9,26%	5,67%	6,04%	18,87%

ISBN: 978-987-1676-63-7

Humedad	10,52%	10,18%	13,94%	10,51%	10,71%
Poder calorífico superior (kj/kg)	15876,35	15813,54	16311,77	17902,76	14226,75
Análisis elemental					
C	39,95%	39,27%	39,40%	39,30%	33,67%
H	4,97%	4,91%	4,27%	4,70%	3,81%
N	0,60%	0,59%	0,70%	1%	0,98%
S	0,09%	0,10%	0,12%	0,20%	0,16%
O	54%	55%	56%	55%	61%

3.2. Determinación de la humedad total a base húmeda

En la Tabla 2 se puede observar que el menor porcentaje de humedad fue el de la cascarilla con un 12,09% de arroz, debido a que tiene una superficie muy lisa y remueve la humedad fácilmente. En cambio, la fibra de coco y la cacota de algodón fueron de 15,58 y 14,66%.

Tabla 2. Resultados de la determinación de humedad de las biomasas

	Fibra de coco	Algodón	Tusa de Maiz	Ajonjoli	Cascarilla de Arroz
m1 (g)	41,88	41,89	41,83	41,89	41,86
m2 (g)	91,88	91,88	112,01	91,89	93,30
m3 (g)	84,03	84,48	102,40	85,21	87,01
m4 (g)	45	44,28	45,18	45,06	45,09
m5 (g)	44,94	44,21	45,07	45,01	45,02
m6 (g)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Mar (%)	15,58%	14,66%	13,54%	13,27%	12,09%

3.3. Pruebas y resultados

3.3.1. Resultados de acuerdo al diseño de experimentos

Se utilizó el software Design Expert para obtener la batería de batería de ensayo de acuerdo a lo establecido en la metodología, Tal y como se muestra en la Tabla 3. Tabla de Diseño de experimentos, y resultados. Con sus respectivos resultados de los 3 ensayos:

Tabla 3. Tabla de Diseño de experimentos, y resultados.

Mezcla	Arroz (%)	Ajonjolí (%)	Algodón (%)	Maíz (%)	Coco (%)	Resistencia a la Compresión (kPa)	Caída Libre (%)	Impacto (%)
1	7,50	7,50	11,67	61,67	11,67	392,23	65,13	96,10
2	7,50	22,50	11,67	11,67	46,67	449,50	70,97	32,66
3	7,50	22,50	46,67	11,67	11,67	518,35	76,31	47,36
4	22,50	22,50	11,67	31,67	11,67	687,28	66,18	73,66
5	22,50	7,50	11,67	11,67	46,67	573,89	61,45	33,10
6	15,00	15,00	23,33	23,33	23,33	724,30	63,76	52,73

ISBN: 978-987-1676-63-7

7	7,50	7,50	11,67	11,67	61,67	763,64	72,56	77,93
8	7,50	7,50	61,67	11,67	11,67	838,85	71,66	51,50
9	7,50	7,50	11,67	61,67	11,67	679,18	85,71	80,97
10	22,50	7,50	11,67	46,67	11,67	701,16	82,78	98,73
11	7,50	7,50	11,67	61,67	11,67	813,40	94,11	84,23
12	7,50	7,50	61,67	11,67	11,67	818,02	80,94	89,43
13	22,50	22,50	31,67	11,67	11,67	811,08	84,16	89,76
14	7,50	22,50	11,67	11,67	46,67	561,16	79,17	94,66
15	22,50	7,50	46,67	11,67	11,67	855,05	89,57	39,90
16	7,50	7,50	11,67	11,67	61,67	636,37	86,47	47,49

Para cada prueba, tienen sus respectivas ecuaciones finales, gráficas de contorno y superficies de respuesta. En la prueba de compresión, el modelo de regresión quedo de la siguiente forma:

$$RC = -10340{,}18A - 1117{,}74B + 842{,}88C + 551{,}85D + 749{,}4E + 25977{,}59AB + 15612{,}37AC + 15350{,}05AD + 11968AE - 1464{,}79BC - 2660{,}65BD \quad (4)$$

Donde RC es la resistencia a la compresión, A (BA) es la cascarilla de arroz, B (BAJ) es el ajonjolí, C (BAL) es algodón, D (BM) es tusa de maíz y E (BC) es la fibra de coco.

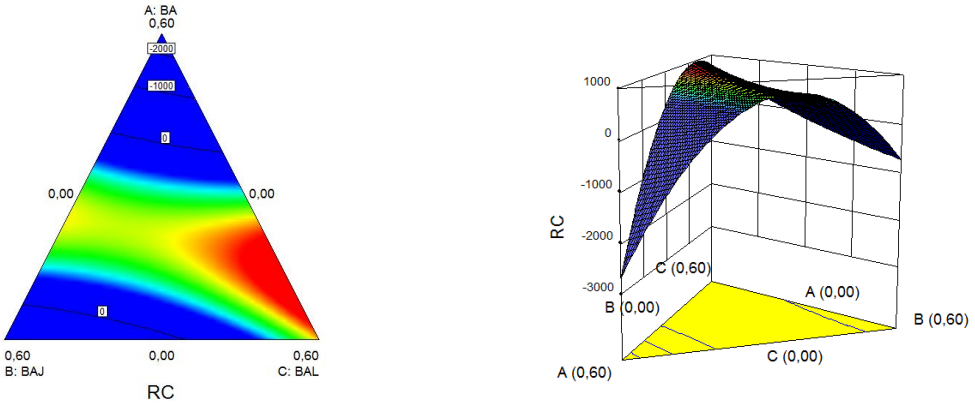


Ilustración 1. Triangulo de contorno y superficie de respuesta de resistencia a la compresión.

En la ilustración 1, se observan el comportamiento de la resistencia a la compresión (eje vertical) con respecto al porcentaje de mezclas (ejes inferiores).

En la prueba de durabilidad por caída libre, así quedó definido el modelo de regresión:

$$D_{CL} = 13{,}58A + 1{,}14B + 0{,}80C + 1{,}41D + 1{,}35E - 17{,}18AB - 15{,}44AC - 17{,}44AD - 21{,}22AE + 0{,}66BC - 4{,}04BD \quad (5)$$

Donde D_{CL} es indice de durabilidad por caida libre, A (BA) es la cascarilla de arroz, B (BAJ) es el ajonjolí, C (BAL) es algodón, D (BM) es tusa de maíz y E (BC) es la fibra de coco.

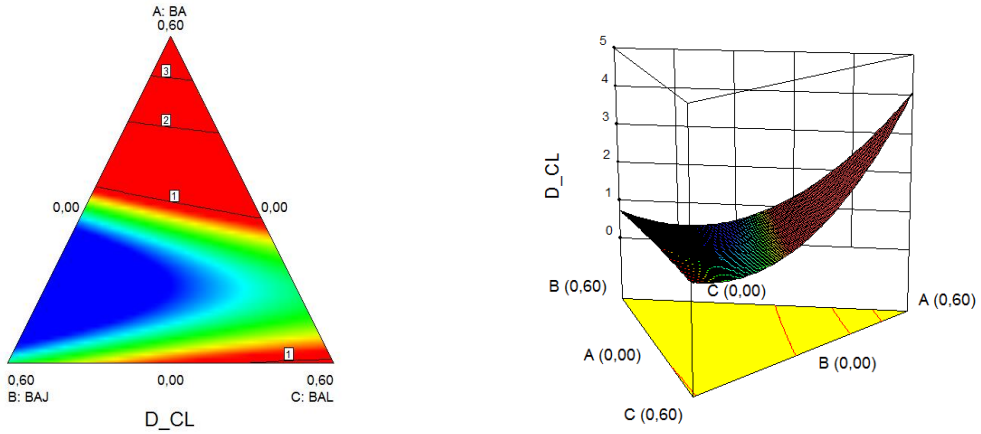


Ilustración 2. Triangulo de contorno del índice de durabilidad por caída libre.

En la ilustracion 2, se observan el comportamiento de la durabilidad por caida libre (eje vertical) con respecto al porcentaje de mezclas (ejes inferiores). En donde presenta mayor valor por toda la zona roja la cascarilla de arroz (BA) y el algodón (BAL) que muestra solo una linea roja.
En la prueba de durabilidad por impacto, el modelo de regresión se obtuvo de esta forma:

$$D_{IM} = 2{,}88A + 1{,}72B + 1{,}34C + 2{,}24D + 0{,}90E + 18{,}26AB - 10{,}03AC - 1{,}05AD - 10{,}30AE - 4{,}14BC - 20{,}71BD \quad (6)$$

En donde D_{IM} es el indice de durabilidad por impacto, A (BA) es la cascarilla de arroz, B (BAJ) es el ajonjolí, C (BAL) es algodón, D (BM) es tusa de maíz y E (BC) es la fibra de coco.

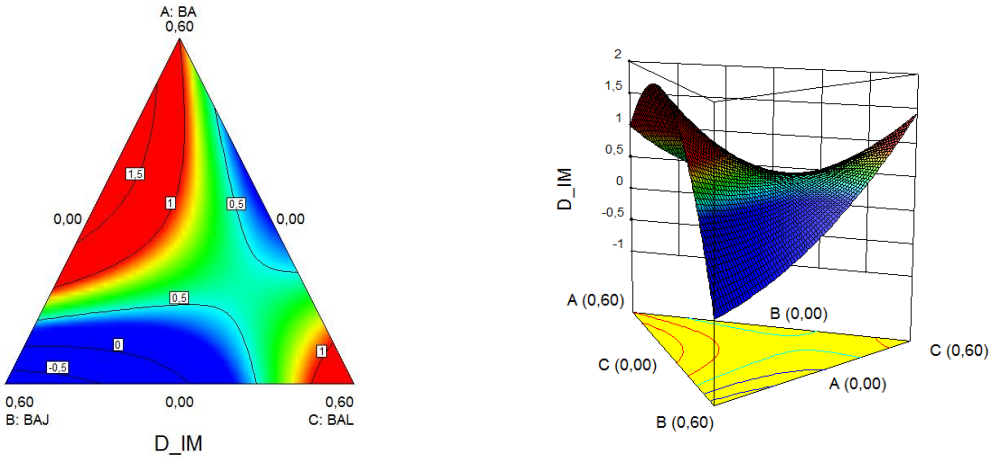


Ilustración 3. Triangulo de contorno y superficie de respuesta del índice de durabilidad por impacto.

En la Ilustración 3 se observan el comportamiento de la durabilidad por impacto (eje vertical) con respecto al porcentaje de mezclas (ejes inferiores). En donde presenta mayor valor por la zona de la Biomasa de la cascarilla de arroz (BA) y el algodón (BAL) que es por la zona roja.

Teniendo en cuenta el contenido equilibrado entre la cascarilla de arroz y el ajonjolí, y mayor contenido de algodón. En donde uno de los resultados más relevantes es la resistencia a la compresión, como se puede observar en la Tabla 4

Tabla 4. Tabla de soluciones de condiciones óptimas deseables.

Numero	BA (%)	BAJ (%)	BAL (%)	BM (%)	BC (%)	RC (kPa)	DCL (%)	DIM (%)	DSB (%)
1	22,5	22,5	31,7	11,7	11,7	811,063	84,2	89,8	81,6
2	22,5	7,5	11,7	46,7	11,7	701,126	82,8	98,7	75,8
3	7,5	7,5	30,7	42,6	11,7	704,591	79,6	80,8	64,9
4	7,5	7,5	11,7	61,7	11,7	628,267	81,7	87,1	63,8
5	7,5	7,5	61,7	11,7	11,7	828,431	76,3	70,5	62,6
6	7,5	7,5	11,7	11,7	61,7	700,002	79,5	62,7	55,1
7	22,5	7,5	46,7	11,7	11,7	854,995	89,6	39,9	45,5
8	22,5	22,5	11,7	11,7	31,7	694,357	66,1	98,3	45,2
9	7,6	22,5	11,7	11,7	46,5	509,402	74,6	63,8	36,3
10	22,5	7,5	11,7	11,7	46,7	573,830	61,5	33,1	0,7

En donde, RC es la resistencia a la compresión, DCL es el indice de durabilidad por caida libre, DIM es el indice de durabilidad por impacto, A (BA) es la cascarilla de arroz, B (BAJ) es el ajonjolí, C (BAL) es algodón, D (BM) es tusa de maíz, E (BC) es la fibra de coco y DSB es deseabilidad.

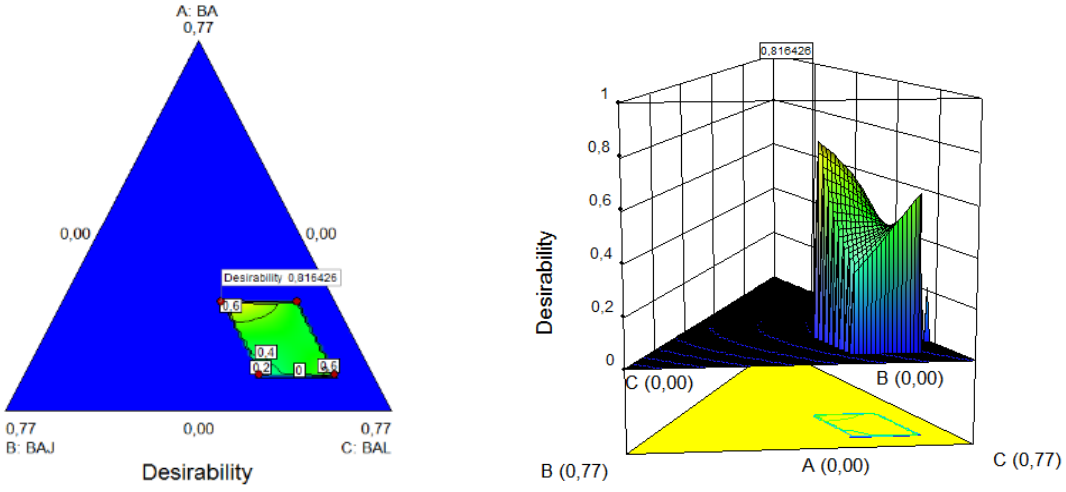


Ilustración 4. Triangulo de contorno y superficie de respuesta de deseabilidad.

En la Ilustración 4 se observa claramente el comportamiento de deseabilidad, en donde el mayor porcentaje es de 0,8164 (81,64%). En donde los ejes inferiores muestran el porcentaje de cada elemento (Donde A es Cascarilla de arroz, B es ajonjolí y C es algodón), el área donde muestra ese porcentaje está cerca del vértice C.

4. CONCLUSIONES

De las 16 mezclas, la que mostró mayor porcentaje de resistencia a la compresión fue la 15 (compuesta por 22,5% de arroz, 7,5% de ajonjolí, 46,67% de algodón, 11,67% de tusa de maíz, 11,67% de coco), con 855,05 kPa. En la durabilidad por caída libre fue la numero 11 (compuesta por 7,5% de arroz, 7,5% de ajonjolí, 11,67% de algodón, 61,67% de tusa de maíz y 11,67% de coco), con un valor de 94,11%. Y en la durabilidad por impacto fue la mezcla número 10 (compuesta por 22,5% de arroz, 7,5% de ajonjolí, 11,67% de algodón, 46,67% de tusa de maíz y 11,67% de coco).

La cascarilla de arroz mejora la durabilidad debido a la lignina que es el aglomerante natural que contiene la biomasa [13], aunque debilita la resistencia a la compresión, la mejoran entre la fibra de coco y la cacota de algodón.

Al momento de remover la humedad en las biomasas, la que más contiene es la fibra de coco, que es la que mayor tiempo lleva en remover. Lo mismo pasa con la cacota de algodón, ambos absorben demasiada agua.

5. REFERENCIAS

[1] W. Arevalo, «La Biomasa: Una Alternativa Energética proveniente de la vida misma,» 2015.

[2] H. Garcia Romero y L. Calderón Etter, «Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia,» 2012.

[3] F. Marcos Martín, «Peléts y briquetas,» *AITIM,* pp. 54-62, Septiembre - Octubre 1995.

[4] L. Garcia Benedicto, F. Marcos Mártin y C. Fernández López, «Bicombustibles sólidos y líquidos forestales».

[5] Todobiomasa.com, «Densificación o compactación de la biomasa,» 30 Enero 2013. [En línea]. Available: http://www.geoscopio.com/est/gmms/todosbiomasa/Densificacion_o_compactacion_de_la_biomasa__20637791.htm.

[6] I. Obernbergher y G. Thek, «Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour,» *Biomass & Bioenergy,* pp. 653-669, 2004.

[7] «Los términos comunes utilizados en La densificación de la biomasa,» Guidewhat.com, 2016. [En línea]. Available: http://guidewhat.com/mejoras-hogarenas/los-terminos-comunes-utilizados-en-la-densificacion-de-la-biomasa.php.

[8] L. Ortiz Torres, «Producción de biocombustibles solidos de alta densidad,» *Boletín de CIDEU 5,* pp. 108-116, 2008.

[9] N. Kaliyan y R. V. Morey, «Factors affecting strength and durability of densified,» *Biomass and bioenergy,* pp. 337-359, 2009.

[10] AENOR, «Determinación del contenido de humedad. Metodo de Referencia,» *UNE-EN 14774,* p. 8, 2010.

[11] AENOR, «Determinación de la durabilidad mecánica de briquetas.,» *UNE-EN 15210-2,* 2011.

[12] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Varsa Salazar, «Análisis y diseño de experimentos,» McGraw Hill, pp. 482-485.

[13] J. Vargas, P. Alvarado, M. Porras y J. Vega-Baudrit , «Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos,» *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS,* p. 87, 2013.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación CIDI, a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería, y al aporte de recursos del convenio 753 de 2013 “DESARROLLO DE INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA DE RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES EN SISTEMAS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS Y AGROINDUSTRIALES MONTERÍA, CÓRDOBA, CARIBE” BPIN No. 2012000100026 (Gobernación de Córdoba-UPB Montería).

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

APORTE PARA LA REGULACIÓN DE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA CONECTADA A RED

Luis A. Sayago [1], **Romina A. Rodríguez** [1,2]

[1] Departamento Académico de Electrónica – Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina
correo-e: lsayago@unse. edu.ar.

[2] Centro de Potencia y Energías Renovables, Instituto de Tecnologías Aplicadas, Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina
correo-e: rrodriguez@unse. edu.ar.

RESUMEN

La diversidad enérgica y el fomento de las energías renovables, posibilitan la consecución de objetivos mundiales referidos a una generación eléctrica sostenible medioambientalmente. La generación fotovoltaica conectada a red constituye una alternativa apta para tal fin, por lo que su implementación debe ser adecuadamente regulada. Entre los modelos regulatorios se encuentra el suministro de energía eléctrica por Balance Neto, contextualizado en un escenario de transición entre la generación centralizada y la generación distribuida. Para ello resulta recomendable tomar la experiencia regulatoria desarrollada por otros países, con el fin de que Argentina redacte una regulación acorde que permita aprovechar todas las ventajas asociadas a este modelo, para lograr una disminución de la dependencia del suministro eléctrico, el alivio de la red principal y una generación sostenible.

Palabras Claves: *Balance Neto, regulación, incentivos.*

1. INTRODUCCIÓN

El importante desarrollo tecnológico logrado en la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables, como el eólico y el solar, ha inducido profundos cambios en la estructura de los sistemas eléctricos que abastecen a los centros urbanos. En efecto, el desarrollo tecnológico referido ha permitido la implementación de centrales de producción de energías eléctricas de baja potencia, confiables y altamente eficientes, haciendo posible su instalación en lugares residenciales, que al ser conectadas a la red normal de suministro eléctrico ha dado lugar a lo que se conoce como generación distribuida. Este esquema de suministro, difiere sustancialmente del tradicional, basado en grandes centrales eléctricas, redes de transporte y de distribución para acercar el fluido eléctrico a los usuarios, articulados por un marco normativo que regula sus relaciones estableciendo derecho y obligaciones para cada una de las partes.

La transición de una estructura centralizada a una descentralizada ha obligado, a los países pioneros en la implementación de la generación distribuida, a introducir modificaciones en las normas preexistentes y a realizar ajustes adaptativos de las mismas para contemplar los intereses de nuevos actores integrados al sistema, al mismo tiempo que promover el uso y difusión de energías renovables.

El presente trabajo se inscribe en el marco del proyecto acreditado en la Universidad Nacional de Santiago del Estero “Sistemas fotovoltaicos conectados a red de energía eléctrica en áreas urbanas”, código 23/C114, y tiene como propósito realizar aportes para la formulación de una ley que regule la operación de pequeñas centrales eléctricas de naturaleza solar-fotovoltaica conectadas a red. En este sentido se han analizado las regulaciones existentes en el ámbito internacional, particularmente las de Alemania y las del estado de California, considerados como dos modelos regulatorios exitosos.

De los diversos aspectos que comprende la problemática de la generación fotovoltaica y su conexión a red, se aborda en este trabajo los referidos a la cuestión de los incentivos y el de la titularidad del generador, por entender que se trata de aspectos sensibles y que un tratamiento adecuado de los mismos en la norma regulatoria puede brindarle a esta flexibilidad y claridad, facilitando la promoción del uso de esta energía renovable.

2 Desarrollo

La manera que han encontrado muchos países para promover el uso de pequeños generadores basados en energías renovables y conectados a red, es aplicando la modalidad conocida como autoconsumo con Balance Neto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El concepto de autoconsumo por balance neto consta de dos términos con significados propios:

.- Autoconsumo: producción individual de electricidad para el propio consumo.

.- Balance Neto: consumo diferido de energía eléctrica aportado por la red eléctrica pública para compensar el excedente de energía producido en una situación en que el autoconsumo instantáneo es menor que la energía generada.

Además, atendiendo a la diferencia en el tratamiento de los excedentes de energía, existen dos tipos de balance neto: el puro (denominado simplemente “balance neto”) y el mixto. El primero funciona sin que se pague directamente al productor- consumidor por la energía vertida, sino a través de otro tipo de compensaciones; en el segundo se remunera la energía excedentaria vertida a la red.

Por otro lado, se distingue entre balance neto individual (en cada vivienda) o compartido, tales como complejos habitacionales. El balance neto individualizado se aplica al consumidor que dispone de una instalación individual de generación. El balance neto compartido se basa en la construcción de instalaciones compartidas, en cubiertas o sobre suelo, próximas a los centros de consumo, para que entre ellas y los consumidores se aplique el mismo funcionamiento que el balance neto individualizado. Esto permitiría, por ejemplo, el acceso a este sistema a consumidores de edificios a través de una sola instalación.

Vinculado a esta cuestión, aparece como un aspecto importante el de la titularidad, que pertenece al propietario de la instalación y que está asociado normalmente al propietario de la vivienda, enfoque que excluye la posibilidad del balance neto compartido. Así mismo, debe existir coherencia entre la potencia límite autorizada y la titularidad, no pudiendo ser la misma para el caso de un generador individual que para uno compartido.

En este sentido parece claro que la regulación debiera contemplar valores máximos de potencia instalada a ser autorizados, teniendo en cuenta si la titularidad es individual o compartida, y evite que el productor – consumidor eventual, se convierta en un productor comercial de energía compitiendo con las empresas generadoras. La idea central es que las instalaciones de generación de pequeña escala sean destinadas básicamente para el autoconsumo (instantáneo y diferido), utilizando la red de distribución como un respaldo para compatibilizar las curvas de generación y demanda. Un criterio razonable a seguir podría ser que la potencia máxima autorizada sea menor o igual que la consumida normalmente del sistema público, en la intención que al final del período de compensación queden saldos sin compensar o estos sean pequeños. En este último caso la norma debiera contemplar el tratamiento que se dará a los referidos saldos. Constituye este, junto con el valor de la tarifa, aspectos muy discutidos en los sistemas de generación distribuida.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En Europa, el modelo para impulsar las energías renovables está basado en un mecanismo de incentivos, que trata de promover la introducción de este tipo de energía a la red eléctrica mediante una tarifa de suministro o "Feed in tariff" (FIT). Más del 60% de los países del continente han apostado por este sistema, entre ellos Dinamarca, Francia, Alemania, Grecia, Italia, Holanda, Portugal, España, Suecia y Suiza. Este modelo tiene como principal característica la fijación de un mínimo de precios para cada tecnología. Los generadores de energía mediante fuentes renovables reciben una tarifa garantizada por un periodo de tiempo determinado, lo que aumenta el atractivo al disminuir los riesgos de la inversión. Alemania, por ejemplo, país pionero en la promoción de energías alternativas, ha elegido el sistema de balance neto mixto para regular el autoconsumo, pagando al productor una determinada tarifa tanto por la energía auto consumida como por la inyectada a la red. Para la electricidad inyectada a la red existe una tarifa "Feed in Tariff". Acogiéndose a este sistema, los productores tienen incentivos garantizados durante un periodo de veinte años.

En cuanto a la electricidad auto consumida, también existe un incentivo para ella – menor que la que la tarifa "Feed in tarif" de energía exportada-, que unido al ahorro que supone el propio hecho de no comprar la electricidad, hace que este modelo sea rentable. Además, para lograr que hubiera un mínimo de autoconsumo instantáneo se primaba más si el autoconsumo era mayor del 30% de lo generado. A partir del 2012, se elimina la tarifa que se recibía por la energía auto consumida, manteniéndose solo la tarifa por la energía vertida a la red. Actualmente, la forma de fomentar el autoconsumo es penalizando sin tarifa el 10 % de la energía vertida a la red para instalaciones FV > 10 Kw. Para instalaciones FV < 10 Kw, se mantiene la tarifa para el 100% de la energía vertida a la red.

La ventaja del sistema de tarifas es que otorga seguridad al productor- consumidor al no depender de contratos por derechos de energía diferidos con el operador del sistema eléctrico, evitándose la negociación de la energía eléctrica excedentaria.

El modelo de regulación alemán posibilita además la conexión a una misma instalación por parte de varios usuarios, esta conexión no puede ser virtual como el caso del modelo californiano, sino que han de ser conexiones directas, pudiendo hacer frente a esta modalidad el propietario de la cuenta de Balance Neto o un tercero que no sea propietario de la instalación, pero se quiera beneficiar de sus privilegios.

Desde 2004, Alemania ha obtenido un gran crecimiento en cuanto a capacidad instalada de energía fotovoltaica, gracias a estos criterios establecidos en un plan llamado "Acción para las Fuentes de Energía Renovables", y ostenta el primer puesto mundial con 24.678MW instalados a

ISBN: 978-987-1676-63-7

finales de 2011, con un crecimiento que ha sido relativamente constante, frente a comportamientos más irregulares de otros países de la UE como España

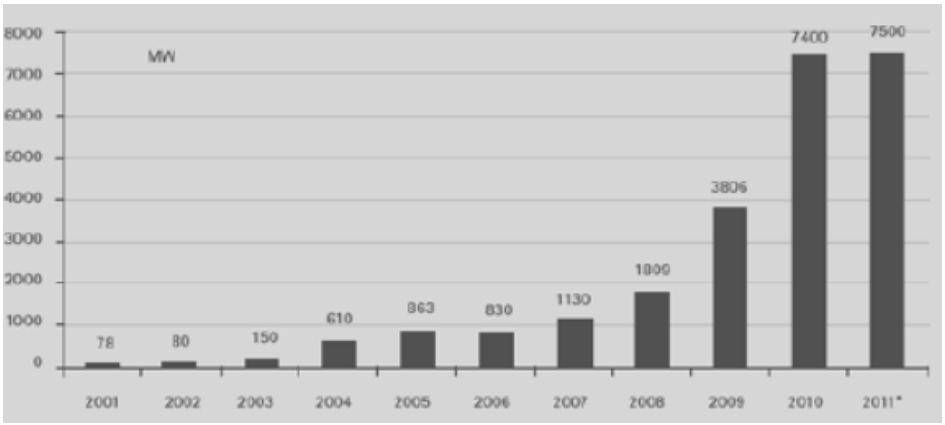


Figura 1: Potencia instalada de energía fotovoltaica en Alemania. Fuente: IEA

A diferencia del modelo alemán, el español se basa en un modelo de Balance Neto puro, sin contraprestación económica por los excedentes de energía vertidos a la red, creando los llamados derechos diferidos, que son compensados con la importación de energía eléctrica desde la red, estableciendo un período de 12 meses para compensar los derechos diferidos. Derechos estos que, en el supuesto que no fueran cubiertos, el productor-consumidor los pierde y pasan a disposición de la empresa de distribución. En España el Balance Neto es un aspecto que no está regulado y el análisis se basa en sendos borradores de los años 2012 y 2013.En Febrero de 2012 se presentó el primer borrador sobre Balance Neto que contenía, de forma resumida, las siguientes medidas:

.- Se regulaba el balance neto**.** El productor podía vender el excedente y descontarlo del consumo habitual.

.- El productor de balance neto pagaba los peajes de acceso de la energía consumida**.**

.- El productor disponía de 12 meses para compensar la energía**,** después se perdía.

.- El precio de compra del kWh producido estaba fijado por la compañía eléctrica y no está regulado.

El segundo borrador del RD de autoconsumo enviado a la CNE en Julio de 2013, cambia sustancialmente las reglas del juego favoreciendo ampliamente a las compañías eléctricas y provocando críticas y resistencia del sector fotovoltaico. Los puntos remarcables son los siguientes:

ISBN: 978-987-1676-63-7

.- Regula el autoconsumo, instantáneo y excesos vertidos a la red, pero no habla en ningún momento de balance neto**.**

.- La energía consumida de la red pagará, como siempre, los peajes y el coste de energía.

.- La energía auto consumida no vertida a red pagará el llamado "peaje de respaldo"**.**

.- La energía autogenerada no consumida y no vendida **se** regala a la red eléctrica y también deberá pagarse el "peaje de respaldo" por ella**.**

.- La energía autogenerada y vendida pagará el peaje de generación establecido por la compañía eléctrica.

Se establecen sanciones de hasta 30 millones de euro**s** para los que incumplan estas normativas.

El modelo español tampoco permite la pluralidad de propietarios a la hora de contratar el autoconsumo con Balance Neto.

El modelo norteamericano de incentivos a las energías renovables es distinto al europeo. La fórmula usada depende en gran medida de cada Estado, pero en general consiste en una subvención a la inversión a través de exenciones tributarias, pero sin una tarifa en el tiempo como ocurre en gran parte de Europa. El tanto por ciento de energía consumida que debe ser de origen renovable depende de la normativa de cada Estado.

En California, donde más de un tercio de la potencia fotovoltaica instalada esta acogida al régimen de autoconsumo y considerado como uno de los estados más exitosos en la promoción de energías renovables, se emplea el net-metering, que se define como un acuerdo entre la empresa distribuidora y el productor-consumidor, mediante el que se otorgan créditos a este último por el exceso de energía generada y vertida a la red. El consumidor paga solo la electricidad neta, además de gastos de distribución y otros servicios. El período de regularización es de 12 meses.

El modelo de Net Metering, implantado en California es un sistema de mixto. Esta característica lo convierte en más atrayente para los usuarios, ya que no solo podrán inyectar la energía generada en exceso a la red principal y demandarla en el instante que la precisen, sino que existirá la posibilidad de remuneración monetaria por los saldos vertidos a la red en exceso y no agotando en la plazo limitado de 12 meses. Los estándares en cuanto a los incentivos fueron fijados 11 de octubre de 2009, por el gobernador A. Schwarzenegger con la entrada en vigor de la Ley AB 920, que instaura el mecanismo por parte de los servicios públicos de California para compensar aquella energía eléctrica diferida a la red principal y no agotada durante el plazo máximo de 12 meses. Para darle mayor amplitud al modelo, en este estado coexisten tres tipos de contratos net-metering:

ISBN: 978-987-1676-63-7

.- Net Energy Metering: El contrato contempla que la compañía tiene que compensar económicamente al productor-consumidor, si se produce más energía que la que se consume.

.- Virtual Net Metering: Se permite que la electricidad generada por una única instalación solar genere créditos de energía diferida para varios residentes de un mismo complejo residencial, sin necesidad que el sistema de medición esté físicamente conectado a cada uno de los medidores de los consumidores.

.- Renewable Energy Self - Generation: Se permite la transferencia de los créditos obtenidos por el autoconsumo de una estación propia, a otra del mismo titular.

En el supuesto que el cliente-generador, no estime ninguno de estas modalidades de retribución por la energía excedentaria, los créditos de energía eléctrica pasaran a ser donados a los servicios público, sin recibir compensación economía alguna. La figura del cliente-generador, para la modalidad de suministro de energía a través de Net Metering, está exenta del pago de tasa o impuestos adicionales, por la energía que se vierte o la red, como por la que se consume de ella. No obstante, se establece una especie de tributo para financiar la investigación por parte del gobierno estatal en materia de desarrollo de nueva tecnologías sostenibles y actividades de eficiencia energética.

El modelo se regula por el programa Federal de Energy Polity Act, instaurado en 2005.y la experiencia del sistema californiano propicia que existan diversas modalidades de clientes-generadores desde los residenciales, los comerciales, los industriales, los agropecuarios, las instituciones públicas (colegios o universidades), las cuales generan el 36% de la energía producida por Net Metering. (SUNEDISON 2011)

Nuestro país se encuentra en los umbrales del proceso de inserción de la generación distribuida en la matriz energética. Este proceso requiere entre otras cuestiones, de un marco normativo que promueva su uso garantizando transparencia entre los actores del sistema y niveles de incentivos que estimulen la inversión y sean compatibles con el sistema eléctrico preexistente como lo verifica la experiencia internacional. Las características de los incentivos que se propongan deben considerar el impacto que tiene la autoproducción de energía en los costos fijos de la red de distribución y en la recaudación de impuestos, y la decisión de promover su uso. Debe destacarse que en Argentina, los precios pagados por los consumidores de energía eléctrica se encuentran fuertemente subsidiados, y varían sustancialmente según la provincia que se considere, conforme su existencia y su valor. Detalle este que aporta dificultades a la hora de determinar cuantitativa y cualitativamente el tipo de los incentivos, ya que el valor de los mismos debiera ser importante para que el usuario aprecie beneficio económico frente al uso de la energía convencional.

ISBN: 978-987-1676-63-7

De los modelos de autoconsumo con Balance Neto considerados, surgen elementos conceptuales y operativos que pueden ser tenidos en cuenta al momento de la formulación de un marco regulatorio, para dotarlo de flexibilidad, versatilidad y transparencia. Se pueden referir los siguientes:

.- El marco normativo debe expresar una clara orientación sobre hacia qué tipo de instalaciones se encamina el balance neto (individual, colectiva, comercial, industrial).

.- Dejar establecido en la ley el criterio a seguir para determinar el valor de la energía cedida a la empresa distribuidora y el destino de los saldos no compensados con el consumo de energía diferida, dejando a la autoridad de aplicación la implementación de los aspectos instrumentales.

.- A los efectos de evitar negociaciones entre el productor – generador y la empresa distribuidora es conveniente que el balance neto se implemente según el modelo alemán, con valores de tarifa que garanticen la promoción del uso de la energía FV y sea compatible con las posibilidades del resto del sistema eléctrico.

.- Para dar mayor flexibilidad al marco regulatorio, debiera considerarse incluir en los mismos la posibilidad de que un mismo generador genere créditos para otros consumidores de un mismo complejo, siguiendo el ejemplo alemán o el californiano.

.- Esta alternativa habilita la posibilidad de instalaciones FV en complejos comerciales o residenciales y brinda una opción al titular de un generador de direccionar los saldos no compensados, pudiendo en última instancia destinarlos a edificios públicos

3. CONCLUSIONES

La aparición de la generación distribuida ha traído como consecuencia la aparición de nuevos actores en el sistema eléctrico caracterizado por la generación centralizada e impone el desafío de marcos regulatorios que contemplen sus intereses. Surge así la necesidad de establecer reglas claras que articule lo viejo con lo nuevo y lo complemente. La versatilidad, flexibilidad y transparencia de la que pueda estar dotado el modelo que se adopte aparece como un requisito indispensable para el éxito de la integración, y en este sentido el tratamiento del autoconsumo con balance neto y la cuestión de la titularidad juegan un rol central.

4. REFERENCIAS

[1] California Energy commission (2013): Renewables porfolio standardeligibility. http://www.energy.ca.gov/2013publications/C EC-300-2013-005/CEC-300-2013-005-ED7- CMF.pdf]

[2] Análisis del borrador del proyecto del Real Decreto elevado a la CNE por el que se establecen la regulación de las condiciones administrativas, técnicas y económicas de la modalidad de

suministro de energía eléctrica con Balance Neto. Rubén De Arriba Rodríguez. Universidad de Salamanca 2013.

[4] Resolución Normativa N°482/2012. Agencia Nacional de Energía Eléctrica de Brasil http://www.aneel.gov.br/cdoc/bren2012482.pdf

[5] Ley N°7824 de la Provincia de Salta http://www.boletinoficialsalta.gov.ar/VersionImprimibleLeyes.php?nro_ley2=7824

[6] Proyecto de Ley de los Senadores Gabriela Michetti y Diego Santilli http://www.senado.gov.ar/senadores/senador/4 31/proyectos?page=1

[7] Proyecto de Ley Diputado nacional Julio Cobos http://www1.hcdn.gov.ar/proyxml/expediente.asp?fundamentos=si&numexp=9181-D-2014

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INTERACCIÓN ENTRE AEROGENERADORES Y VIENTOS DE CAPA LÍMITE: ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

Adrián R. Wittwer [1], Acir M. Loredo-Souza [2], Rodrigo Dorado [2], Gervásio Annes Degrazia [3] Gisela Alvarez y Alvarez [1], Julián Medina [1], Franco Milich [1]

[1] Laboratorio de Aerodinámica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina
correo-e: a_wittwer@yahoo.es
[2] Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal de Rio Grande do Sul.
[3] Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

RESUMEN

La extracción de energía eólica utilizada para generar electricidad, se realiza empleando aerogeneradores dispuestos en parques eólicos. Desde la perspectiva de la aerodinámica de las palas, los aerogeneradores han sido bastante estudiados pero la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite atmosférica todavía no está totalmente analizada. La interacción entre el viento incidente y los aerogeneradores en un parque eólico provoca déficit de velocidad y aumento en los niveles de turbulencia en la estela de las turbinas eólicas.

En este trabajo, se describen las condiciones requeridas para la realización de experimentos en el túnel de viento con el fin de evaluar de parámetros característicos del flujo en parques eólicos considerando la influencia del tipo de terreno, de los aerogeneradores y su interacción con el viento incidente. Como hipótesis general se plantea que, a partir del análisis dimensional y los criterios de semejanza, es posible modelar los vientos de capa límite atmosférica, la influencia de la topografía local y las condiciones aerodinámicas de la turbina en movimiento. Se presentan los resultados de mediciones en la estela del modelo a escala 1:450 de un aerogenerador Unipower de 3 palas, de 100 m de altura de la torre, realizadas en el túnel de viento “Jacek Gorecki” de la UNNE.

La técnica de evaluación espectral de la turbulencia es aplicada a varias mediciones de las fluctuaciones de velocidad. Esto permite analizar la configuración espectral en diferentes rangos de frecuencia y las diferencias del comportamiento del viento incidente con relación al escurrimiento en la estela de la turbina. Finalmente, el estudio permite establecer conclusiones respecto a los parámetros usados para reproducir adecuadamente la interacción fluido-estructura, como así también, verificar la importancia de considerar los efectos topográficos en este tipo de ensayos.

Palabras Claves: *Turbinas eólicas, túnel de viento, turbulencia.*

1. INTRODUCCIÓN

La energía eólica es un recurso renovable, limpio, de gran potencial que permite reducir las emisiones de gases contaminantes al reemplazar el uso de combustibles fósiles, utilizando la fuerza del viento para generar electricidad y empleando para ello aerogeneradores. En un generador aislado, la energía cinética extraída es la diferencia entre la energía cinética a barlovento y a sotavento del equipo, motivo por el cual resulta importante el estudio de la interacción entre la propia estructura de los mismos y la capa límite turbulenta de la atmosfera. Para optimizar la extracción de energía de acuerdo al potencial disponible es necesario un estudio exhaustivo de los fenómenos turbulentos asociados a este proceso.

En un parque eólico el escurrimiento turbulento es caracterizado por la múltiple superposición de estelas que provocan pérdidas de potencial; por lo cual la disposición de los aerogeneradores deberá ser tal que la estela de una turbina perturbe lo menos posible a otra que se encuentre a sotavento. Algunos trabajos muestran que aerogeneradores operando dentro de un parque pueden tener una pérdida en la potencia generada de hasta el 40%, si se compara con la turbina operando de manera aislada [1,2]. Para poder realizar el estudio de las características de la turbulencia se requiere del análisis de la superposición de estelas, los efectos de la capa límite y la topografía local bajo condiciones controladas. Este tipo de análisis puede ser realizado en un túnel de viento de capa límite utilizando modelos a escala reducida.

El trabajo está orientado al diseño y la realización de experimentos en el túnel de viento empleando modelos a escala reducida para la evaluación de parámetros característicos del flujo medio y de la turbulencia en la proximidad de aerogeneradores y su interacción con el flujo de capa limite incidente. Como hipótesis general se plantea que, a partir del análisis dimensional y las leyes de semejanza, es posible modelar los vientos de capa límite atmosférica, y las condiciones aerodinámicas de la turbina en movimiento. Se presentan los resultados preliminares obtenidos de un estudio experimental que incluye perfiles de velocidad media, intensidad de turbulencia y de las características espectrales de la turbulencia obtenidos en la estela de una turbina empleando un modelo en escala 1/450 de un aerogenerador UNIPOWER de 3 aspas.

2. CRITERIOS DE SEMEJANZA

Para lograr el modelado exacto del comportamiento del aerogenerador en el túnel de viento, se requiere semejanza geométrica, cinemática y dinámica. En general, para lograr un modelado confiable del fenómeno se requiere, en primer lugar, simular adecuadamente las características de

ISBN: 978-987-1676-63-7

la capa límite atmosférica. Luego, se debe modelar el comportamiento de la turbina para lo que es necesario considerar criterios de semejanza que vinculan al aerogenerador con el viento incidente.

Simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento consiste en desarrollar un modelo físico del flujo turbulento atmosférico de manera tal que los parámetros que lo caracterizan se reproduzcan dentro del túnel. La simulación aproximada del flujo, es representativa del viento natural para condiciones atmosféricas neutralmente estable y levemente inestable. Existen diferentes métodos que permiten reproducir las propiedades de la turbulencia representativas de la atmósfera real.

En este trabajo se emplea el método de Counihan [3] que emplea generadores de vorticidad en combinación con una barrera y elementos de rugosidad. La Figura 1 muestra los dispositivos de simulación de la capa límite atmosférica de estabilidad neutra en la sección de ensayos del túnel de viento. Las características del viento simulado corresponden a un perfil de la ley potencial con un exponente α= 0.27 y altura gradiente zg = 1.20 m.

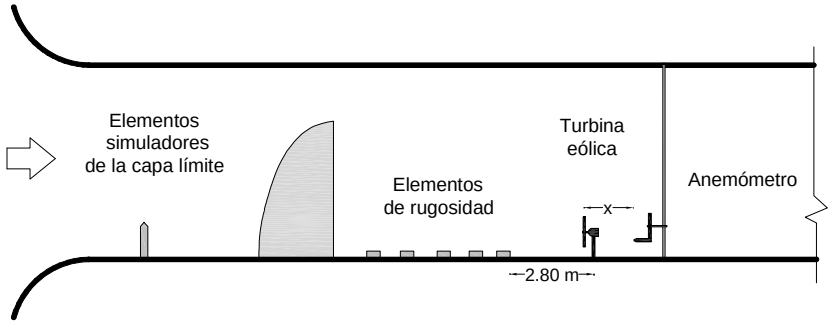


Figura 1: Disposición de los simuladores de la capa límite atmosférica y del modelo de la turbina.

Para el modelado exacto de los aerogeneradores, además de la semejanza geométrica, se requiere la igualdad en el modelo y prototipo de una serie de parámetros adimensionales que incluyen la relación de velocidades en el extremo de la pala (tip speed ratio), el número de Reynolds de la turbina, el coeficiente de empuje y el coeficiente de potencia, que garantizan la semejanza cinemática y dinámica [4]. En este trabajo no se desarrolló un modelo con semejanza completa, pero se tiene en cuenta la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala y la velocidad de corriente libre,

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \tag{1}$$

y el número de Reynolds de la turbina,

$$\mathrm{Re} = \frac{UD}{\upsilon} \tag{2}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

donde Ω es a velocidad angular del rotor, U la velocidad de la corriente libre, υ es la viscosidad cinemática del aire, R y D son el radio y el diámetro del rotor.

En este trabajo se empleó un modelo de turbina eólica de 0,33 m de altura total y con un rotor de 0,22 m de diámetro correspondiente a un aerogenerador UNIPOWER de tres palas montado en una torre de 100 m de altura y con un rotor de 100 m de diámetro (Figura 1). La escala geométrica empleada fue de 1/450 y el número de Reynolds, Re, de los ensayos fue de 1.63×10^5. La velocidad de rotación de la turbina se mantuvo aproximadamente constante durante las mediciones y resulta importante aclarar que, como en estudios similares [5] no se puede garantizar la semejanza dinámica del fenómeno en el modelo reducido.

3. EQUIPAMIENTO Y MEDICIONES REALIZADAS

Las mediciones fueron realizadas en el túnel de viento de capa límite “Jacek Gorecki” de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, que es de circuito abierto, posee una longitud total de 39.65 m y la cámara de ensayos tiene 2.4 m de ancho × 1.8 m de alto × 22.8 m de largo (Figura 2). Posee dos mesas de ensayos giratorias de 1.2 m de diámetro, una al inicio de la cámara de ensayos y la otra al final. El accionamiento es producido por un ventilador axial de 2.25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW. La velocidad máxima en vacío dentro de la cámara de ensayos es de 25 m/s.



Figura 2: Túnel de viento Jacek Gorecki

Con el objeto de caracterizar el flujo turbulento antes y después de la turbina se midieron velocidades fluctuantes del viento empleando un anemómetro de hilo caliente montado en un sistema de posicionamiento remoto (Figura 3). Las series numéricas representativas de la velocidad fueron obtenidas con una frecuencia de muestreo de 1024 Hz durante 128 segundos. Antes de la adquisición de las series, un filtro electrónico pasa-bajos fue ajustado a 0.1 y 0.3 kHz. Las mediciones fueron realizadas para caracterizar el viento incidente, y después, en la estela del aerogenerador.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos descriptos en la sección anterior. Las principales características de los puntos de medición (altura z, velocidad media U, desviación estándar de la fluctuaciones de velocidad σ_u) en los que fue realizado el análisis espectral son indicadas en la Tabla 1. También se indica la frecuencia de ajuste del filtro pasa-bajos (FPB). En primer lugar, se muestran los perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia y, luego, se presentan los espectros correspondientes a la componente longitudinal de las fluctuaciones de velocidad. Los perfiles se obtuvieron considerando 15 puntos de medición distribuidos entre z = 10 mm y z = 640 mm, mientras que para el análisis espectral se consideraron solo 7 puntos para viento incidente y 7 puntos para el caso de viento en la estela en la posición x = 225 mm.

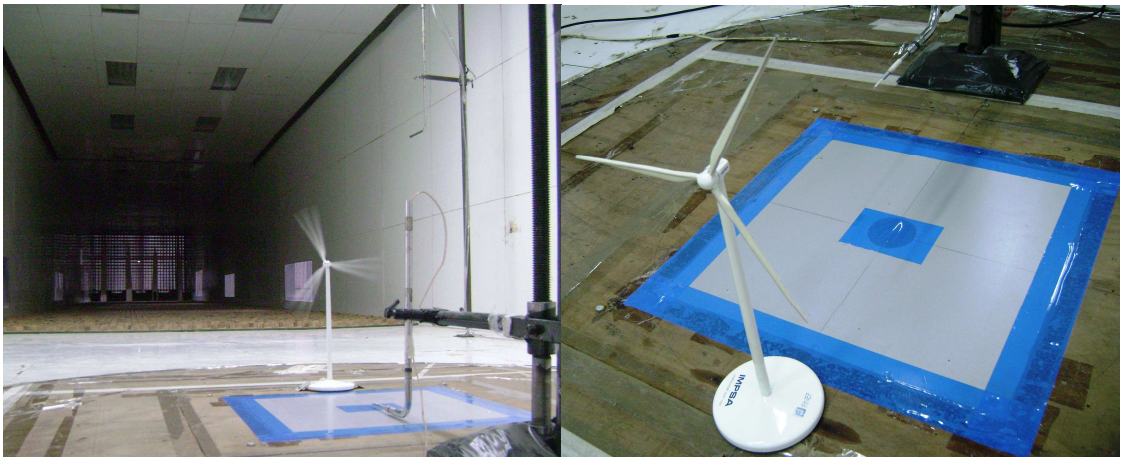


Figura 3: Turbina siendo ensayada en el túnel de viento

Tabla 1. Parámetros característicos de las mediciones.

Viento incidente				Viento en la estela (x=225 mm)			
z [mm]	U [m/s]	σu [(m/s)]	FPB [Hz]	z [mm]	U [m/s]	σu [(m/s)]	FPB [Hz]
10	8.29	1.30	300	10	8.27	1.71	100
120	9.03	1.24	300	120	7.95	1.33	100
170	9.31	1.25	300	170	8.11	1.36	300
225	9.77	1.22	300	225	8.75	1.43	100/300
280	10.16	1.25	300	280	9.45	1.42	300
330	10.52	1.15	300	330	10.15	1.33	100
430	10.86	1.04	300	430	10.85	1.15	100

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1. Perfiles verticales de velocidad media e intensidad de turbulencia

En la Figura 4 se indican los perfiles verticales de velocidad media adimensional U/U_{ref} y de intensidad de turbulencia normalizada u_{rms}/U_{ref} para el viento incidente y en la estela generada por el aerogenerador. Se incluyen los perfiles medidos en dos posiciones a sotavento del plano determinado por las palas del rotor que corresponden a x = 225 mm y 1185 mm, y el perfil correspondiente al viento incidente cuyas características se aproximan al de la ley potencial con exponente 0.19. La altura de referencia es z_{ref} = 540 mm y fue definida en forma arbitraria, de forma tal que las variaciones de velocidad que se producen en la estela deben considerarse en relación a este parámetro de referencia. Los perfiles de velocidad media indican mayores disminuciones de velocidad media en la región que corresponde a la mitad inferior del rotor y, como se podía suponer, en la posición a sotavento más próxima al modelo (x = 225 mm). Para la otra posición (x = 1185 mm) es posible observar la tendencia a la reconstrucción del perfil original.

Con respecto a la distribución vertical de la intensidad de turbulencia, para el viento incidente se verifican valores aproximadamente constantes en la parte inferior de la capa límite simulada, hasta z ≈ 300 mm, lo cual es acorde con valores experimentales para flujos de capa límite de este tipo. Los incrementos más visibles de u_{rms}/U_{ref} se verifican para el perfil ubicado en la posición más próxima al modelo (x = 225 mm), específicamente en los puntos de medición ubicados en la parte inferior y sobre el eje del rotor. En la ubicación más sotavento (x = 1185 mm) se observan valores aproximadamente constantes que indican una difusión vertical de las fluctuaciones que se producen en las proximidades del modelo. Al igual que en los perfiles de velocidad, la intensidad de turbulencia fue normalizada con la velocidad media en la altura z_{ref} = 540 mm, parámetro que debe ser considerado al analizar las variaciones de los valores fluctuantes entre los perfiles.

3.2. Evaluación de la resolución de los espectros de turbulencia

La función de densidad auto-espectral o espectro de potencia representa la variación en función de la frecuencia, del valor cuadrático medio de la fluctuación de velocidad en función del tiempo u(t), proporcionada por una serie numérica continua adquirida con un intervalo de tiempo t, y queda expresada por:

$$S_u(f) = \frac{1}{B_e T}\int_0^T u^2(f, B_e, t)dt \qquad (3)$$

donde B_e es el ancho de banda (resolución del espectro), y T un tiempo de integración adecuado en función de las escalas de turbulencia. La integral de esta función permite obtener la varianza de la fluctuación de velocidad σ_u^2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para analizar los espectros en términos de su resolución en función de las frecuencias, son evaluados los espectros con relación al número de bloques, cantidad de valores por bloque y efecto de promediado, apenas en una posición (z = 170 mm). En la Figura 5, en base a una misma medición fueron obtenidos tres espectros en esta posición para el viento incidente, que aparecen superpuestos. El espectro identificado como “z = 170 mm – baja” está orientado a describir las bajas frecuencias, fue obtenido utilizando 8 bloques de 16384 valores y presenta menor efecto de promediado. El segundo, “z = 170 mm – media” obtenido a partir de 32 bloques de 4096 valores, permite describir las frecuencias intermedias y altas. Finalmente, utilizando 256 bloques de 512 valores, fue obtenido el espectro “z = 170 mm – alta”, descriptivo de las altas frecuencias. De forma semejante fueron obtenidos los espectros correspondientes a la misma posición vertical (z = 170 mm) para el escurrimiento en la estela (x = 225 mm) presentados en la misma Figura 5 que son descriptivos de las frecuencias bajas, intermedias y altas, respectivamente.

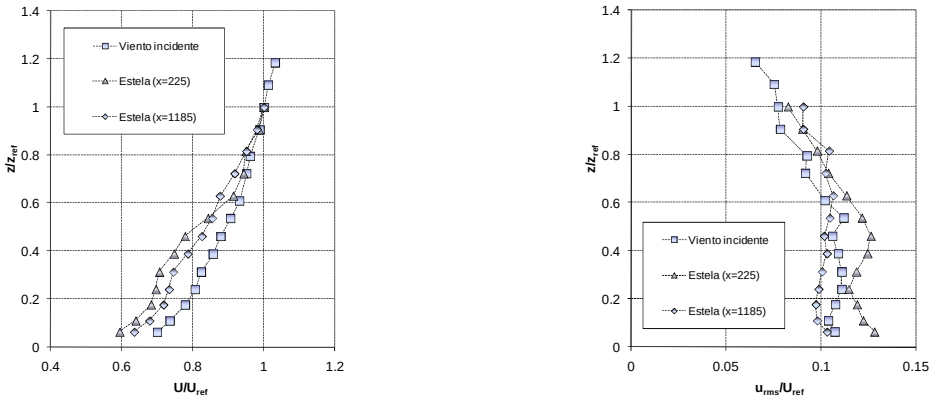


Figura 4: Perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia.

Esta evaluación se realiza para tener una impresión general del comportamiento espectral en todo el rango de frecuencias. Aumentando el número de bloques, disminuye la resolución en las bajas frecuencias, pero la media de los bloques permite visualizar mejor lo que ocurre en las frecuencias intermedias y altas. En particular, para las mediciones realizadas, permite determinar que la configuración de los espectros en las bajas frecuencias para el viento en la estela no presenta alteraciones significativas e, por lo tanto, el análisis comparativo será realizado solamente por los espectros descriptivos de las medias y altas frecuencias.

3.3. Evaluación de la configuración espectral y del efecto de filtrado

En la Figura 6, a la izquierda, se presentan los espectros para el viento incidente en 5 posiciones verticales, indicándose en forma complementaria la pendiente -5/3 que define la región inercial.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En todos los casos la resolución espectral es definida a partir de una serie de 131072 valores dividida en 32 bloques de 4096. La señal analógica es filtrada mediante un pasa bajos a 300 Hz. Es posible verificar una gran similitud entre los espectros correspondientes a las posiciones z = 120, 225, 330 y 430 mm. Las pequeñas diferencias que se producen en el espectro restante (z = 10 mm) muy posiblemente se deben a la proximidad de piso que genera efectos localizados.

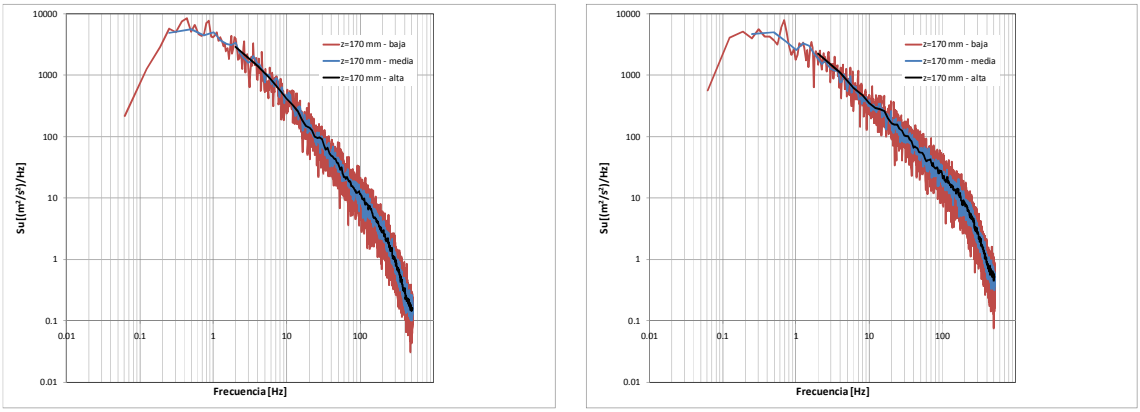


Figura 5: Espectro de viento incidente (z = 170 mm) y en la estela (z = 170 mm, x = 225 mm).

De igual forma, en la Figura 6, a la derecha, se presentan los espectros Su para el viento en la estela (x = 225 mm) en las mismas posiciones verticales, indicándose también la pendiente -5/3. La resolución espectral es definida de la misma manera, pero en este caso la señal analógica es filtrada a 100 Hz. Es posible verificar mayores diferencias entre los espectros que en el caso anterior, e inclusive para las frecuencias medias y altas establecer comportamientos diferentes en las posiciones inferiores a z = 225 mm y las dos posiciones superiores.

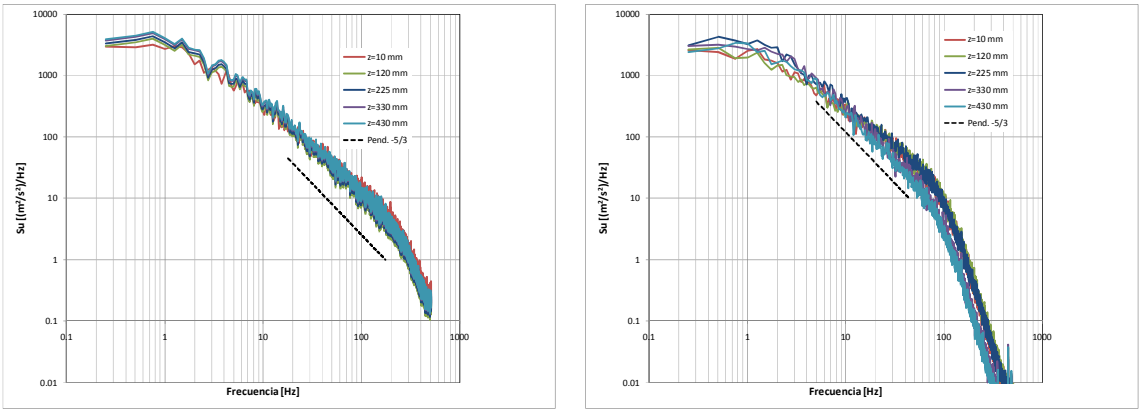


Figura 6: Espectro de viento incidente con filtrado a 300 Hz y en la estela con filtrado a 100 Hz.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los efectos del filtrado analógico de la señal anemométrica en distintas frecuencias en cada situación se pueden percibir claramente. Asimismo, los efectos del modelo del aerogenerador generan modificaciones de la configuración espectral que varían de acuerdo a la posición vertical analizada. Para evaluar estos efectos, a continuación se realiza un análisis comparativo de los espectros de viento incidente y de los obtenidos en la estela del modelo.

3.4. Comparación de las características espectrales del viento incidente y en la estela.

Finalmente, se realiza una comparación de los espectros obtenidos para el viento incidente y en la estela de la turbina. Para una mejor visualización de las diferencias, en este análisis se utiliza una resolución espectral a partir de 256 bloques que mejoran el efecto de promediado. En la Figura 7, a la izquierda, los espectros correspondientes a la posición z = 170 mm muestran algunas diferencias en las frecuencias más bajas y, a partir de los 15 Hz, la separación del espectro en la estela con relación a la clara definición de la región inercial (pendiente -5/3) en el espectro del viento incidente. El efecto es previsible a partir de la turbulencia adicional producida por la turbina. Entre 200 y 300 Hz, se percibe nítidamente el efecto del filtro pasa-bajos. En la posición z = 280 mm, la separación de los espectros es menor que en la posición anterior (Figura 7, derecha).

En todas las posiciones se observó un aumento de la intensidad de las fluctuaciones en la estela con relación al escurrimiento incidente, no obstante en la posición z = 280 mm el incremento es mayor (del orden del 6 %). La representación bi-logarítmica de los espectros no permite visualizar este comportamiento, pero es muy posible que ese incremento de energía de las fluctuaciones quede concentrado en las frecuencias menores.

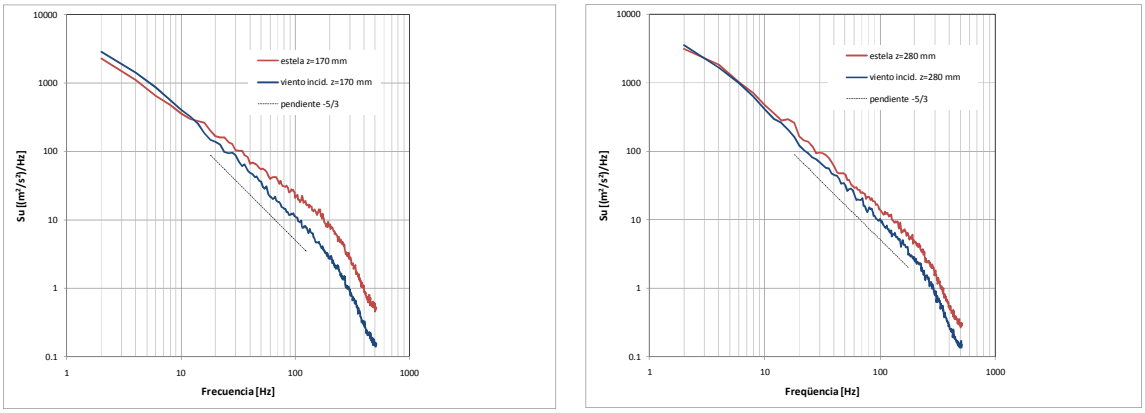


Figura 7: Comparación espectral del viento incidente y en la estela - z = 170 mm (izquierda) - z = 280 mm (derecha).

3.5. Análisis de los resultados.

La evaluación de los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia en la estela está restringida a dos posiciones a sotavento del rotor pero igualmente permite observar zonas de disminución de velocidad media y aumento de turbulencia, así como la reconfiguración de las características del viento en la posición más a sotavento.

El análisis de la resolución espectral, permite definir la cantidad de valores de la serie numérica y el número de bloques que se adecue al rango de frecuencias requerido para este tipo de análisis. Asimismo, la variación de la frecuencia del filtrado analógico pasa-bajo permite determinar qué valores son más adecuados para este tipo de fenómeno. No obstante, pueden requerirse modificaciones en función de las variaciones de velocidad del viento medio y del giro del rotor.

Finalmente, la comparación de los espectros característicos del viento incidente y de los obtenidos en la estela permiten observar las modificaciones en la distribución de energía de las fluctuaciones producto de la turbulencia introducida por el generador eólico. No obstante, el análisis se restringe a una posición a sotavento del rotor (x = 225 mm) y algunos puntos de medición en dirección vertical. Por otro lado, es importante señalar nuevamente que la velocidad media del viento y del rotor se mantuvieron aproximadamente constantes en todos los ensayos, por lo que a continuación, deberá evaluarse como influye la variación de estos parámetros en las características del flujo en la estela.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la técnica de análisis espectral de la componente longitudinal de turbulencia en modelos a escala reducida de aerogeneradores en túnel de viento. En primer lugar se analizan los perfiles de velocidad e intensidad de turbulencia del viento incidente y del viento en la estela del modelo. Una serie de mediciones preliminares permite el análisis de la configuración de los espectros en los diferentes rangos de frecuencia, el efecto de filtrado analógico de la señal, y las diferencias en el comportamiento espectral del viento incidente con respecto al escurrimiento en la estela de la turbina. Los resultados obtenidos, además del análisis de las modificaciones de las características espectrales del escurrimiento, permiten definir la resolución y el ajuste del filtrado para poder realizar una evaluación espectral adecuada a este tipo de fenómeno. A continuación, serán evaluadas las funciones de autocorrelación de las fluctuaciones de velocidad y serán desarrollados nuevos ensayos en que los valores de la relación adimensional de velocidades permitan garantizar la semejanza del fenómeno, a partir del control de velocidad del generador eólico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS

[1] Crespo, A., Hernandez, J., Frandsen, S. Survey of Modelling Methods for Wind Turbine Wakes and Wind Farms, Wind Energy, 2, 1-24, 1999.

[2] Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O.,Larsen, S., Højstrup, J., Nielsen, P., Thøgersen, M. Analytical modeling of wind speed deficit in large offshore wind farms, EWEC 2004, November 22-25, London, UK, 2004.

[3] Counihan, J. “An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel”, Atmospheric Environment, 3, 197-214, 1969.

[4] Neff, D., Meroney, R., McCarthy, E., Davis, E. “Upstream and Lateral Wind Turbine Wake Effects on Nearby Wind Turbine Performance” J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics. 36, pp. 1405 -1414, 1990.

[5] Cal, R. B., Lebrón, J., Castillo, L., Kang, H., Meneveau, C., Experimental study of the horizontally averaged flow structure in a model wind-turbine array boundary layer, JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY, 2, 013106, 2010.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO, DE UNA PEQUEÑA TURBINA EÓLICA DARRIEUS-H CON PERFIL ASIMÉTRICO

Jorge Lassig [1], Ubaldo Jara [1] y Juan Valle Sosa [1]

[1] Departamento de Mecánica Aplicada – Universidad Nacional del Comahue
Bs.As. 1400, Neuquén, Argentina
Jorge.lassig@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

El modelo Darrieus fue inventado por el ingeniero francés George Jeans María Darrieus. El presentó su patente en 1931 en los EE.UU. [1], que incluye la pala curva y la pala de sección constante, ahora denominada Darrieus-H o Giromill.

Su auge lo obtuvo entre las décadas de 1970 y 1980, luego fueron desechadas por varios motivos, frente a las turbinas de eje horizontal [2].

En particular, las turbinas eólicas de eje vertical tipo Darrieus hoy en día están siendo consideradas como una de las soluciones más atractivas para ser instaladas en techos de edificios (edificios auto sustentables), debido a su bajo impacto visual, reducidas emisiones acústicas y su mejor respuesta a un flujo turbulento [3].

Una de las dificultades de las turbinas eólicas del tipo Darrieus es que carecen de auto arranque. Esto se debe en parte a que en el pasado se han utilizado solo perfiles aerodinámicos simétricos, como los de la serie NACA de 4 dígitos, por ejemplo los NACA 0012, 0015, 0018. Esta incapacidad de auto arranque fue una desventaja técnica para este tipo de turbina eólica. En años recientes se ha comenzado a experimentar con perfiles aerodinámicos no simétricos, y se ha determinado que en algunos casos estos permiten el auto arranque [4].

En el presente trabajo se presentan los resultados de una serie de ensayos realizados con una pequeña turbina Darrieus-H de tres palas, con un perfil no simétrico de la serie S, que fue ensayado en un túnel de viento, variando el paso de la pala, hasta encontrar la velocidad de viento de auto arranque, que fue de 4 m/s.

Palabras Claves: *Darrieus-H, Ensayos, Túnel de Viento.*

1. INTRODUCCIÓN

El modelo Darrieus fue inventado por un ingeniero francés llamado George Jeans María Darrieus. El presentó su patente en 1931 [1], en los EE.UU., que incluye la pala curva y de sección constante.

Los VAWTs de tipo Darrieus son básicamente impulsadas por la fuerza sustentadora. La turbina consta de dos o más palas con forma de perfil aerodinámico que están unidos a un eje de rotación vertical. El viento fluye sobre los contornos del perfil aerodinámico de la pala y crea sustentación aerodinámica, que impulsa a las mismas.

Una variación del Darrieus original se desarrolló en National Research Council of Canadá [5, 6], es la denominada Darrieus Troposkien, la cual logra minimizar la tensión de flexión en las palas, debido a que su forma se adapta a la deformación que causa la fuerza centrífuga.

1.1.- H-Darrieus

En el mercado de aerogeneradores de pequeña escala, a los Darrieus de pala recta, se los denomina Giromill o Darrieus-H, actualmente es el más atractivo por ser su diseño mas simple.

Los Giromil o Rotores-H, como se muestra en la figura 1b, se han desarrollado en el Reino Unido a través de la investigación llevada a cabo durante los decenios de 1970 y 1980. Se encontró que el efecto creado detrás de una pala limitaría la velocidad del viento relativo de la pala opuesta, y que esto podría impulsar toda la configuración de la pala hacia delante, por lo tanto, los rotores-H se podrían convertir en aparatos capaces de lograr el auto-arranque y la auto-regulación en todas las velocidades del viento.

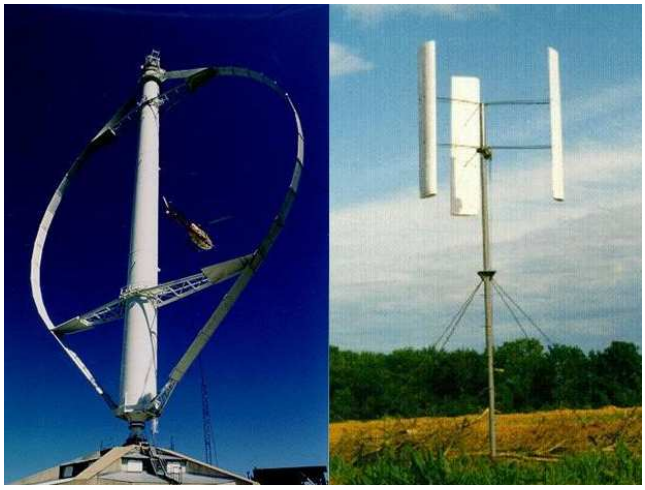


Figura 1: (a) Darrieus Convencional – (b) Darrieus-H o Giromill.

Esta configuración se dividen en dos categorías: de paso fijo y de paso variable. Se ha encontrado que las VAWTs de paso fijo proporcionan un par de arranque inadecuado [7].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por el contrario la configuración en modernas VAWT de pala de paso variable, han logrado superar el problema del par de arranque, pero son demasiadas complicadas, lo que hace que no sea práctico para aplicaciones de poca potencia.

La mayoría de las actividades de investigación llevadas a cabo previamente en las VAWT se centró en palas rectas equipadas con superficies de sustentación simétrica (como la serie NACA de 4 dígitos 0012, 0015, 0018), que no fueron capaces de lograr el auto-arranque. Esta incapacidad de auto-arranque en el pasado se debió a varios factores (factores técnicos, la inadecuada labor de investigación y financiación), pero los más dominantes se deben a factores aerodinámicos. En años recientes se ha comenzado a experimentar con perfiles aerodinámicos no simétricos, y se ha determinado que en algunos casos estos permiten el auto-arranque, aunque el auto-arranque más preciso se obtiene al tener variación de paso (pich) en las palas.

Por otra parte, si se hace una encuesta por Internet, se pueden observar que hay un puñado de productos comerciales VAWTs de palas recta, pero no hay información confiable desde una fuente independiente, con respecto al rendimiento de estos productos, y las afirmaciones hechas por los fabricantes aún no se han verificado con autenticidad.

En el mercado de aerogeneradores de pequeña escala, los Giromill o Darrieus-H parecen ser más rentable que el convencional Darrieus.

2. EXPRESIONES MATEMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS AERODINÁMICO DE PALAS TIPO DARRIEUS.

Las palas de los Darrieus en su análisis aerodinámico es bastante complejo. A continuación se presentan las expresiones matemáticas generales, que son comunes a la mayoría de los modelos aerodinámicos que se utilizan en el diseño de turbinas de viento tipo VAWT.

2.1. La variación del ángulo de ataque local.

Las velocidades de flujo en los lados aguas arriba y aguas abajo de los VAWTs de tipo Darrieus no son constantes, como se ve en la figura. 2. De la figura se puede observar que el flujo a considerar es en la dirección axial. La componente de velocidad tangencial Vt y la componente de velocidad normal Vn, se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$V_t = R.\omega + V_a.\text{Cos}\ \theta \qquad (1)$$

$$V_n = V_a.\text{Seno}\ \theta \qquad (2)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

donde Va es la velocidad de flujo axial (es decir, la velocidad inducida) a través del rotor, ω es la velocidad de rotación, R es el radio de la turbina, θ y es el ángulo de azimut. Haciendo referencia a la figura 2, el ángulo de ataque (α) se puede expresar como:

$$\alpha = \tan^{-1}(V_n/V_c) \qquad (3)$$

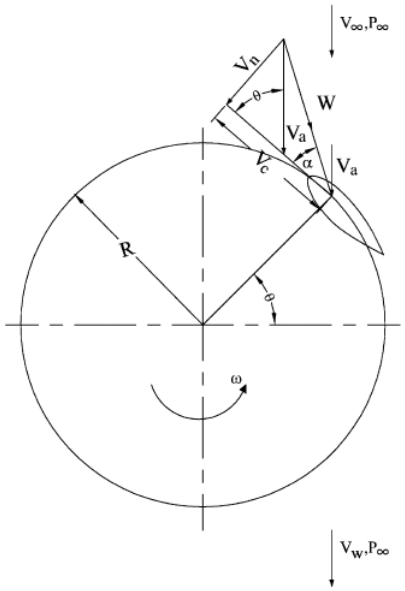


Figura 2: Esquema de la descomposición de velocidades actuantes sobre un elemento de pala en una turbina Darrieus-H.

Sustituyendo los valores de Vt y Vn y adimensionalizando, queda:

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{Seno\,\theta}{(R\omega/V_\infty)/(V_a/V_\infty) + Cos\,\theta}\right] \qquad (4)$$

donde V∞ es la velocidad del viento en la corriente libre. Si tenemos en cuenta el paso de la pala,

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{Seno\,\theta}{(R\omega/V_\infty)/(V_a/V_\infty) + Cos\,\theta}\right] - \gamma \qquad (5)$$

donde γ es el ángulo de las palas.

2.2. Variación de la velocidad relativa del flujo local.

La velocidad de flujo relativa (W) se puede obtener como (figura 2),

$$W = \sqrt{V_t^2 + V_n^2} \qquad (6)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Reemplazando los valores de Vt y Vn (Ecs. (1) y (2)) en la ecuación. (6), y adimensionalizando, se puede encontrar la relación de velocidad como:

$$\frac{W}{V_\infty} = \frac{W}{V_a} \cdot \frac{V_a}{V_\infty} = \frac{V_a}{V_\infty} \sqrt{\left[\left(\frac{R\omega}{V_\infty} / \frac{V_{au}}{V_\infty} \right) + Cos\theta \right]^2 + Seno^2\theta} \qquad (7)$$

2.3. Variación de las fuerzas tangenciales y normales

Las direcciones de las fuerzas de sustentación y arrastre, y sus componentes normal y tangencial se muestran en la figura. 3.

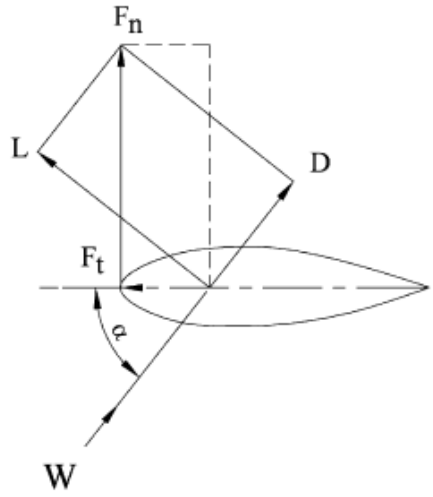


Figura 3: Esquema de la descomposición de fuerzas actuantes sobre un elemento de pala en una turbina Darrieus-H.

El coeficiente de fuerza tangencial (Ct) es básicamente la diferencia entre las componentes tangenciales de las fuerzas de sustentación y arrastre. Del mismo modo, el coeficiente de fuerza normal (Cn) es la diferencia entre los componentes normales de sustentación y las fuerzas de arrastre. las expresiones de Ct y Cn se pueden escribir como:

$$C_t = C_l.Seno\ \alpha - C_d.Cos\ \alpha \qquad (8)$$

$$C_n = C_l.Cos\ \alpha + C_d.Seno\ \alpha \qquad (9)$$

Las fuerzas tangenciales y normales netos se pueden definir como:

$$F_t = C_t\ ½\ \rho\ C\ H\ W^2 \qquad (10)$$

$$F_n = C_n\ ½\ \rho\ C\ H\ W^2 \qquad (11)$$

donde ρ es la densidad del aire, C es la cuerda de la pala y H es la altura de la turbina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. PERFILES AERODINÁMICOS DE BAJOS REYNOLDS

Cuando se trabaja con perfiles convencionales a bajos números de Reynolds, uno de los problemas que aparecen es la separación laminar temprana sin re adherencia. A esas capas de corte que se separan se las denominan “burbuja de separación laminar” (Horton 1968, [8]), como se indica en la figura 4. Esta capa de corte reduce el C_L y aumenta el C_D, y termina con la separación total del flujo y la entrada en pérdida del perfil. De acuerdo al tipo de separación se generan las denominadas burbujas cortas o largas, dependiendo del flujo incidente y de las características geométricas del perfil.

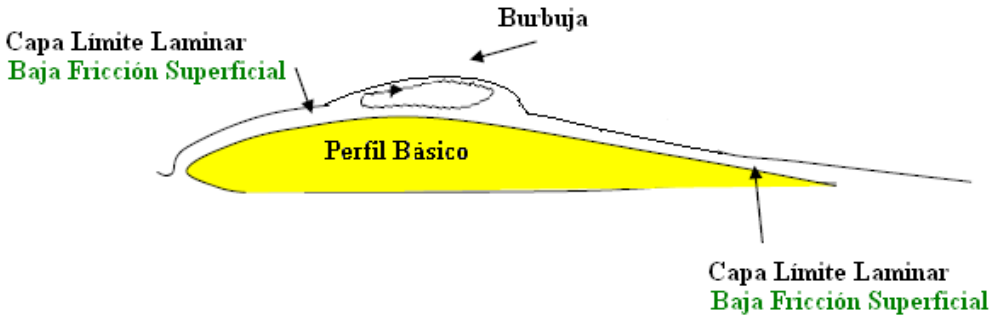


Figura 4: Bajos Reynolds el flujo permanece laminar y la burbuja puede quedar adherida modificando las performances del perfil

Para evitar o retrasar este fenómeno se desarrollaron los perfiles para bajos Reynolds ([9], [10], [11], [12]), cuya característica fundamental es que presentan una evolución gradual de presiones sobre el extradós, sin salto abrupto, en el rango de Reynolds desde 50.000 hasta 500.000, obteniéndose de esta manera una adecuada distribución de sustentación. Dichos perfiles son empleados en el diseño de aeronaves, como planeadores de competición, aeronaves radiocontroladas (drones), y aerogeneradores modernos.

3.1.- Perfil para Turbinas Eólicas por Control de Entrada en Pérdida Aerodinámica (Stall)

Cuando la industria aeronáutica entró en el mercado de fabricación de turbinas eólicas por la década de 1970´, desarrolló el control de potencia por medio de un adecuado diseño aerodinámico en el cual el ángulo de ataque nominal del perfil no se lo tomaba al de mayor fineza, sino se lo ubicaba cerca de la entrada en pérdida.

Los clásicos perfiles NACA tenían una curva Cl vs α con rápidas entradas en pérdidas, por lo que se comenzaron a estudiar variantes que lograran extender en decenas de grados la pérdida, así nacieron una serie de perfiles que a altos ángulos de ataque mantenían la sustentación constante sin entrar en pérdida e incrementaban el arrastre, logrando el control buscado. Un ejemplo de ello es el perfil Somers S813 [13], donde en la figura 6 se han graficado las curvas del coeficiente de

ISBN: 978-987-1676-63-7

sustentación y el de arrastre, se aprecia que a partir de un bajo ángulo de ataque la sustentación permanece constante hasta 50º, mientras que el arrastre se incrementa considerablemente con el ángulo de ataque.

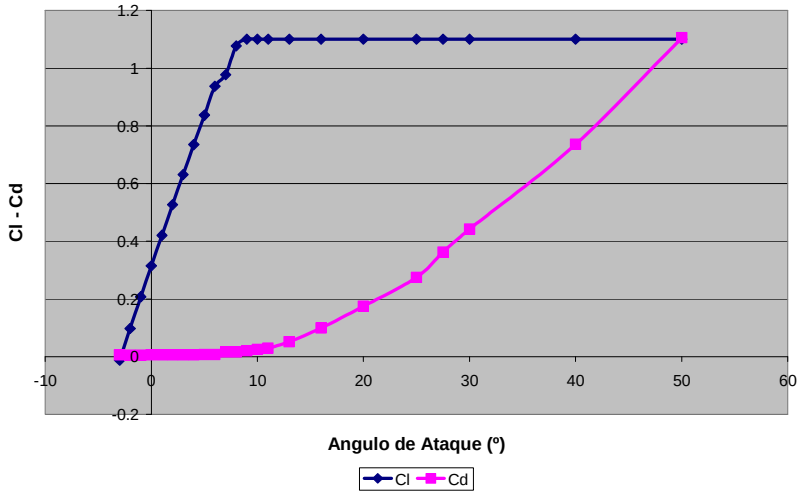


Figura 6: Características aerodinámicas del perfil S813.

3.2.- Ensayo en Túnel de Viento del Perfil S813

Para verificar las características de la extensión de la pérdida en el perfil S813, se construyó un pequeño alerón con las dimensiones indicadas en la Tabla I, donde el alargamiento es prácticamente 1.

Perfil	Cuerda	Envergadura
S813	16 cm	15,1 cm

Tabla I: dimensiones del alerón ensayado en Túnel de Viento.

Se utilizó el túnel de viento Nº1 de la FI-UNCo, cuya sección de pruebas tiene un área de 0,09 m^2, es de tipo abierto, perfil uniforme, y con una intensidad de turbulencia del 5%.

La velocidad se midió con un anemómetro de hilo caliente TSI Incorporated Model 8330-M, y la sustentación con una balanza piezométrica.

El ensayo se realizó a una velocidad de 10 m/s, por lo que el número de Reynolds fue de $1{,}06 \times 10^5$. Las imágenes de la figura 7 muestran la forma y disposición dentro del túnel de viento del alerón.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 7: Alerón construido en base a un perfil S813, y su ensayo en túnel de viento Nº1.

Los resultados se indican en el gráfico de la figura 8, y si se comparan con los del perfil (ala de alargamiento infinito), se aprecia que las propiedades de extensión de la sustentación se mantienen.

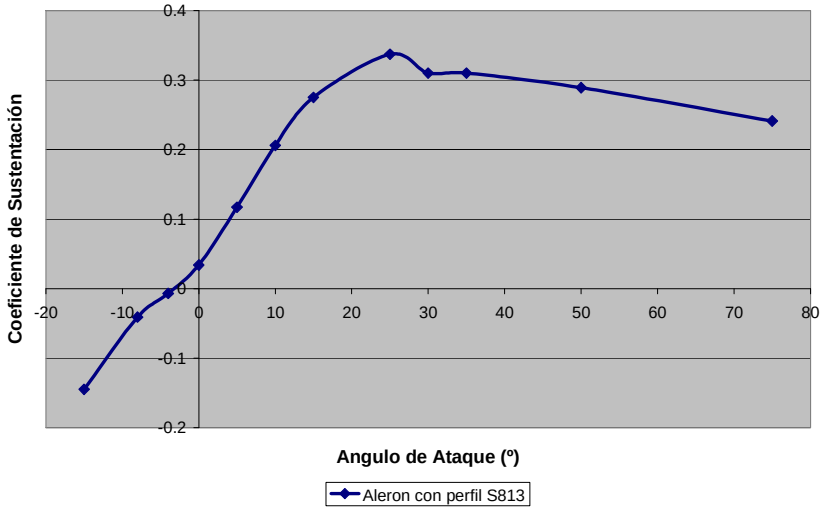


Figura 8: Variación del coeficiente de sustentación del alerón, como resultado del ensayo en túnel de viento.

3.3.- Perfiles de Alto versus Bajo Reynolds

A partir de los datos de Cl y Cd de los perfil S813 y NACA 0009, y utilizando la ecuación (9) se calculó el coeficiente de empuje tangencial de una pala Darrieus-H y se la graficó en la figura 9.

ISBN: 978-987-1676-63-7

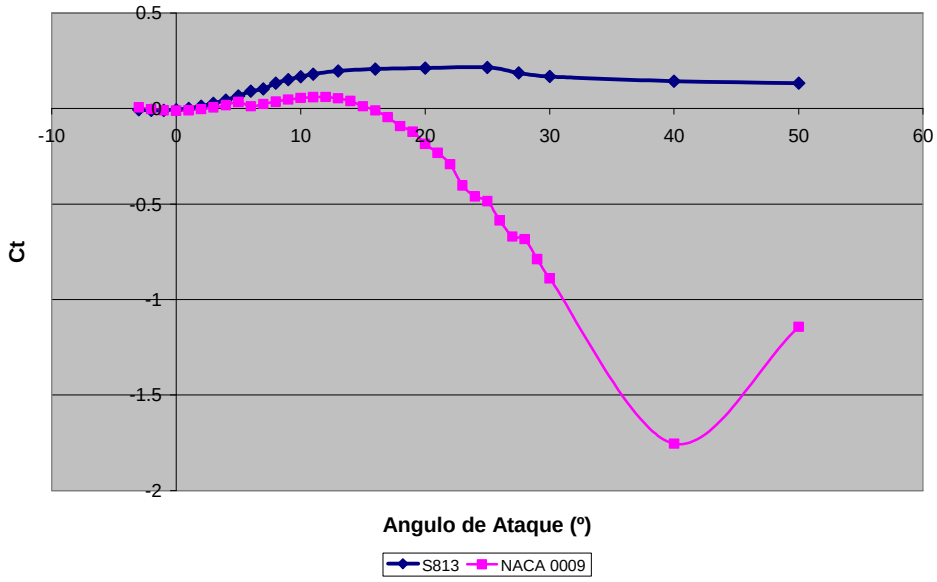


Figura 9: Comparación de los coeficientes de fuerza tangencial en un elemento de pala de una turbina Darrieus para un perfil simétrico y otro asimétrico.

Se puede apreciar en dicha figura que el perfil simétrico para grandes ángulos de ataque produce una fuerza tangencial negativa (se opone al giro de la turbina), por el contrario el perfil S813 sigue generando fuerza tangencial positiva a altos ángulos de ataque, lo que permite que estando quieto, y si el viento incide sobre una pala a altos ángulos de ataque, este produzca un torque que puede poner en movimiento la turbina eólica.

En esto consiste el problema de no poseer auto arranque los perfiles simétricos, y de si poseer auto arranque de ciertos perfiles no simétricos.

De la figura 9 se infiere que con este perfil de bajos números de Reynolds, es posible el auto arranque, la potencia a generarse dependerá de las dimensiones del rotor y del ángulo de calado del perfil, lo que requerirá un dimensionado adecuado.

Por otra parte el perfil S813, además de permitir el auto arranque, también funciona como control de potencia por entrada en pérdida aerodinámica (Stall).

4. PRIMER ENSAYO DE UNA TURBINA DARRIEUS-H EN TÚNEL DE VIENTO

Se construyó un pequeño prototipo de turbina Darrieus-H con el fin de probar el auto arranque de dicha turbina.

El mismo consistió de tres palas rectangulares de 50 cm de envergadura y 5 cm de cuerda, sin torsión, montadas sobre dos placas circulares de 35 cm de diámetro.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los ensayos se comenzaron a realizar en el túnel de viento Nº2 de la Facultad de Ingeniería de la UNComahue, siendo la sección de prueba de 0,90 x 0,90 cm. Este túnel puede funcionar como aerodinámico o de capa límite atmosférica, según se lo prepare. Para estos ensayos el perfil de vientos fue uniforme, ya que el diámetro del rotor es pequeño y no estará influenciado por el perfil de la capa límite atmosférica. La intensidad de turbulencia a la altura del ensayo fue del 5%.

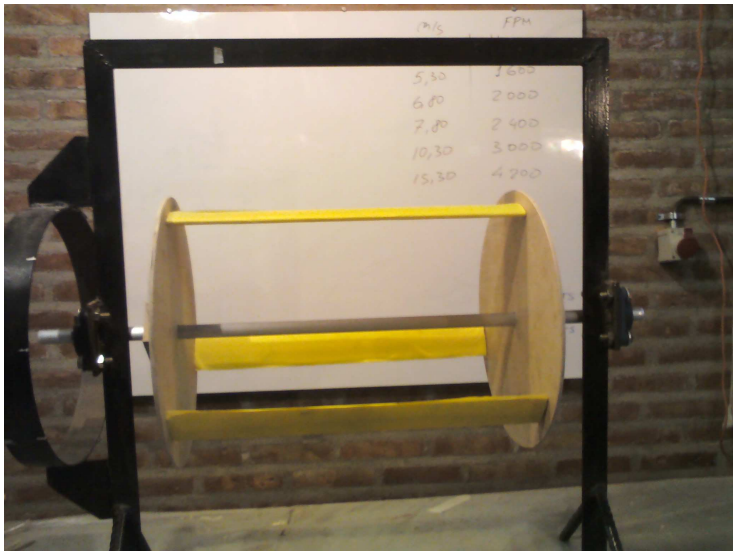


Figura 10: Modelo de turbina Darrieus-H ensayada en el túnel de viento Nº2 de la FI-UNCo.

El torque se midió por medio de un brazo de palanca rozando sobre un disco adosado al eje principal, la velocidad de giro con un medidor digital de r.p.m., y la velocidad del viento con el anemómetro de hilo caliente mencionado anteriormente.

5. PRIMEROS RESULTADOS

Si bien el programa de ensayos es muy ambicioso, pues requerirá medir las rpm y el torque para distintas velocidades de viento, y a su vez variando el ángulo de calaje de las palas en múltiples ensayos.

Los primeros resultados, indican que para una potencia de 2 Watts, arrancó a una velocidad del viento de 4 m/s, alineada la cuerda del perfil con la tangente de la placa circular.

Posteriores ensayos deberán determinar, a que ángulo de calaje es posible el auto arranque a la mínima velocidad posible, pues es de interés que este tipo de turbinas tengan una baja velocidad de arranque, para ser utilizadas en ambientes urbanos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. CONCLUSIONES

El auto arranque en las turbinas Darrieus fue un problema en las décadas pasadas, pues se utilizaron perfiles simétricos NACA para altos números de Reynolds.

El desarrollo posterior de los perfiles aerodinámicos para turbinas eólicas, determinó el uso de perfiles de bajos números de Reynolds. También se potencio el control de potencia por medio de la entrada en pérdida aerodinámica de las palas (Stall), desarrollando para ello perfiles especiales. Este es el caso del perfil S813 que posee una prolongada sustentación a grandes ángulos de ataque.

Al aplicar los parámetros aerodinámicos de este perfil, a la fuerza tangencias (a través del coeficiente de fuerza tangencial C_t, ecuación 8) que se produce en un elemento de pala, los cálculos demuestran que habrá para altos ángulos de ataque valores positivos de C_t, lo que generará un torque en el sentido de giro de la turbina (figura 9).

Para verificar las propiedades del mencionado perfil, se construyó un elemento de pala del mismo y se lo ensayó en túnel de viento verificando las cualidades de conservar sustentación a altos ángulos de ataque.

Por último se construyó una pequeña turbina Darrieus-H para realizar ensayos en túnel de viento con el fin de determinar el mejor ángulo de calaje de las palas, que permitan arrancar a la menor velocidad posible.

Los primeros ensayos confirman que el auto arranque es posible con este perfil.

Agradecimientos

Los subsidios PI-04-I185 de la UNCo y el Picto_UNNE 2011_0187 contribuyeron al desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

[1] Darrieus G.J.M.; *"Turbine Having its rotating shaft transverse to the flow of the current"*. US Patent No.1835081; 1931.

[2] Herbert J. Sutherland, Dale E. Berg, and Thomas D. Ashwill; "A Retrospective of VAWT Technology"; SANDIA REPORT, SAND2012-0304, Unlimited Release, Printed in Albuquerque, California USA, January 2012.

[3] Francesco Balduzzi, Alessandro Bianchini, Ennio Antonio Carnevale, Lorenzo Ferrari, Sandro Magnani; "Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building"; Applied Energy 97 (2012) 921–929.

[4] M. El-Samanoudy, A.A.E. Ghorab, Sh.Z. Youssef; *Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine;* Ain Shams Engineering Journal (2010) 1, 85–95.

[5] South, P. and Rangi, RS.; "Preliminary Tests of a High Speed Vertical Axis Windmill Model", National Research Council of Canada, LTR-LA-74, March 1971.

[6] South, P. and Rangi, RS.; "A Wind Tunnel Investigation of a 14 Ft. Diameter Vertical Axis Windmill", National Research Council of Canada, LTR-LA- 105,

[7] Kirke BK; "Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications". PhD thesis, Griffith University, Australia, 1998.

[8] Hoerner S.F., "Fluid - Dynamics Lift," *Published by the Author* (1975).

[9] Eppler, R., and D.M. Somers, "A Computer Program for the Design and Analysis of Low Speed Airfoils", Technical Memorandum 80210, NASA, Aug. 1980.

[10] McGhee, R. J., and W. D. Beasley, "Low - Speed Aerodynamics Characteristics of a 17 - Percent - Thick Section Designed for General Aviation Applications", TN D-7428 NASA, Dec. 1973.

[11] Eppler, Richard "Airfoil Design and Data" . Springer - Verlag , Berlin, 1990.

[12] C.A. Carroll, A.P. Broeren, P. Giguere, A. Gopalarathnam, C.A. Lyon and M.S. Selig. Low Reynolds Number Airfoil Design and Wind Tunnel Testing, UIUC, 1990 - 2000.

[13] Somers D.S.; Effect of Flap Deflection on Section Characteristics of S813 Airfoil; NREL/SR-500-36335; January 2005.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CARPINTERÍAS DE EDIFICIOS DEL NORESTE ARGENTINO

Suárez, Rocío B. [1]**; Jacobo, Guillermo J.** [2]**; Alías, Herminia M.**[2]

[1] Becaria de Investigación SGCyT – UNNE. Cátedra Estructuras II - Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del Nordeste. correo-e: betianarociosuarez91@gmail.com.ar
[2] Cátedra Estructuras II - Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del Nordeste Av. Las Heras 727, 3500, Resistencia, Chaco, Argentina
correo-e: gjjacobo@arq.unne.edu.ar heralias@arq.unne.edu.ar Estruct.Dos@gmail.com

RESUMEN

La investigación estuvo orientada hacia el estudio y análisis del desempeño higrotérmico de tipologías de carpinterías, más frecuentemente utilizadas, en edificaciones localizadas en las ciudades de Resistencia y Corrientes. Se buscó determinar el valor de transmitancia térmica media ponderada de dichas carpinterías, su encuadre en la clasificación propuesta por la Norma IRAM 11507-4, y la ubicación y comportamiento de los puentes térmicos. Datos recabados para determinar el nivel de eficiencia energética de estos componentes constructivos de la envolvente edilicia. Y para cuantificar los flujos de calor, es decir las cargas térmicas por conducción (invierno-verano) incidentes en el balance térmico final de los espacios interiores, los cuales repercuten en la intensidad de uso de los sistemas de climatización (refrigeración-calefacción), en los niveles de consumo eléctrico, y finalmente en las cantidades de emisiones de gases contaminantes.

En base a una situación inicial analizada, de resultados predominantemente negativos, se propusieron soluciones de optimización energética, que apuntaron tanto a la corrección de los puentes térmicos como a la disminución de los valores de transmitancia térmica. Considerando a su vez la posibilidad de implementación en el entorno local, la factibilidad económica y el uso de materialidades y tecnologías disponibles en el mercado regional.

Para ello fueron utilizados diferentes metodologías que permitían hallar resultados comparables. Las cuales se constituyeron en la aplicación del cálculo de la transmitancia térmica media ponderada, detallado en la Norma IRAM 11507-4, y en las modelizaciones realizadas en los software THERM y WINDOW versión 6.3

Los resultados hallados tenían por objetivo final poder estimar porcentajes de ahorros energéticos en climatización, en tarifa de electricidad y en reducción de emisiones gases contaminantes. Así como también estimar costos de rehabilitación térmica y años de amortización de la inversión inicial. Siendo estos datos valiosos para justificar el porqué de la imperiosa necesidad de la corrección de los puentes térmicos en carpinterías.

Palabras Claves: *Transmitancia térmica, Carpintería, Norma IRAM 11507-4, software Therm 6.3*

1. Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo difundir los resultados hallados en la investigación de la beca pregrado, realizada en el ciclo 2015, para la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la UNNE, bajo el título *"Desempeño higrotérmico de cerramientos de vanos (vidrios y marcos de carpinterías) de edificios del NEA según análisis de puentes térmicos y propuesta de pautas tecnológico-constructivas para su corrección"* [1]. Investigación que se enmarca en el proyecto *"Rehabilitación higrotérmico-energética de edificios en el NEA: evaluación, diagnóstico, desarrollo de soluciones técnico-constructivas y valoración costo-beneficio. Clasificación energética de la edificación"* a cargo en la dirección: arq. Guillermo JACOBO y codirección: arq. Herminia ALÍAS.

Como antecedentes a esta investigación se pueden citar los trabajos:

- *"Rehabilitación térmica de cerramientos de vanos (vidrios y marcos de carpinterías) de edificios existentes. Propuesta de soluciones tecnológico-constructivas aptas para el NEA"* [2]
- *"Análisis higrotérmico comparativo de carpinterías externas existentes en los edificios de las facultades del Campus UNNE - Resistencia, según normas IRAM. Valoración económica e higrotérmica"* [3]
- *"Desempeño higrotérmico de carpinterías de los edificios de las Facultades de Arquitectura e Ingeniería de la UNNE. Diagnóstico y criterios de optimización según eficiencia energética y valoración económica"* [4]

En la mencionada investigación que da origen a este trabajo, prima el objetivo de optimizar energéticamente las carpinterías, corregir los puentes térmicos, mejorar y disminuir los valores de transmitancia térmica. Porque son los puntos críticos de la envolvente edilicia, en donde se agudizan los puentes térmicos, las secuelas del efecto invernadero (producido por las superficies vidriadas), las infiltraciones de aire y agua. Los cuales en deficientes condiciones constructivas desencadenan patologías constructivas (humedades superficiales, desprendimiento de revoques y pintura, hongos), y pérdidas o ganancias térmicas (Figura 1) según fuere la estación climática, invierno o verano. Este último factor es crucial en los balances térmicos de los espacios habitables. Ya que las carpinterías poseen una importante incidencia en los cálculos de las cargas térmicas, ya sea por conducción o por radiación solar, los cuales dependen del tipo de vidriado y protecciones solares utilizadas, las orientaciones y el valor de la transmitancia térmica media ponderada.

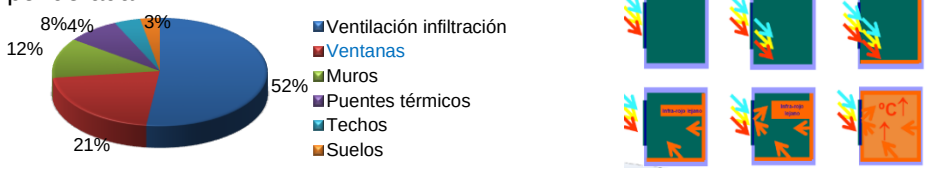


Figura 1: Pérdidas o ganancias térmicas en los edificios (Izquierda) Efecto invernadero generado por vidrios (derecha) Fuente: Ponencia "Rehabilitación térmica de cerramientos de huecos: vidrios y marcos térmicamente eficientes" Eduardo Mª De Ramos Vilariño, 2011, Bilbao

ISBN: 978-987-1676-63-7

Si además de poseer envolventes edilicias deficientes térmicamente, consideramos las condiciones climáticas existentes en la región, de elevadas temperaturas y humedades, resulta lógico el creciente consumo en climatización, la búsqueda del confort por parte de los usuarios, que demandan cada vez más suministro de electricidad desde el sector residencial (Figura 2)

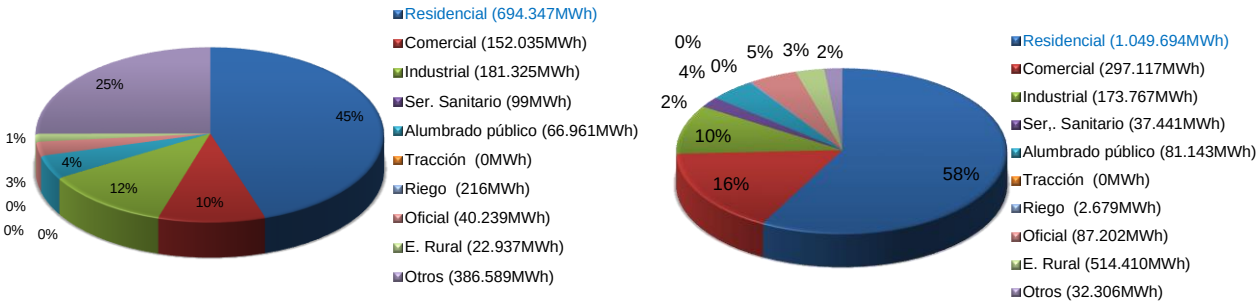


Figura 2: Porcentajes de consumos finales de electricidad en la provincia de Corrientes (izquierda) y la provincia de Chaco (derecha) Año 2012 Fuente: Secretaría de energía

Situación que resulta inquietante si tomamos noción de que en la Argentina las fuentes primarias para generar electricidad son el petróleo y el gas natural, que producen como derivados de su combustión gases contaminantes (Figura 3). Encontrándose aún en un estado de infradesarrollo las energías renovables.

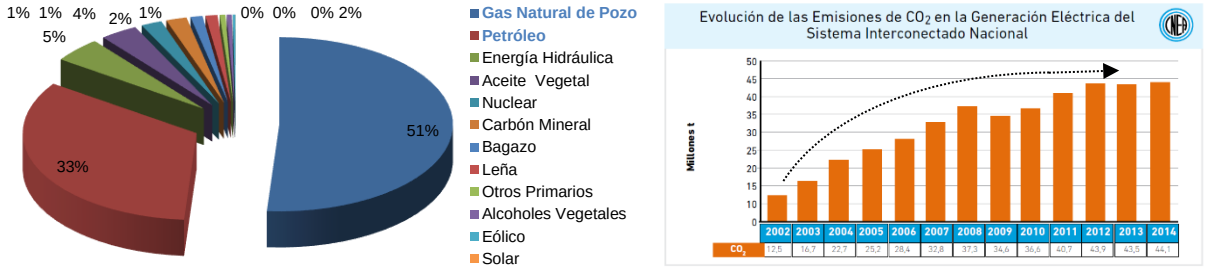


Figura 3: Distribución porcentual de la oferta interna de energía primaria, por forma de energía año 2014 (izquierda) y evolución de las emisiones de CO_2 en la generación eléctrica del sistema interconectado nacional (derecha) Año 2014 Fuente: Secretaría de energía, Ministerio de planificación federal, inversión pública y servicios.

Entonces se destaca la importancia de rehabilitar térmicamente las carpinterías, optimizar las edificaciones, transformarlas en eficientes energéticamente, disminuyendo el consumo, garantizando el confort y las condiciones de habitabilidad en los espacios internos, efectuando un uso más racional de la energía.

2. Metodología

Para el desarrollo de la investigación se ha utilizado el método *"Analítico Deductivo: de lo general a lo particular":* ya que se partió del análisis de la bibliografía general disponible sobre el tema hasta llegar a modelizar, en programas informáticos específicos, resoluciones tecnológicas particulares. Por lo tanto fueron necesarias realizar las siguientes actividades:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Recolección y clasificación de bibliografía de acuerdo a ejes temáticos propuestos en la investigación (exigencias de carpinterías, aspectos generales de las mismas, vidrios, marcos, posibles soluciones de rehabilitación)
- Relevamiento fotográfico de las tipologías de carpinterías existentes en los edificios locales, ya sean estos de carácter público, privado, comercial o residencial. Tomándose 60 fotos en la ciudad de Resistencia y 84 fotos en la ciudad de Corrientes.
- Elaboración de planillas para clasificar y ordenar la información recolectada. Volcándose datos como sector, ubicación en la ciudad, materialidad, especificaciones técnicas, áreas o superficies componentes.
- Consultas técnicas a comerciantes, expertos en el tema, instituciones públicas (IPDUV, INVICO). Solicitando a dichos institutos las planillas de carpinterías de los pliegos de los prototipos de viviendas más construidas en las respectivas provincias.
- Verificación de las condiciones térmicas de las tipologías existentes, mediante la aplicación de la metodología de cálculo de la Norma IRAM 11507-4 [5]. En esta metodología se aplica la ecuación (1) de transmitancia térmica media ponderada.

$$K'_m = \frac{\sum_1^n (K_i \cdot S_i)}{\sum_1^n S_i}$$

(1) Fuente: Norma IRAM 11507-4

K'_m= transmitancia térmica media ponderada W/m^{2}K

S_i= superficie de cada uno de los componentes de la ventana m^2

K_i= transmitancia térmica según IRAM 11601 W/m^{2}K

El valor hallado se contrasta con los valores de la tabla (1) de la Norma IRAM 11507-4. De esta manera se obtiene la categoría de clasificación de una carpintería.

Tabla 1: Categorías de aislación térmica para carpinterías Fuente: Norma IRAM 11507-4

Categoría de aislación	Transmitancia térmica, K (en W/m^{2}K)
K_1	K < 1,0
K_2	1,0 ≤ K ≤ 1,5
K_3	1,5 < K ≤ 2,0
K_4	2,0 < K ≤ 3,0
K_5	3,0 < K ≤ 4,0
No clasificable	K > 4,0
NOTA. Las categorías de clasificación establecidas en la tabla 1, son exigibles en función del desempeño térmico requerido en las condiciones ambientales de uso previstas para la zona climática donde se instale la ventana (IRAM 11603).	

- Confección de gráficos de torta para visualizar la situación actual de las carpinterías de los edificios existentes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Elaboración y estudio de propuestas de rehabilitación aptas para la región, mediante el planteo de pautas de diseño tecnológico.
- Traducción y lectura del manual de uso del software THERM versión 6.3 [6]
- Armado del catálogo de carpinterías, clasificándolas en 3 grupos (Grupo A: Aluminio, Grupo B: Chapa plegada y Grupo C: Madera), y especificando su transmitancia térmica, clasificación, precio, observaciones respecto a los códigos y reglamentos vigentes en la región [7,8], y recomendaciones en relación a su tecnología.
- Selección de tipologías y soluciones de rehabilitación térmica más representativas, especificadas en el catálogo.
- Recopilación de datos climáticos (temperatura interior, temperatura exterior de diseño máxima - mínima, radiación solar directa, velocidad y dirección del viento, coeficiente convectivo, temperatura y emisividad del cielo) y de propiedades térmicas de materiales (conductividad térmica y emisividad), para la carga de datos en los softwares.
- Creación de los cad de las tipologías (detalles constructivos separados por partes constituyentes de la carpintería: dintel, jamba, antepecho, umbral, cruce central) a ser importados en los programas informáticos.
- Estudio y práctica (en los software THERM y WINDOW versión 6.3), de las tareas de: importación, creación de geometría, mallado, cálculo, exportación, carga de datos, creación de materiales y condiciones de entorno, visualización de resultados, etc. Creación de las 132 modelizaciones finales, de las partes constituyentes de 12 tipologías seleccionadas de los 3 grupos establecidos de carpinterías, bajo las condiciones climáticas de la estación invierno (mes de septiembre) y verano (mes de diciembre) de la ciudad de Resistencia, dada su mayor rigurosidad.
- Elaboración de diagnósticos, fichas técnicas y gráficos comparativos entre la metodología de cálculo IRAM 11507-4 y los resultados de las modelizaciones en los software THERM y WINDOW.
- Estudios de factibilidad económica, de amortización y de implementación de las propuestas en la región NEA.
- Realización de cálculos de supuestos estimativos de ahorro energético, mediante hojas de cálculo Excel. Estudiando otras normativas IRAM relacionadas al tema en desarrollo. (IRAM 11604 – 11659-2) [9,10]
- Confección de conclusiones y recomendaciones a futuro para quienes estén interesados en la investigación.

3. Resultados

En base al relevamiento de las carpinterías de los edificios existentes en las ciudades de Resistencia y Corrientes, al estudio de su comportamiento higrotérmico a través de la metodología de cálculo de la norma IRAM 11507-4 y las modelizaciones en los software THERM y WINDOW. Se ha podido constatar que un 75% de las carpinterías relevadas no clasifica para

la norma IRAM 11507-4, es decir que su valor de transmitancia térmica media ponderada es superior al aconsejado por la norma (4W/m^2.K). De este porcentaje que no clasifica: 51,85% son de aluminio, 28,70% de chapa plegada, 16,67% de madera y él % restante se distribuye entre otros materiales. Del porcentaje que clasifica: 89% es de madera y 11% de chapa plegada con espuma de poliuretano inyectada.

Por lo tanto se puede apreciar que 3 grupos de materiales, son los que prevalecen en la tecnología de las carpinterías: Aluminio, Chapa plegada y Madera. Los cuales han sido tomados como tipologías. (Figura 4)

Pudiéndose destacar, que las carpinterías de aluminio generalmente son utilizadas en los edificios públicos como instituciones, entes, etc., también en comercios, y proyectos de vivienda pertenecientes a la operatoria PROCREAR. Las de chapa plegada son muy utilizadas en las viviendas FONAVI construidas por el INVICO.Y las de madera se utilizan generalmente en el sector residencial privado, y viviendas sociales del IPDUV.

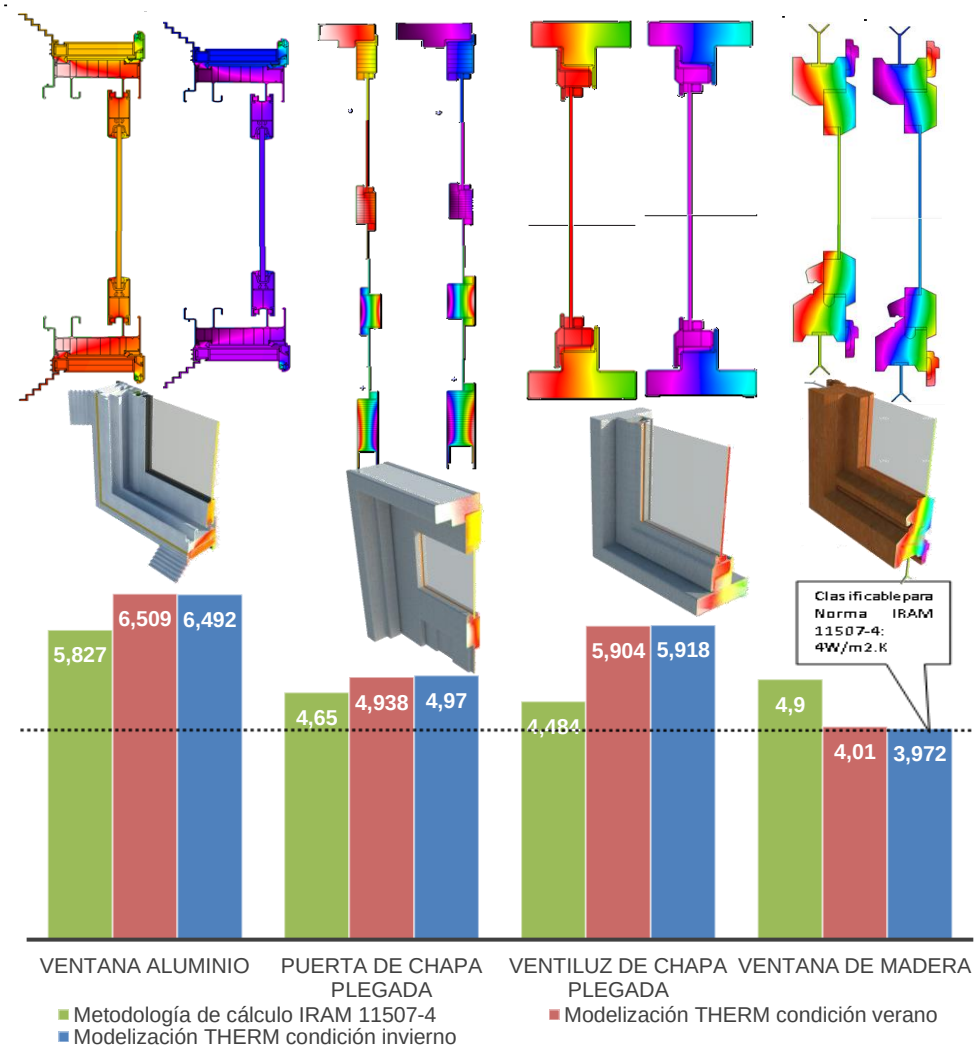


Figura 4: Comparación de valores de transmitancia térmica media ponderada entre diferentes tipologías de carpinterías en su estado actual sin rehabilitaciones Fuente: Elaboración propia

A partir de estas tipologías detectadas, y sus deficientes condiciones higrotérmicas, se propusieron las siguientes soluciones tecnológicas constructivas de rehabilitación térmica.

- Grupo A: Carpinterías de aluminio (Figura 5)

-Recambio de carpinterías con perfilería de aluminio estándar por carpinterías con perfilería de ruptura de puente térmico *(3,338W/m²K)*

-Inyección de espuma de poliuretano en espacios vacíos de perfiles de bastidores de la carpintería. *(3,117W/m²K)*

-Recambio de vidrios comunes por vidrios de control solar, como vidrio monolítico reflectivo pirolítico de control solar y baja emisividad 6mm, y vidrio monolítico pirolítico de control solar y baja emisividad 6mm.

-Recambio de carpinterías con perfilería de aluminio estándar por carpinterías con perfilería de ruptura de puente térmico y sistema de DVH incorporado. *(2,086W/m²K)*

-Contraventana exterior corrediza con policarbonato alveolar cristal. *(1,556W/m²K)*

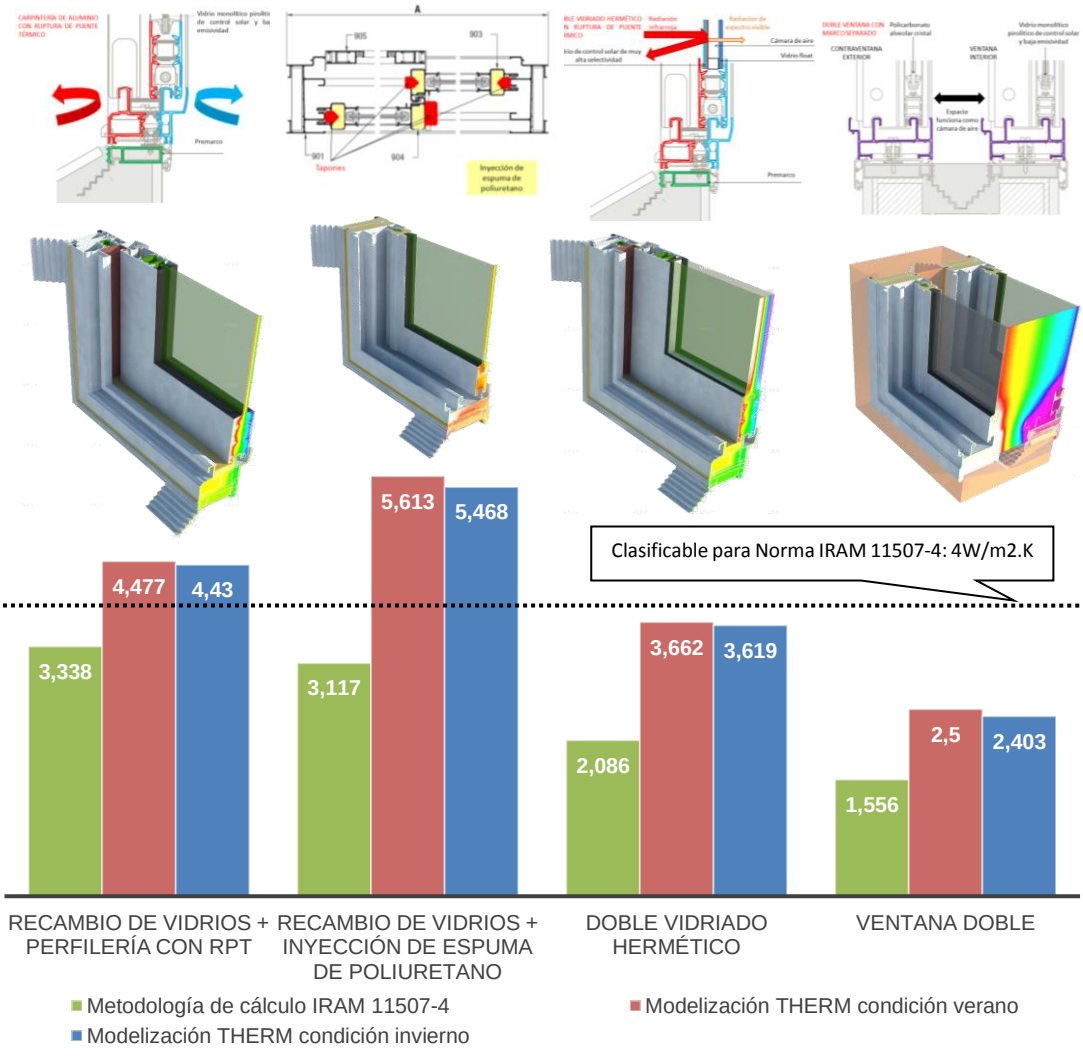


Figura 5: Comparación de valores de transmitancia térmica media ponderada entre propuestas de rehabilitación térmica para el grupo A: carpinterías de aluminio. Fuente: Elaboración propia

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Grupo B: Carpinterías de chapa plegada (Figura 6)

-Inyección de espuma de poliuretano en perfilería de los bastidores y superficie opaco de la carpintería. *(1,489W/m²K)*

-Recambio de vidrios comunes por vidrios de control solar.

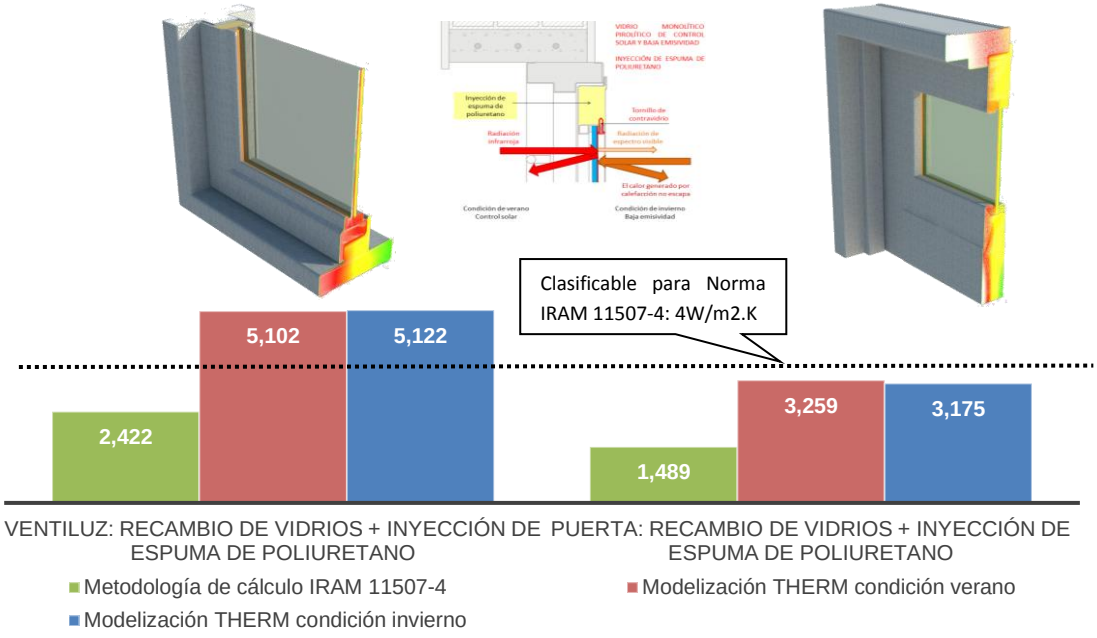


Figura 6: Comparación de valores de transmitancia térmica media ponderada entre propuestas de rehabilitación térmica para el grupo B: carpinterías de chapa plegada Fuente: Elaboración propia

- Grupo C: Carpinterías de madera (Figura 7)

-Recambio de vidrios comunes por vidrios de control solar. *(3,547W/m²K)*

-Postigones o contraventanas exteriores con celosías de abrir a batiente. *(1,928W/m²K)*

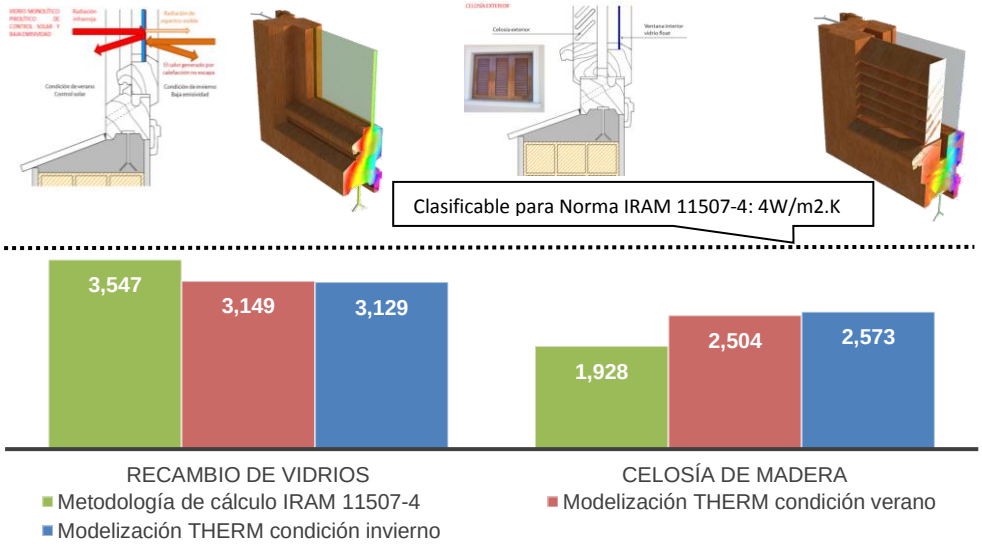


Figura 7: Comparación de valores de transmitancia térmica media ponderada entre propuestas de rehabilitación térmica para el grupo C: carpinterías de madera Fuente: Elaboración propia

ISBN: 978-987-1676-63-7

Es así que mediante la rehabilitación energética de las carpinterías se podrían obtener los beneficios detallados en la tabla 2.

Tabla 2: Beneficios de la rehabilitación energética de las carpinterías. Fuente: Elaboración propia

	Grupo A Aluminio	**B Chapa plegada**	**C Madera**
Transmitancia térmica	1.556-3.338W/m2.K	1.489-2.422 W/m2.K	1.928-3.547W/m2.K
Clasificación para norma IRAM 11507-4	K3-K5	K2-K4	K3-K5
Ahorro en refrigeración mensual	28-30%	1.2-12%	35-48%
Ahorro en calefacción mensual	7-13%	0.3-4 %	5-11%
Ahorro en climatización anual	22-25%	1-10 %	27-38%
Ahorro en electricidad mensual en verano	20-22%	1-9 %	25-34%
Ahorro en electricidad mensual en invierno	3-5%	0.001-1%	2-4%
Ahorro en consumo total de electricidad anual	8%	0.4-4%	10-14%
Ahorro en reducciones de emisiones de CO_2	8-9%	0.4-4%	10-14%
Ahorro en tarifa	19-21%	1-8%	24-33 %
Amortización	0.4-1.1años	0.6-1.2años	0.1-0.2años

Para el cálculo del ahorro energético se ha tomado como supuesto una vivienda de 3 dormitorios modelo PROCREAR contemporánea región NEA, que posee 5 ventanas (tipologías de aluminio o de madera), 1 ventiluz y 2 puertas (tipologías de chapa plegada), orientadas todas al oeste con radiación solar directa tomada a las 16hs. Suponiendo además que la carga térmica inicial de verano es de 9852,13W y la de invierno 2008,32Kw/h. Volumen a calefaccionar 206m^3, grados días 298.

El consumo eléctrico se estima en un promedio de 300Kwh mensuales, utilizándose como refrigeración un aire acondicionado capacidad de refrigeración de 2.67Kw, capacidad de calefacción 2.73Kw, consumo de refrigeración 0.83Kw, consumo de calefacción 0.8Kw y cantidad de horas promedio de uso diarias 8hs, anuales 500hs.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. Conclusiones

Se puede concluir que a partir de la aplicación de las metodologías se obtienen valores de transmitancia térmica media ponderada dispares, mayores para el caso de las simulaciones a través de los software THERM y WINDOW, que los calculados a través de lo estipulado por la norma IRAM 11507-4. Estos valores difieren entre un 34%-80% para el grupo de carpinterías de aluminio, entre un 110% - 118% para el grupo de carpinterías de chapa plegada y un 29% para el grupo de carpinterías de madera. Dichas diferencias de resultados, provocan consecuentemente, que el grado de clasificación de las carpinterías y sus soluciones tecnológicas de rehabilitación térmica, empeore. Comprobándose incluso casos en los cuales las carpinterías no logran clasificar, es decir poseen una transmitancia menor a 4W/m^2.K.

Esto puede deberse a que las simulaciones en los softwares requieren más precisiones en la carga de datos del entorno y de la materialidad constituyente, así como en la configuración de la geometría de la carpintería. Además de estar regidas estas simulaciones por cálculos finitos de calor en dos dimensiones.

El cálculo propuesto por la Norma IRAM 11507-4, no considera las condiciones de entorno: temperaturas, velocidad del viento, radiación solar, siendo estas variables de importantísimo peso para determinar el flujo de calor. Sólo toma en cuenta datos como: espesor, conductividad, área de superficies, transmitancia y resistencia térmica. Es por ello que los resultados obtenidos pueden llegar a ser poco precisos y fidedignos del comportamiento real de la carpintería en estudio, si la aplicación de la metodología no es exhaustiva.

Sin embargo se destaca la utilidad de la aplicación de ambas metodologías como medio de certificación y validación de las posibles soluciones de rehabilitación térmica, ya que permiten determinar el grado de eficiencia energética de una carpintería. La definición de la transmitancia térmica, ayuda a cuantificar el flujo de calor que podría ingresar en una edificación durante meses estivales. Si es posible mejorar tecnológicamente una carpintería, se podría obtener una disminución beneficiosa del consumo en climatización, por consiguiente también en electricidad, en gastos tarifarios (aspecto de alta relevancia en el contexto actual) y en emisiones de gases contaminantes.

Por lo tanto, si bien las condiciones actuales de las carpinterías de los edificios existentes en el NEA son deficientes, poseen elevados valores de transmitancia térmica. La rehabilitación térmica de carpinterías como hemos visto es factible y representa un beneficio energético y económico.

En síntesis el presente trabajo es de utilidad para emprender el camino hacia la sustentabilidad en la arquitectura. Se conforma como una de las múltiples opciones para rehabilitar energéticamente los edificios existentes, y una guía para evitar errores constructivos desde la fase de proyecto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. Referencias bibliográficas

[1] Suárez, Betiana Rocío. Et al. *"Desempeño higrotérmico de cerramientos de vanos (vidrios y marcos de carpinterías) de edificios del NEA según análisis de puentes térmicos y propuesta de pautas tecnológico-constructivas para su corrección".* Secretaria General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 2015, Resistencia, Chaco, Argentina.

[2] Suárez, Betiana Rocío. Et al. *"Rehabilitación térmica de cerramientos de vanos (vidrios y marcos de carpinterías) de edificios existentes. Propuesta de soluciones tecnológico-constructivas aptas para el NEA".* Secretaria General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 2014, Resistencia, Chaco, Argentina.

[3] Yaccuzzi, Iván. Et al. *"Análisis higrotérmico comparativo de carpinterías externas existentes en los edificios de las facultades del Campus UNNE - Resistencia, según normas IRAM. Valoración económica e higrotérmica".* Secretaria General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 2012, Resistencia, Chaco, Argentina.

[4] Yaccuzzi, Iván. Et al. *"Desempeño higrotérmico de carpinterías de los edificios de las Facultades de Arquitectura e Ingeniería de la UNNE. Diagnóstico y criterios de optimización según eficiencia energética y valoración económica".* Secretaria General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. 2011, Resistencia, Chaco, Argentina.

[5] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM). Norma 11507-4. *"Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas Exteriores. Parte 4: Requisitos complementarios. Aislación térmica."* Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 2010, Buenos Aires, Argentina.

[6] Lawrence Berkeley National Laboratory. *"THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual"*. 2014, Berkeley, California.

[7] Municipalidad de la Ciudad de Corrientes. *"Código de edificación de la ciudad de Corrientes"*. Ordenanza nº 1623/85 Boletín municipal nº 208. 21 de abril de 1986, Corrientes, Argentina.

[8] Municipalidad de la Ciudad de Resistencia. *"Reglamento General de Construcciones"*. Ordenanza nº 1681. 1987, Resistencia, Chaco, Argentina.

[9] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM). Norma 11604. "*Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor, Cálculo y valores límites."* IRAM. 2001, Buenos Aires, Argentina.

[10] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM). Norma 11659-2. "*Acondicionamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en refrigeración."* IRAM. 2007, Buenos Aires, Argentina.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN MODELO DE TURBINA HIDROCINETICA, PARA INSTALAR SOBRE LOS CANALES DEL RIO JEINIMENI

Horacio León [1], Abdelbassat Abdelbaki[1], Daniel Lorenzetti[1], Hugo Chacón[1], Hugo Moyano[1], Vitorino Mauro Ezequiel[1], Carlos Labriola[12], Ariel Marchegiani[2], Orlando Audisio[2].

[1]Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Caleta Olivia, Laboratorio de Energías Renovables - LER
Ruta3 S/N Acceso Norte (CP: 9011), Santa Cruz
E-mail: hleon@unp.edu.ar
E-mail: hugomiguelchacon@yahoo.com.ar
[2]Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de FER
Buenos aires 1400 (8300) Neuquén.
carloslabriola54@yahoo.com.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio en etapas de diseño matemático y fabricación experimental de un prototipo de la turbina hidrocinética. Esta turbina está diseñada para generar electricidad (de 1 a 5 KW) en la zona rural de la localidad de Los Antiguos, provincia de Santa Cruz, en los canales del rio Jeinimeni, logrando un bajo impacto ambiental a través de una fuente de energía renovable.
Se realizaron dos prototipos, uno con eje horizontal, similar a los generadores eólicos sumergidos y otro de eje vertical tipo rotor H-Darrieus ambos para usarse sumergidos en la corriente de agua. Los ensayos se realizaran en el LAMHI (Laboratorio de Maquinas Hidráulicas) de la facultad de Ingeniería de la UNCo, se realizarán en un rango de 0.5 a 3,5 m/s de corriente del fluido, obteniendo los valores de potencia de salida, con y sin deflectores. Se estudiará la velocidad del rotor, deformaciones posibles lo que permitirá según los resultados, escalar este modelo para potencias mayores. En este trabajo se plantean los procedimientos de ensayo del modelo de turbina hidrocinética.

Palabras Claves: hidrocinética; Energía Renovable, corrientes de agua; resaltos.

1.- INTRODUCCIÓN

Nuestro país cuenta con recursos energéticos diversos y cuantiosos, sin embargo sufrimos de escasez de generación e importamos cantidades crecientes de hidrocarburos y energía de interconexión resultando que el abastecimiento interno hoy requiere de importar un 20 % de la demanda requerida [1]. Sin embargo tenemos de los mejores vientos del mundo, tanto por su intensidad y duración (aproximadamente 9 m/seg, lo que se estima un potencial de 2000 GW, que sería unas 65 veces la capacidad total instalada en nuestro país), y usamos muy poco la energía eólica [2]. Nuestro país cuenta con altos niveles de radiación solar desde la Puna hasta el paralelo 37º sur, pero prácticamente en la oferta eléctrica de energía Solar fotovoltaica y térmica es prácticamente nula. Tenemos una plataforma marítima de 4 millones de km^2 y no disponemos con certeza el potencial mareomotriz y undimotriz de esa zona. Todavía nos falta

para completar el uso del potencial hidroeléctrico en nuestro ríos, ya sea en grandes Centrales hidráulicas como aquellas Mn y Microhidráulicas. En particular, una región de grandes dimensiones como es la provincia de Santa Cruz, con la mayor tasa de crecimiento anual (36.7 %) [3], pero con densidad de población de 0.4 hab./km^2- La población rural es de 10.721 hab., de los cuales 5.193 hab. se encuentran cerca de centros urbanos y 5528 hab. están dispersos. Los límites de la electrificación rural por red, para estas personas, se encuentran acotados la dispersión de habitantes rurales ante la extensión territorial y por los costos crecientes de las redes, lo que da ocasión a que se utilicen recursos renovables y a llevar a cabo emprendimientos eléctricos con tecnologías como la fotovoltaica [4], la eólica o la micro hidráulica convencional o hidrocinética. Esta última es el motivo de nuestro estudio, desarrollo y aplicación a esta presentación.

2. Emprendimientos en los Los Antiguos, Pcia. de Santa Cruz

2.1. Ubicación del Lugar:

Santa Cruz es la provincia más austral del territorio patagónico continental argentino. Posee una localización geográfica periférica o sea cerca de sus límites geográficos, características ambientales con destacadas limitaciones y un desarrollo socio-económico con reiteradas crisis.
Estos rasgos han restringido sus posibilidades de diversificación económica y han orientado a su población a las actividades agropecuarias (ganado ovino) y mineras en el ámbito de las mesetas patagónicas, a la extracción de hidrocarburos en el límite con Chubut, algo de pesca en los puertos Atlánticos y a los servicios públicos en las áreas urbanas de sus pequeñas y medianas poblaciones, en gran parte ubicadas a lo largo de la costa atlántica.
Para el caso de la región cordillerana, en particular la localidad de Los Antiguos de 2.047 habitantes, en el NO del territorio provincial (Figura 1) y aproximadamente a 2.500 km al sur de la ciudad de Buenos Aires, han comenzado a obtener muy buenos resultados en las cosechas de fruta fina, en especial las cerezas y en sus ventas en el mercado externo. La fruticultura de ese valle, de aproximadamente 1300 ha, se ha extendido y modernizado; y los parámetros de calidad han pasado a tener un rol fundamental en el comercio. La explotación agraria, la forestación con cortinas de álamos, el sistema de riego y los primeros tratamientos de la fruta, se han difundido rápidamente; y la población ha comenzado a valorar la agricultura y a comprometerse con todos los eslabones de la cadena agroalimentaria de la cereza. Sin embargo, las plantaciones ocupan un reducido espacio y los predios intensamente ocupados por frutales de carozo se intercalan con dilatadas superficies todavía sin cultivar.

ISBN: 978-987-1676-63-7

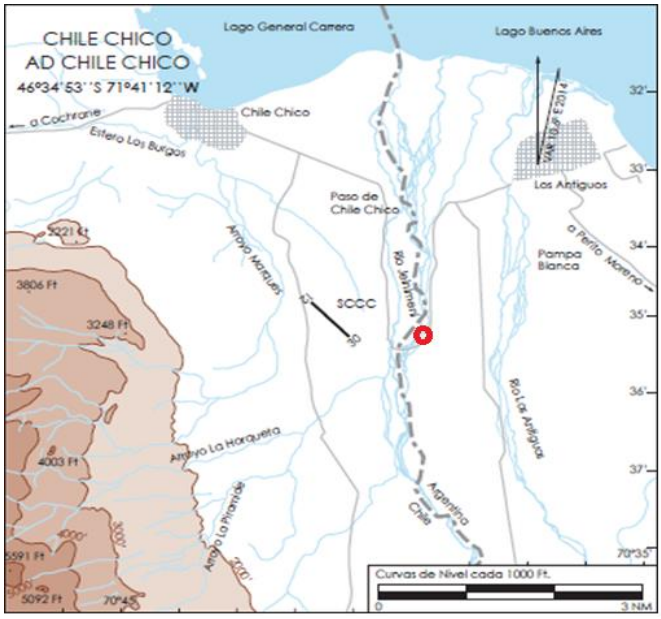


Figura 1. Mapa de lugar elegido para el emplazamiento de la turbina

El estancamiento de la producción se debe a problemas de escasez de energía eléctrica, ya que se necesita del riego permanente para el cultivo de la fruta fina. En la actualidad cuentan con canales de riego distribuidos de la siguiente manera: un canal principal de 4 km de longitud, 7 canales secundarios de 10.47 km y siete canales terciarios de 3.1 km. Sobre el principal y los secundarios se podrían instalar las turbinas hidrocinética motivo de nuestro estudio.

2.2. Estudio del Recurso:

El canal principal (Figura 2) y los secundarios tienen un ancho de 1,5m y una profundidad de alrededor de 1m, por eso son de nuestro interés, en cambio los terciarios no llegan a los 0,50m. La velocidad en los canales de interés va desde 1 m/s a 2m/s.



Figura 2. Fotografía de canal principal de riego de rio Jeinimeni.

3. Tecnología Propuesta

Se proponen dos tipos de turbinas:

1-Turbina de eje Horizontal con perfiles de aspas gruesos y combados, Figura 3.

2-Turbina de eje vertical H-Darrieus de perfiles simétricos gruesos, Figura 4.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Ambos rotores se harán en Fibra de Vidrio con Resina Poliéster (FVRP), que son los materiales más comunes de conseguir en la zona. Se podrían hacer en fibra de carbono pero se encarecería el rotor y por otro lado es difícil conseguir en el lugar ese tipo de materiales.

Los generadores serán de imanes permanentes de CA y luego se rectifica para acumular en baterías, las cuales alimentarán una microred de riego de bombas centrífugas. Estas bombas podrían tomar agua de los mismos canales o de los terciarios para estar cerca del cultivo.

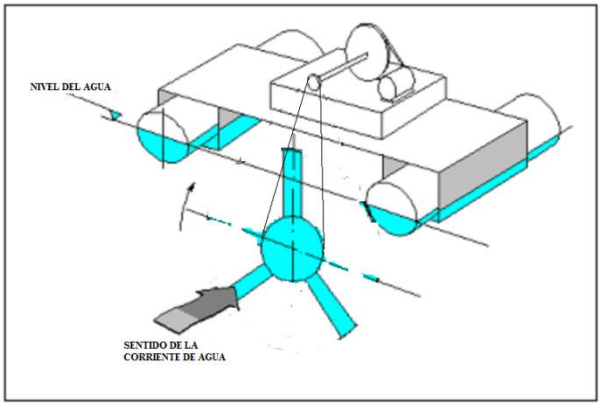


Figura 3.Esquema de Turbina Hidrocinética de eje horizontal

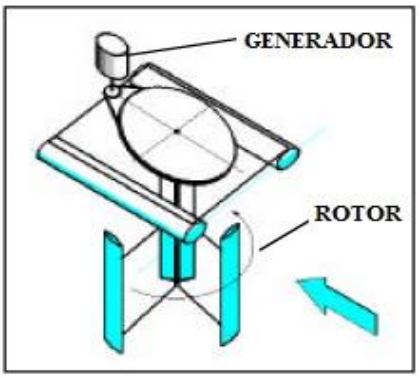


Figura 4. Esquema de Turbina Hidrocinetica de eje vertical

La multiplicación para obtener 400 a 500 rpm en el generador deberá ser entre 10 y 20 y podrá hacerse con sistema de cadenas de bicicleta o moto.

El sistema de generador-multiplicador y rotor irán soportados por un sistema flotante si es necesario (flotadores con caños de PVC de 0,30m de diámetro) o sino apoyado en los bordes del canal para mayor simplicidad.

3.1. Aspectos Teóricos a considerar

Tendremos en cuenta varios aspectos teóricos antes el dimensionamiento de las turbinas:

Área de Captación: En nuestro caso, con la instalación de una turbina hidrocinética, en el canal del rio Jeinimeni, lo que vamos a realizar es capturar una cierta cantidad de agua en un área de

tamaño “A”, que es, el área de intercepción perpendicular al flujo de agua de la turbina, lo que se conoce con el nombre de área de barrido por la maquina “A” según figura 5.

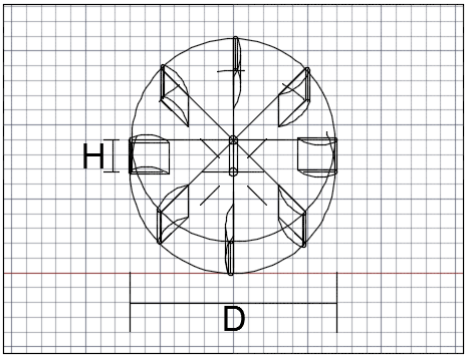


Figura 5. Modelo de turbina propuesto

Por lo que el área considerada en nuestro caso será el diámetro de la turbina propiamente dicha y la altura de la misma, será la siguiente:

$$A = H \times D \quad (1)$$

En el área “A”, se convertirá la energía cinética del agua (E_C) en potencia mecánica (P).

Potencia Suministrada: partiendo de la energía cinética del agua, que será:

$$E_C = \tfrac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

Donde: m: masa del agua en Kg

v: velocidad instantánea del agua en m/seg.

La masa del agua la determinamos en base al peso específico:

$$m = \rho \cdot v \quad (3)$$

Donde: ρ: densidad del agua igual a 1000 kg/m^3

V: volumen del cilindro en m^3

Determinamos el volumen en base al alojamiento de la turbina que es el sector central de la sección dada por el área barrida.

$$V = A \cdot L \quad (4)$$

Donde: A: Área barrida

L: Longitud de tubería

La longitud de recorrido del fluido que provee la energía cinética a la turbina la determinamos según:

$$L = v \cdot t \quad (5)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Donde: v: es la velocidad del agua en m/seg.

t: tiempo que tarda el agua en recorrer el alojamiento de la turbina en segundos.

Reemplazando en la Ec. 2, la energía cinética del agua será:

$$E_C = ½ . \rho . A . v^3 . t \quad (6)$$

La potencia teórica captada por el rotor, para un área barrida dada será [5]:

$$P = E_C/t = ½ . \rho . A . v^3 . Cp \quad (7)$$

3.2. Área Barrida y Potencia de Salida:

Para un mejor aprovechamiento de la sección del canal, en el caso de la turbina H-Darrieus se hará un cavado en el fondo para obtener 1,3m de profundidad y así poder disponer de un rotor de 1,25m por 1 m de altura. Esto nos daría un área barrida de 1,25m2.

Para el caso de una turbina de eje horizontal, con un área barrida de 1,25m2 le corresponde un diámetro de 1,26m. Por lo tanto habrá que socavar hasta 1,5m de profundidad.

Definidos los parámetros para obtener las áreas barridas de ambas turbinas podemos estimar la potencia de salida en base a la velocidad del agua en el canal.

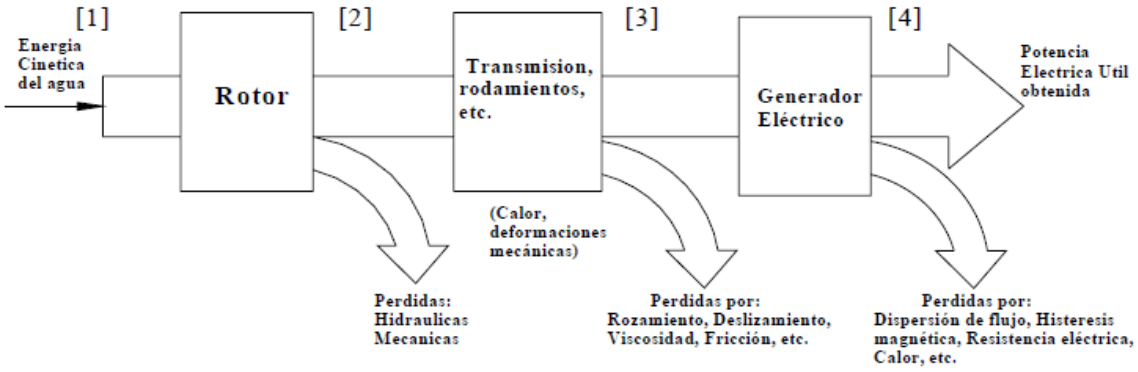


Figura 6. Diagrama de Pérdidas en las Diferentes Partes del Proyecto

Dejamos en claro que tomamos un rendimiento del sistema de multiplicación en conjunto con el generador de 0,8 asignado al (3) y (4) de la Figura 6.

También acotaremos que el Cp es un coeficiente de extracción de potencia del rotor respecto de la energía que trae el fluido, y a pesar de que Betz en su teoría hablaba de 0,59, luego Dyment lo acoto a 0,45 aplicando teoría vorticial luego del rotor. Nosotros tomaremos un valor conservador de 0,4 asignado al (2) de la Figura 6.

Por lo tanto la expresión final para el cálculo de la potencia será de:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$P = E_C/t = \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cp. \eta \cdot A \cdot v^3 \quad (8)$$

Así podemos calcular la potencia de salida pata un rango de velocidades entre 1 a 2m/s como muestra la Tabla 1:

Tabla 1: Cálculo de la Potencia de salida

Coeficiente de Bernoulli	Densidad del Agua	Coeficiente de Potencia	Rendimiento electro-mecánico	Area barrida	Velocidad del fluido	Potencia de salida
0,5	1000	0,4	0,8	1,25	1	0,20
0,5	1000	0,4	0,8	1,25	1,2	0,35
0,5	1000	0,4	0,8	1,25	1,5	0,68
0,5	1000	0,4	0,8	1,25	1,7	0,98
0,5	1000	0,4	0,8	1,25	2	1,60
S/U	Kg/m3	S/U	S/U	m2	m/s	kW

3.3. Partes principales:

3.3.1. Los Rotores y sus perfiles: Es el componente crítico de la Turbina, su función es extraer del flujo de agua del canal, una fracción de su energía cinética convirtiéndola en energía mecánica que será entregada luego a un generador eléctrico a través de un multiplicador.

El rotor de eje vertical puede estar constituido de tres aspas con perfil biconvexo o simétrico grueso como se dijo así proporciona torque cuando las aspas pasan por detrás del rotor.

El rotor de eje horizontal será construido con tres aspas de perfil NACA grueso combado a definir luego de ensayos en el LAMHI de la FIUNCo.

Ya habíamos definido los materiales en FVPR y serán macizas [6], pero además hay que tener en cuenta los esfuerzos de las aspas en las uniones con el eje dado que se dán fenómenos de fatiga [6], particularmente en el H-Darrieus.

ISBN: 978-987-1676-63-7

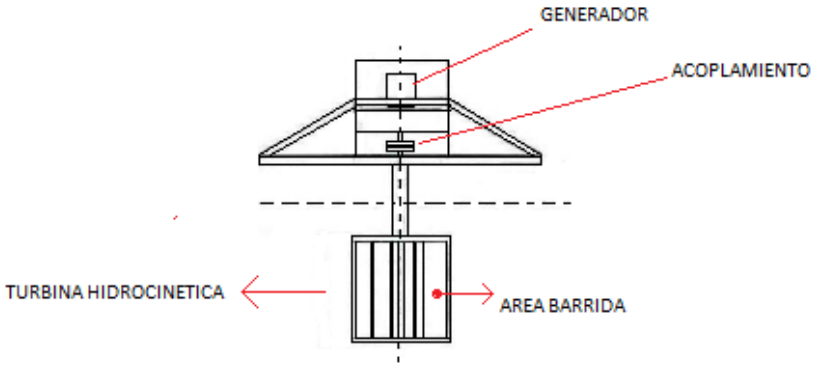


FIGURA 7. Esquema de turbina hidrocinética H-Darrieus

3.3.2. Sistema Multiplicador y Generador:

El multiplicador es de partes de otros sistemas mecánicos de uso cotidiano en zonas rurales y proporcinará una velocidad mínima de 500rpm en el generador.

El generador se parte de un motor asincrónico trifásico de 1kW al que se le convierte el rotor con imanes permanentes. Se obtendrá una señal alterna de frecuencia según la velocidad del agua y del rotor del generador que puede ser llevada a valores de la tensión del arreglo de baterías mediante transformador. Luego se rectifica y va a un regulador de tensión como los de automóvil para distribuir la energía entre la carga y las baterías. A la salida de las baterías habrá un interruptor termomagnético y luego la línea a las cargas que serán bombas con su tablero de comando.

4.- CONCLUCIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones:

El sistema propuesto de dos prototipos de turbinas hidrocinéticas es posible realizarlo con tecnología disponible en la zona de Santa Cruz. La tecnología de generador, multiplicador, Regulador de tensión, baterías y bombas centrífugas son se uso común en esta provincia. Se proveerá con dos juegos de aspas y además se capacitará a los habitantes que les interese el proyecto en su instalación y mantenimiento.

De esta manera podemos decir que autogeneración eléctrica mediante turbinas hidrocinéticas en la zona rural de Los Antiguos es posible, como así en muchas provincias argentinas ejemplo de ello es la provincia de Entre Ríos que cuenta con más de 7000 trazados hídricos de régimen autóctonos.

Luego de esta etapa de dimensionamiento y elección de perfiles se procederá a la construcción de los prototipos que permitirán mediante ensayos de sus rotores primero y del conjunto in situ después obtener parámetros escalables a aplicaciones más grandes, no solo fluviales sino marinas [7].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Uno de los problemas técnicos que se observan son que la colocación de la turbina en los canales de riego, puede producir un resalto aguas abajo, para un flujo super-crítico en un canal cuasi-rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia de fricción a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo.

4.2. Recomendaciones:

Para no producir erosiones por resalto en el canal, los prototipos podrían introducirse dentro de un deflector adaptado a las formas y dimensiones de cada una y del canal. Con este deflector además permitirá obtener un efecto Venturi incrementando la velocidad en la zona del rotor de la turbina, para obtener mayor potencia de salida y eficiencia del conjunto.

Hay que prever un sistema de reja o algo similar para evitar que cuerpos sólidos, algas, etc. interfieran con el funcionamiento de los prototipos o rompan, en el peor de los casos, alguna de sus partes.

Es de esperar que el costo de la implementación de la tecnología hidrocinética va caer en el futuro con una gran demanda a futuro de su aplicación y a vida estimada en 15 años. Podemos ver en la Figura 8 la evolución del precio de una Turbina hidrocinétca con un grupo electrógeno.

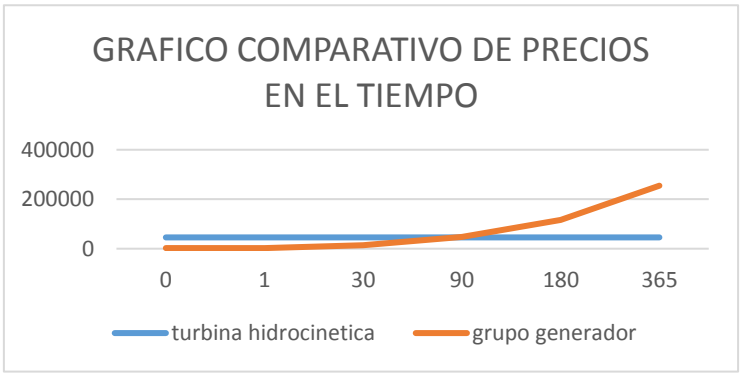


Figura 8.Costo comparativo entre una Turbina Hidrocinetica y un Grupo Generador

Si el costo inicial de una turbina hidrocinética de 1000W, es hoy de aproximadamente $ 45.650 y el de un grupo electrógeno de 950W, $ 2.500, al cual se le debe sumar el costo de combustible que es de 18.14 $/lt, con un consumo diario de 20 litros diarios, lo que hace un costo diario de $ 379, se puede decir aproximadamente que se recupera la inversión inicial a los 90 días como se muestra en el gráfico de la Figura 8. Si a esto es posible sumarle una financiación de 18 cuotas como cualquier electrodoméstico actual, habría que pagar $2536 mensuales durante un año y medio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Hay que considerar también que si el cost de las hidrocinéticas baja la cuota baja y por otro lado si se mantiene el crecimiento de los combustibles como hasta ahora el período de recuperación (90 días) decrece.

Es posible integrar la tecnología hidrocinética con otras tecnologías de suministro, sobre todo con energía eólica en la Patagonia en estudio de este trabajo, y con solar en la zona norte del país, logrando la composición de una mezcla generación, a lo cual lo denominamos hibrido.

REFERENCIAS:

[1] CAMMESA, 2014: Reporte anual de generación y Transmision del SADI, 2014, editado en noviembre del 2015, Pérez, Provincia de Santa Fe.

[2] Labriola 2004: “Estudio del Potencial Eólico de la Patagonia, Argentina”, trabajo solicitado por la Comisión de Energía de la Comunidad Económica Europea, en el ámbito del Congreso Mundial de Energía Renovable, Florencia, Italia.

[3] INDEC 2010: Censo Nacional del 2010, Instituto Nacional de Estadísticas y Censo. Informe editado en febrero del 2102

[4] PERMER 2014: Programa nacional de Energía Renovable y Uso Racional de la Energía 2014. Instalación de equipos Fotovoltaicos en la Provincia de Santa Cruz en combinación con el Institutor de Energía Provincial.

[5] Teoría de Betz, 1919: Teoría que obtiene el coeficiente teórico de extracción de potencia 16/27 basado en la teoría de Bernoulli antes y después de un rotor eólico.

[6] Kirs, Lagos, Labriola , 2007: “Turbina hidrocinética para ríos de la Patagonia”, trabajo presentado en HYFUSEN 2008, San Juan.

[7] PI 29 B 163, 2014-2017: Proyecto de Investigación: “Estudio de conversores hidrocinéticos para aplicaciones en la Patagonia, Argentina”, Director: MSC. Carlos Labriola, Unidad Académica Caleta Olivia, Universidad nacional de la Patagonia Austral, santa Cruz.

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - Republica Argentina

ILUMINACIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL EN EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES DE LA UNaF. MEDICIONES Y DIAGNÓSTICO SEGÚN NORMATIVA IRAM-AADL

MARTINA, Pablo[1] – CÓCERES, Héctor[2] - ALÍAS, Herminia[3]; - FLORES, María[4] - CORACE, Juan José[5] - ARCE, Jorge[6] - COMEZAÑA, Carlos[7]- RAFANIELLO CAPRA, José[8]

[1] y [5] Grupo de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (GIDER). Depto. de Termodinámica. Facultad de Ingeniería (FI) – Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Av. Las Heras Nº 727. Resistencia, Chaco. pablo@ing.unne.edu.ar

[2-4-6-7-8] Facultad de Recursos Naturales (FRN), Universidad Nacional de Formosa (UNaF). Av. Gutnisky 3200, Formosa. h_coceres@yahoo.com.ar mariafloresing@gmail.com

[3] Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU). Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Resistencia, Chaco. Av. Las Heras Nº 727. heralias2001@yahoo.com.ar

RESUMEN

Se exponen avances de un proyecto de investigación en desarrollo en la Universidad Nacional de Formosa (UNaF), tendiente a realizar una evaluación de la calidad ambiental del aire interior y del desempeño térmico - lumínico de los edificios más representativos del Campus de la UNaF, con miras a definir pautas institucionales para el Uso Racional de la Energía y para el saneamiento ambiental en su edificación. Tomado como caso el edificio de la Facultad de Recursos Naturales (FRN), se exponen los resultados de mediciones de niveles de iluminación interior (durante diciembre de 2014 y junio-julio de 2015) en una muestra de locales, y su posterior análisis y diagnóstico según la normativa vigente del IRAM-AADL J 20-06, para edificios escolares. Se registraron algunos problemas de disconfort lumínico y visual (niveles de iluminación bastante inferiores a los establecidos para las funciones de los espacios monitoreados, además de problemas de deslumbramiento), lo que está orientando la propuesta de medidas de adecuación. Considerando que la presencia de abundante luz natural en nuestra región posibilita la iluminación de los espacios interiores durante gran parte del día, sin necesidad de recurrir a la iluminación artificial, se verifica el desaprovechamiento de las posibilidades que brinda dicha iluminación natural, por lo que es posible implementar medidas de mejoramiento, a través del adecuado planteo de las aberturas de los locales, lo que redundaría en una disminución del consumo de electricidad. En el país existen varios equipos de investigación dedicados al estudio del desempeño integral de los edificios. Entre ellos merecen citarse, por la similitud climática en que se insertan los edificios estudiados, el de la cátedra *Estructuras II* de la FAU-UNNE, así como el *Grupo de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables*, de la FI-UNNE.

Palabras Claves: *edificios educativos – iluminación - mediciones - confort lumínico.*

Área Temática: Energía y Medio Ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de abundante luz natural en nuestra región nordeste argentina posibilita la iluminación de los espacios interiores durante gran parte del día, sin necesidad de recurrir a la iluminación artificial [1], o recurriendo a la misma sólo cuando la iluminación natural no está disponible, lo que redundaría en un uso menos intensivo de la iluminación artificial. El promedio mensual de irradiación solar global diaria en la ciudad de Formosa es de 6,5 KWh/m^2 en Enero y de 2,5 KWh/m^2 en Junio, mientras que la heliofanía efectiva promedio (horas de brillo solar) es de 7 horas en Diciembre y 5 horas en Junio [2]. Por otra parte, la heliofanía relativa en la ciudad de Formosa es de 59% en invierno y de 83% en verano [3]. Ante la necesidad de racionalizar y/o reducir el consumo de energía eléctrica, sin disminuir la calidad de las condiciones de habitabilidad de los espacios interiores de los edificios, se plantea la premisa de hacer un uso eficiente de la iluminación natural, en las horas en que la misma es posible, para poder así disminuir, todo lo que sea posible, la demanda de iluminación artificial. Esto se relaciona con la correcta orientación de las aberturas y paños vidriados, así como en la cuidadosa selección de su tipo y protecciones.

Se planteó la hipótesis según la cual los niveles de iluminación necesarios para el normal desarrollo de las actividades en los principales sectores del edificio de la Facultad de Recursos Naturales (FRN) de la Universidad Nacional de Formosa (UNaF) se alcanzan mediante un uso excesivo de dispositivos de iluminación artificial (lo que repercute en un consumo eléctrico intensivo), y por lo tanto desaprovechando las posibilidades de uso de la iluminación natural, en los horarios en que la misma es posible. Por lo tanto, la optimización del rendimiento lumínico, y por lo tanto energético, de los sectores principales del edificio de la FRN, con la obtención de los rangos y niveles que respondan a las normas técnicas vigentes, podrían alcanzarse mediante el adecuado aprovechamiento de la iluminación natural, a través del diseño, distribución y orientación de las aberturas y paños vidriados de las envolventes constructivas (y sus dispositivos de protección) de dicho edificio, y mediante la aplicación y adecuación a la normativa luminotécnica vigente.

En este marco, se comentan algunos resultados de un proyecto de investigación en desarrollo en la UNaF, titulado "*Determinación de las condiciones higrotérmico – lumínicas y de calidad del aire de edificios del campus de la UNaF. Diagnóstico en función de normativa de habitabilidad y URE*". Dicho proyecto está realizando una evaluación del desempeño higrotérmico - lumínico y de calidad del aire interior de los edificios más representativos del Campus de la UNaF, lo que permitiría definir premisas básicas para determinar políticas institucionales para el "Uso Racional de la Energía" y para el saneamiento ambiental en su edificación [4 a y b]. Se tomó como caso de análisis el edificio de la FRN, un edificio educativo, que, como tal, requiere de condiciones muy específicas de acondicionamiento lumínico. Se expone la metodología empleada para arribar a un diagnóstico de las condiciones de iluminación interior, natural y artificial, en el edificio, así como los resultados de las mediciones de los niveles estivales e invernales típicos de iluminación interior en

ISBN: 978-987-1676-63-7

una muestra de dos de los locales de este edificio, y su posterior análisis, para detectar su grado de ajuste a la normativa vigente del IRAM-AADL [5 a y b] para edificios escolares y también para detectar posibles factores que repercutan en un uso excesivo de energía eléctrica (para la iluminación artificial del edificio) y en la calidad que brindan los espacios.

2. EL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE RECURSOS NATURALES - UNaF



Figura 1: Fotos satelitales de la ciudad de Formosa (izquierda) y del Campus de la UNaF (centro). Se señala el edificio de la FRN (derecha).

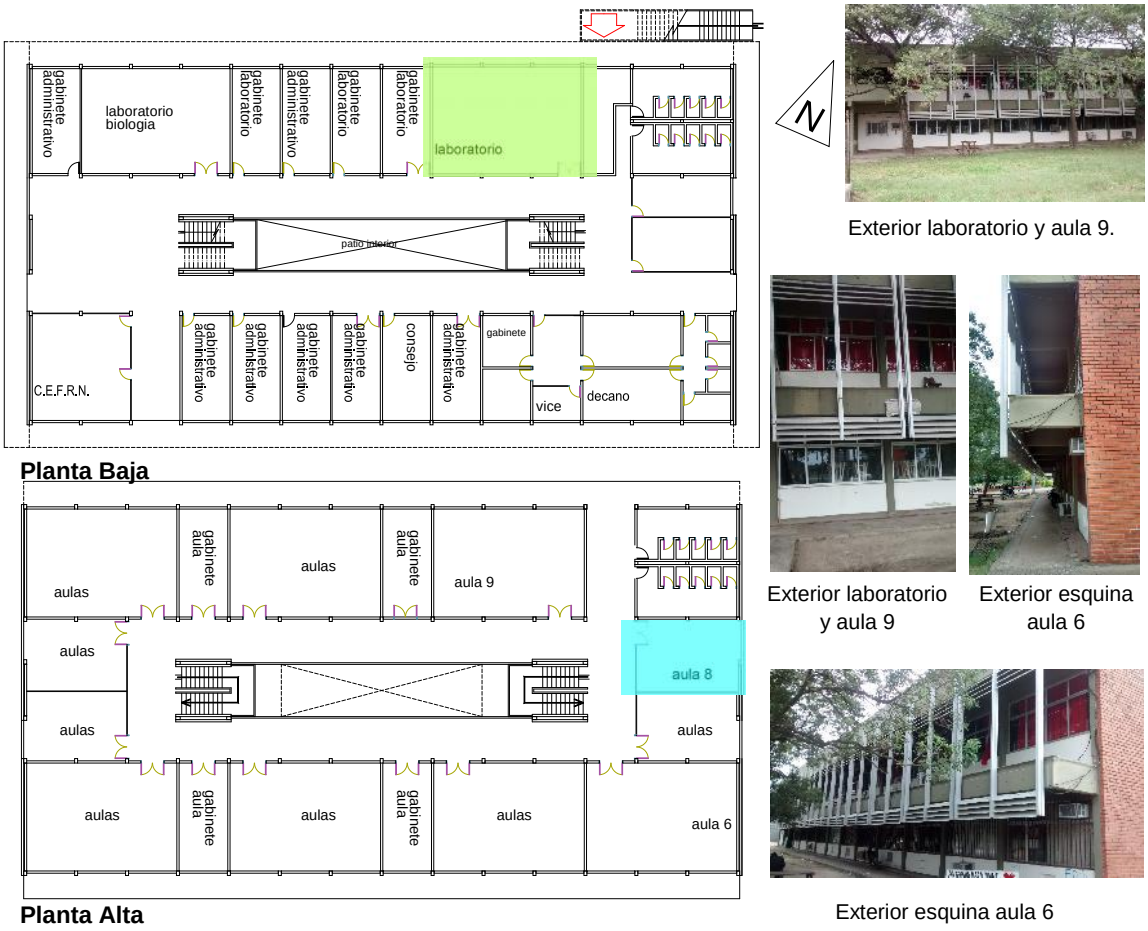


Figura 2: Esquemas en planta del edificio de la FRN (UNaF). En sombreado, los 2 locales definidos para el monitoreo lumínico: Aula 8 y Laboratorio. A la izquierda, fotografías exteriores del edificio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El edificio de la Facultad de Recursos Naturales (FRN) pertenece al Campus Universitario de la UNaF, de las avdas. Gutnisky y de Pueyrredón (Figura 1), en el sector sudoeste (SO) de la ciudad de Formosa (Latitud: 26,11°; Longitud: 58,12° Oeste; Altitud: 65 msnm), en un área urbana de media densidad. La UNaF, formada a partir del redimensionamiento de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), absorbió las sedes de ésta ubicadas en la provincia de Formosa, albergando actualmente las facultades de Ciencias de la Educación Agraria y de Recursos Naturales Renovables, así como profesorados y tecnicaturas dependientes de éstas. Se les sumaría una facultad de Humanidades y de Ciencias de la Administración y Económicas.

Para el desarrollo del monitoreo lumínico se seleccionaron dos locales del edificio de la FRN: uno de planta baja: el Laboratorio, y otro de planta alta: el Aula 8 (Figuras 2, 3 y 4), buscando incluir aquellos que resulten representativos de las distintas situaciones (ubicación, orientación, tecnología, aberturas, etc.), para lograr mayor posibilidad de generalización de los resultados.




Figuras 3, a y b: **Vistas del Aula 8.** Interiores.




Figuras 4 a y b: **Vistas del laboratorio**. Interior (izquierda) y exterior (derecha), con aberturas con parasoles metálicos.

3. ILUMINACIÓN DE EDIFICIOS ESCOLARES: NORMATIVA VIGENTE

3.1. Norma IRAM-AADL J 20-04: "*Iluminación en escuelas. Características":* establece que los requisitos básicos para lograr el máximo confort visual son: un correcto nivel de iluminancia, una buena distribución y un adecuado contraste de Iluminancias, Los requisitos referentes a la **iluminación natural** determinan que los valores del coeficiente de luz diurna (C.L.D.) media en un local sobre el plano de trabajo (horizontal, vertical o inclinado), serán los establecidos en la tabla 1. Cuando sea imposible obtener los valores de iluminancia natural fijados en la Tabla 1, la luz diurna se complementarà con **iluminación artificial**, cuyos valores medios de iluminancia (mínimos adecuados), medidos horizontalmente sobre el plano de trabajo, serán los fijados en la Tabla 2.

3.2. Norma IRAM-AADL J 20-05: "*Luminotecnia. Iluminación Artificial en Interiores. Características".* Contiene los requisitos generales para el diseño de iluminación interior.

3.3. Norma IRAM-AADL J 20-06: "*Luminotecnia. Iluminación artificial de interiores. Niveles de iluminación*". Establece el valor de la iluminación artificial para distintos tipos de locales, en función del destino y de la dificultad de la tarea visual a realizarse.

3.4. Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar del Ministerio de Educación de la Nación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1: Coeficientes de luz diurna. Fuente: Norma IRAM-AADL J 20-04 (1974).

Locales	Coeficiente de luz diurna (%)	Observaciones
Aulas de enseñanza general	2 (*)	La relación entre los valores de iluminación máximos y mínimos no excederá de 3 a 1. Las ventanas estarán colocadas de manera que los alumnos no estén enfrentados a ellas y reciban la luz del lado izquierdo.
Aulas de enseñanza especial (dibujo, dactilografía, etc.)	5 (*)	
Educación física	2 (*)	
Locales de habitación	-	Cumplirán con los requisitos dados para vivienda en la norma IRAM-AADL J 20-02
Escaleras	1	Se tendrá especial cuidado en evitar contrastes excesivos en la línea de huella de la escalera.

(*) Este valor se deberá cumplir aún en el lugar más desfavorable del local.

Tabla 2: Niveles de iluminancia. Fuente: Norma IRAM-AADL J 20-04 (1974).

Tipo de local	Valor medio de servicio de iluminancia (lux)
Aulas comunes (lectura y escritura)	500
Sobre pizarrón:	
Iluminación suplementaria	1000
Sala de lectura	400
Oficinas	500
Bibliotecas	400
Aulas especiales (trabajos prácticos)	750
Gimnasios	300
Natatorio:	
Iluminación general	300*
Vestuarios y baños:	
Iluminación general	100
Iluminación localizada	200**
Circulaciones	200
* Se recomienda iluminación subacuática de 200 lux	
** Iluminación sibre el plano vertical	
Laboratorio:	
Iluminación general	400*
Iluminación sobre el plano de lectura de aparatos	600
Enfermería:	
Iluminación general	400

* Las fuentes de luz a utilizar tendrán una buena reproducción de color.

4. MONITOREOS IN SITU DE NIVELES DE ILUMINANCIA

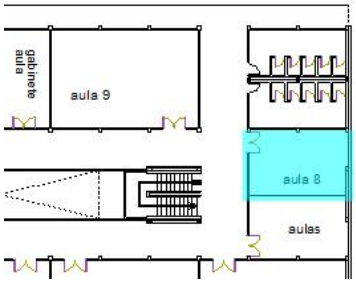
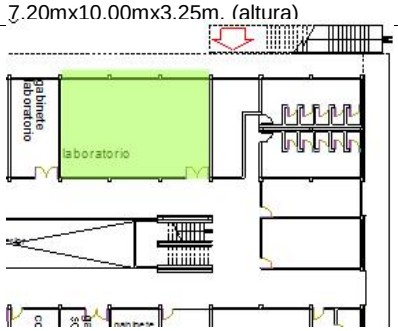
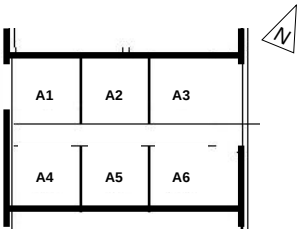
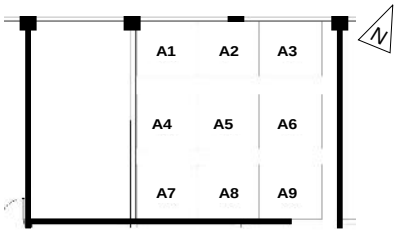
Las mediciones de iluminancia se realizaron en dos períodos: diciembre de 2014 (entre los días lunes 15 y viernes 19) y junio-julio de 2015 (entre los días lunes 29 de junio y viernes 03 de julio), con la intención de verificar el nivel de iluminación de los locales en los momentos del año donde el sol posee mayor y menor altura, respectivamente. Las mismas se realizaron en los horarios de uso habitual de los locales (entre las 8.00 hs. y las 18.00 hs.). El protocolo de monitoreo consistió en el registro de datos horarios, a través de mediciones con un multímetro digital, en puntos definidos de los locales (ver esquemas en Tabla 3: 6 puntos en el Aula 8 y 9 puntos en el Laboratorio) de: **A) Niveles de luz natural y B) Niveles de luz natural y artificial simultáneamente.** Los datos recogidos se tabularon en una planilla de Excel. Para la medición de iluminancias se utilizó un multímetro digital auto rango 5 en 1 - MS8229 – MASTECH, con foto detector (4000Lux/40000Lux±5.0%). La cantidad de puntos de medición en los locales seleccionados (tabla 3), se estableció en relación a las dimensiones de cada local, teniendo en cuenta que la totalidad de las mediciones debían ser ejecutadas con un solo instrumental y en un período corto de tiempo. El plano horizontal de las mediciones se estableció a 0,80 m. de altura desde el nivel de piso, altura que constituye el plano de trabajo establecido por la Norma IRAM AADL J 20-02.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Durante el monitoreo de verano los días fueron soleados, con cielo claro y presencia de algunas nubes, salvo el día 17/12, en que se registró cielo nublado y abundantes lluvias. El monitoreo invernal coincidió con días de cielo claro, a excepción de los días 02/07 y 03/07, en que la nubosidad fue abundante, continua y homogénea durante todo el horario de luz diurna.

En la Tabla 3 se expone un relevamiento técnico – constructivo de los dos locales seleccionados para el monitoreo lumínico del edificio de la FRN.

Tabla 3: Características de los locales de la FRN (UNaF) en los que se realizó el monitoreo lumínico: Aula 8 y Laboratorio. Esquemas de ubicación de los puntos para realizar las mediciones.

LOCALES MONITOREADOS	**AULA 8**	**LABORATORIO DE FÍSICA Y QUÍMICA**
Ubicación	planta alta	planta baja
Dimensiones	4,80mx6,70mx3,25m (altura)	7,20mx10,00mx3,25m. (altura)
Esquema de implantación de los locales seleccionados, en el edificio de la FRN		
Techos	Azotea losa alivianada de hormigón.	Entrepiso losa de hormigón armado
Sup. de techo expuesta al ext. (m^2)	32,16	----------.
Muros exteriores	Ladrillos huecos revocados exterior e interiormente. Espesor = 0,15m.	
Sup. de muro expuesta al exterior (m^2)	19,47	14,10
Carpinterías	Ventanas marco aluminio natural y vidrio simple, sin protección exterior.	Ventanas marco aluminio natural y vidrio simple, con parasolado exterior.
Orientación	Noreste - NE	Noroeste - NO
Sup. vidriada (m^2)	1,00	16,45
Luminarias		
Tipo	Fluorescentes de aplicar (0,32x1,24 m)	Fluorescentes de aplicar (0,32x1,24 m)
Cantidad	6	8
Distribución	Filas paralelas al pizarrón	Filas paralelas al pizarrón
PERÍODO DE MONITOREO LUMÍNICO: 15/12/2014 al 19/12/2014 y 29/06/2015 al 03/07/2015		
Ubicación de los puntos de medición, en planta de los locales		

5. MONITOREO ESTIVAL

Los resultados obtenidos revelaron dos situaciones diferenciadas, en cuanto al nivel de iluminación registrado en los dos locales, especialmente en cuanto a la iluminación natural, dependiendo

ISBN: 978-987-1676-63-7

exclusivamente esta circunstancia de la orientación de las ventanas y al hecho de que las mismas cuenten o no con protección exterior para la radiación solar:

En el aula 8 (figura 5), considerando **la iluminación natural** solamente, se registraron picos máximos de entre 1200 y casi 1800 lux (los valores más altos de las series consideradas), solamente para uno de los puntos de medición: el A3 (ver tabla 3), que recibe radiación solar directa a través de las aberturas al NE. Esta situación acontece en horario matutino, entre las 8 y las 11 hs, en que la inclinación del sol hace que el ingreso de la radiación por las aberturas resulte muy directo en este punto (aunque dichas aberturas son muy pequeñas en relación a las dimensiones del local -ver Tabla 3- pero no poseen protección exterior). Pero a partir de las 15 ó 16 hs. el nivel de iluminación natural decae abruptamente, para registrarse valores muy por debajo de lo requerido por la normativa: apenas se registran picos de 500 lux en los puntos A2 y A1, en tanto que en los restantes puntos las máximas obtenidas se acercan a los 300 lux. Cabe destacar que los niveles de iluminación para todos los puntos de medición, salvo el A3, resultan en promedio de 300 lux. Considerando la **iluminación natural y la artificial combinadas**, la situación se mantiene casi idéntica, aunque los valores se hallan levemente incrementados respecto a la situación de iluminación natural exclusiva. Igualmente, salvo los picos matutinos de excesivo deslumbramiento, la situación general se encuentra muy deficitaria respecto a los valores exigidos por normativa. Para ambas situaciones, la situación más deficitaria se da, lógicamente, para el día nublado y de abundantes lluvias (17/12), en que los valores de iluminación natural no superan los 100 lux, salvo para el punto A3 (alcanzan los 200 lux) que se superan levemente con el aporte de iluminación artificial.

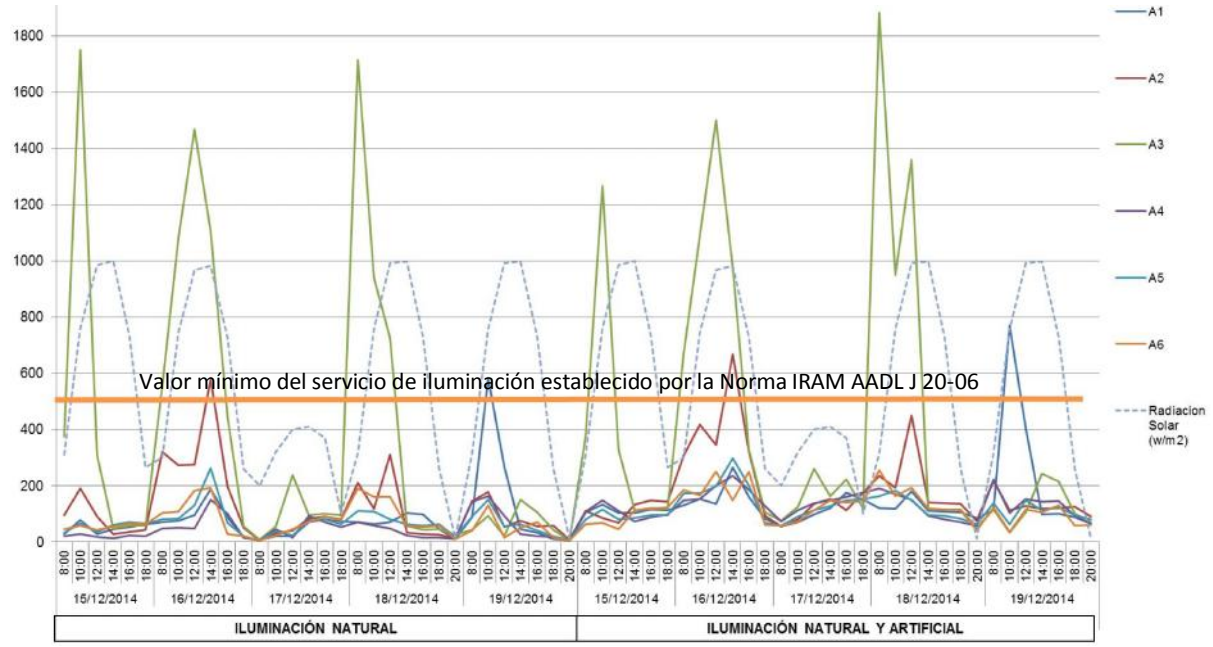


Figura 5: Resultados de las mediciones de verano en el Aula 8.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En el laboratorio (figura 6), considerando **la iluminación natural** solamente, en términos generales, los niveles registran valores muy inferiores a los establecidos por la Norma IRAM AADL J 20-06. Casi no se superan los 200 lux de máximas, en horas de la mañana (entre las 8 y las 12 hs. aprox.), con valores medios que no superan los 90 lux. Considerando la **iluminación natural y la artificial combinadas** se produce una mejora por el incremento general y uniforme de los valores medios registrados, que alcanzan así los 200 lux. Una situación notoria y excepcional se registró el día 16/12, tanto para la situación de iluminación natural como para la artificial: se registraron picos de entre 700 y 900 lux, únicamente para los puntos A1, A2 y A3, que son los que definen una línea paralela al muro que contiene las ventanas de este local, a unos 0,50 cm. de distancia del mismo. Dado que los valores de radiación solar exterior durante éste día permanecieron casi sin variantes respecto a los días previos y respecto a los días posteriores al 17/12 (que sin embargo no registraron estos picos de iluminación interior, sino más bien picos cercanos a los 300 lux), se estima que esta situación se debió a las **pautas de comportamiento de los usuarios durante este día, con apertura total de las cortinas protectoras interiores.**

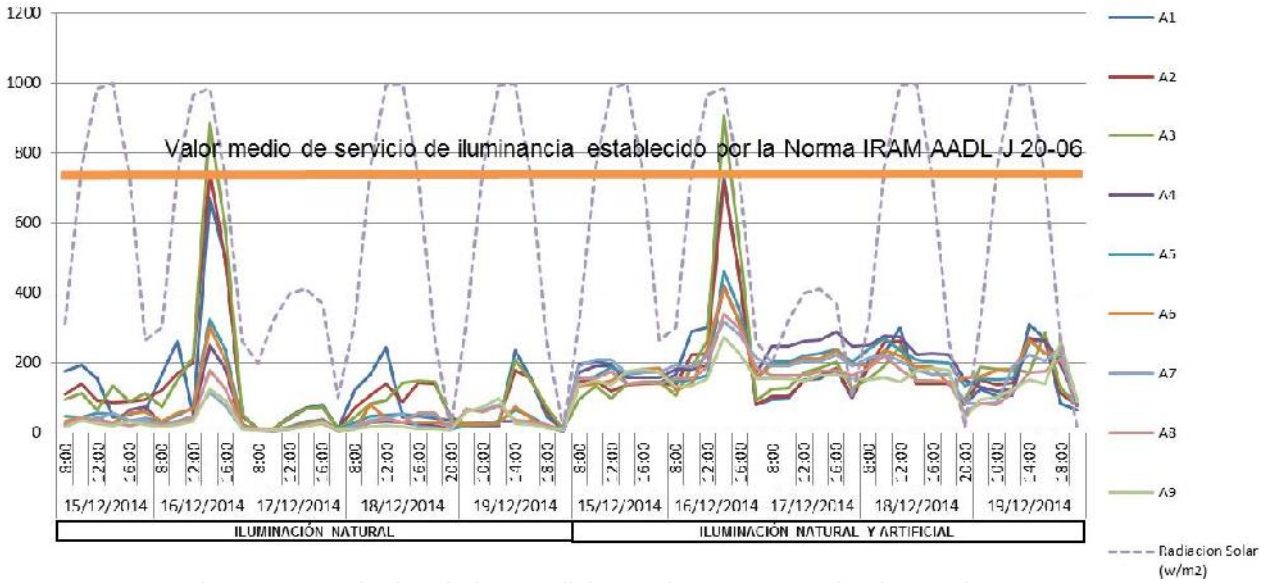


Figura 6: Resultados de las mediciones de verano en el Laboratorio.

Iluminaciones promedio: naturales y naturales + artificiales: La iluminación natural no llega a cumplir con el mínimo establecido por las Normas IRAM-AADL 20-04 y 20-06 en ninguno de los dos locales monitoreados, salvo durante los picos extremos registrados en ciertos puntos aislados de medición, que registraron ingreso de radiación solar directa puntual. **En el aula 8** (figura 7), los promedios de **iluminación natural** rondan los 100 lux, en tanto que para la **iluminación natural y artificial combinadas** apenas se acercan a los 170 lux, con las particularidades impuestas por el exceso de entrada de radiación directa focalizada y puntual (que genera un nivel interior de iluminación en el punto A3, de 680 lux) en horas de la mañana, a través de la pequeña ventana ubicada a aprox. 1,60m. de altura y orientada al NE, sin protección exterior de la radiación. Los

ISBN: 978-987-1676-63-7

niveles registrados son mayores en horas de la mañana, dada la orientación de la ventana al NE Los promedios de **iluminación natural y artificial combinadas** rondan los 170 lux. **En el laboratorio** (figura 8), los promedios de **iluminación natural** rondan los 90 lux, en tanto que para la iluminación natural y artificial combinadas se duplican, con las particularidades impuestas por orientación de las ventanas al NO (que genera un nivel interior de iluminación mayor en los puntos ubicados en las proximidades de las ventanas: A1, A2 y A3) en horas de la tarde. Los promedios de **iluminación natural y artificial combinadas** rondan los 190 lux.

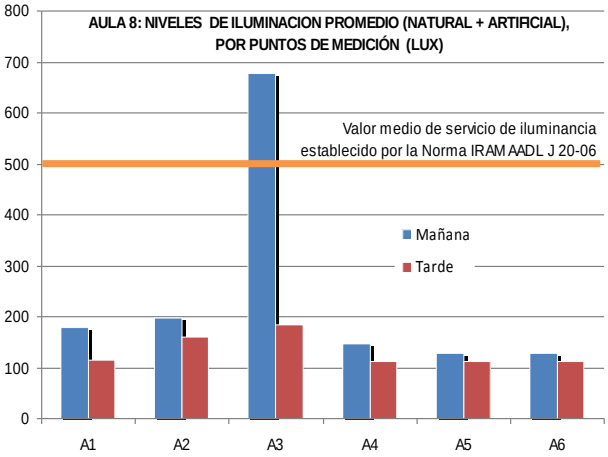


Figura 7: Niveles promedio de iluminación natural y artificial combinadas, en el Aula 8 en verano.

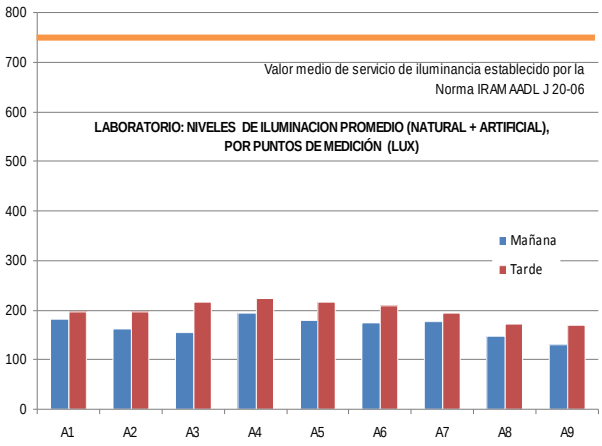


Figura 8: Niveles promedio de iluminación natural y artificial combinadas, en el Laboratorio en verano.

6. MONITOREO INVERNAL

Los resultados obtenidos muestran, al igual que los de verano, dos situaciones diferenciadas en cuanto al nivel de iluminación registrado en los dos locales, según la orientación de las ventanas de los mismos, especialmente en cuanto a la iluminación natural. **En el aula 8** (figura 9), considerando la **iluminación natural** solamente, se registraron picos máximos de entre 450 y casi 830 lux (los valores más altos de las series consideradas, aunque equivalentes a la mitad de los valores obtenidos para el mismo punto y horario durante el monitoreo de verano), solamente para uno de los puntos de medición, el A3 (ver tabla 3), que recibe radiación solar directa a través de las ventanas al NE (sin protección exterior). Esta situación se verifica en horario matutino, entre las 10 y las 12 hs. (en que la inclinación del sol hace que el ingreso de la radiación por las aberturas resulte muy directo en este punto), y solamente para los días de cielo claro y sin nubosidad (29/06 al 30/06). Para los días de cielo nuboso, con iluminación exterior más difusa (01/07 al 03/07), en cambio, resulta máxima la intensidad de iluminación en el punto A6 (en niveles casi iguales a los obtenidos en el punto A3 durante los días de cielo claro). A partir de las 15 ó 16 hs. el nivel de iluminación natural decae abruptamente, en cualquier condición de cielo. En todos los casos, salvo por los picos máximos que registran en horario matutino los puntos A3 y A6 (ubicados en el frente del aula, en cercanías de las ventanas), en el resto de los puntos de medición se registran valores

por debajo de los 500 lux requeridos por la normativa (entre 30 y 400 lux), correspondiendo los niveles más bajos (30 lux) a los puntos del fondo del aula (A1, A5 y A4), más alejados de las ventanas. Considerando la **iluminación natural y la artificial combinadas**, la situación se mantiene casi idéntica, aunque los valores se hallan levemente incrementados (unos 70 – 80 lux) respecto a la situación de iluminación natural exclusiva. Al igual que para verano, y salvo los picos matutinos de excesivo deslumbramiento, especialmente en el punto A3, la situación general se encuentra muy deficitaria respecto a los valores exigidos por normativa.

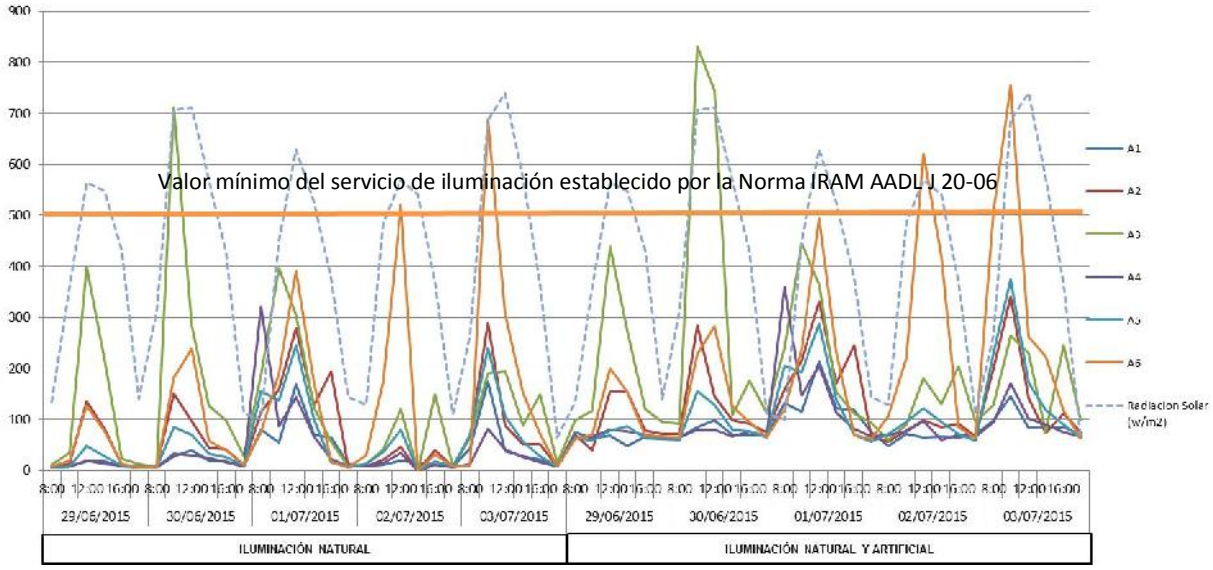


Figura 9: Resultados de las mediciones de invierno en el Aula 8.

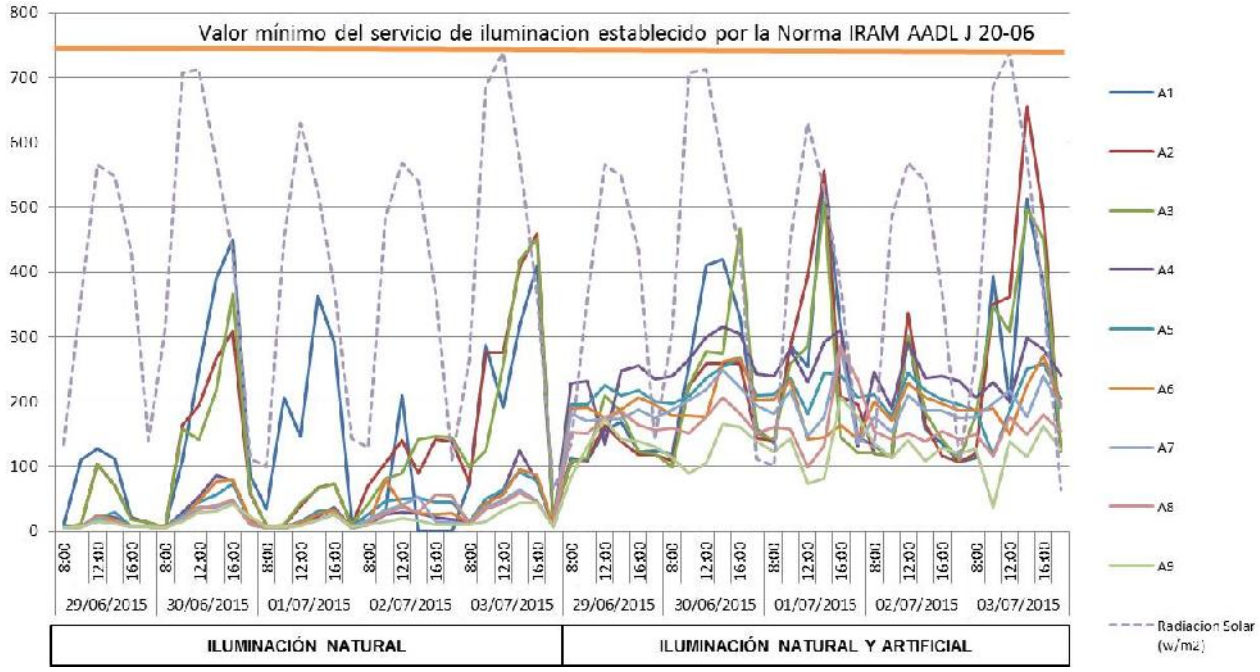


Figura 10: Resultados de las mediciones de invierno en el Laboratorio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En el laboratorio (figura 10), con ventanas al NO (protegidas externamente por parasoles) considerando **la iluminación natural** solamente, en términos generales, los niveles de iluminancia se encuentran en valores muy inferiores a los establecidos por la Norma IRAM AADL J 20-06. Se llega a los 650 lux de máximas, en horas de la siesta (a partir de las 13 y 14 hs. aprox.), con valores medios que no superan los 150 lux. Los valores máximos se registran en los puntos A1, A2 y A3, ubicados junto a las ventanas (definen una línea paralela al muro que contiene las ventanas de este local, a unos 0,50 cm. de distancia del mismo: ver esquema en tabla 3). Considerando la **iluminación natural y la artificial combinadas** se produce una mejora por el incremento general y uniforme de los valores medios registrados, que alcanzan así los 250 lux.

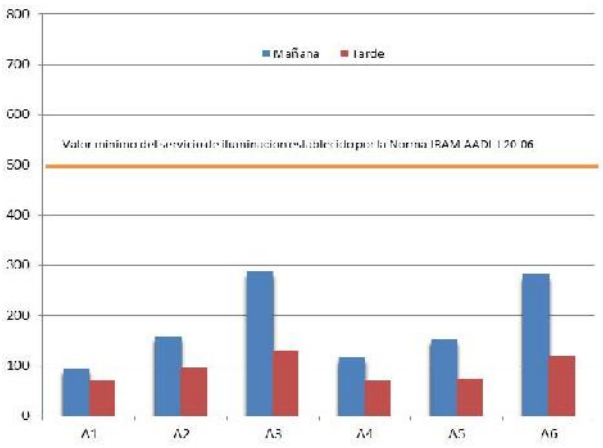


Figura 11: Niveles promedio de iluminación natural y artificial combinadas, en el Aula 8 en verano.

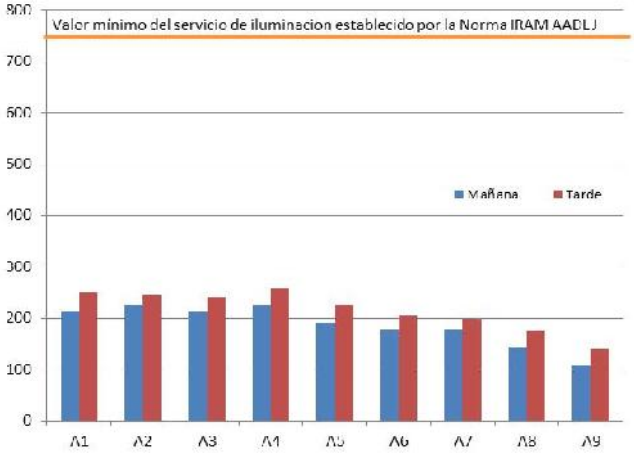


Figura 12: Niveles promedio de iluminación natural y artificial combinadas, en el laboratorio en verano.

Iluminaciones promedio: naturales y naturales + artificiales: La iluminación natural no llega a cumplir con el mínimo establecido por las Normas IRAM-AADL 20-04 ni 20-06 en ninguno de los dos locales monitoreados (figuras 11 y 12). **En el aula 8**, los promedios de **iluminación natural** (que aumentan en el horario matutino, por la orientación de las ventanas de este local al NE), rondan los 100 lux por la mañana y los 40 lux por la tarde, en tanto que se duplican para la **iluminación natural y artificial combinadas** (figura 11), alcanzando los 200 lux por la mañana y los 80 lux por la tarde, con las particularidades impuestas por el exceso de entrada de radiación directa focalizada y puntual (que genera un nivel interior de iluminación en el punto A3, de 280 lux) en horas de la mañana, a través de la pequeña ventana ubicada a aprox. 1,60m. de altura y orientada al NE, sin protección exterior de la radiación. **En el laboratorio** (figura 12), los promedios de **iluminación natural** rondan los 40 lux, en tanto que para la iluminación natural y artificial combinadas se duplican, con las particularidades impuestas por orientación de las ventanas al NO (que genera un nivel interior de iluminación mayor en los puntos ubicados en las proximidades de las ventanas: A1, A2 y A3) en horas de la tarde. Los promedios de **iluminación natural y artificial combinadas** rondan los 110 lux, casi la mitad de los obtenidos para verano.

7. CONCLUSIONES

ISBN: 978-987-1676-63-7

Habiéndose realizado un monitoreo de las condiciones lumínicas en dos locales del edificio sede de la Facultad de Recursos Naturales de la Universidad Nacional de Formosa (FRN – UNaF), durante un período del mes de Diciembre de 2014 y otro período de los meses de Junio-Julio de 2015, se han obtenido resultados que determinan un **desempeño lumínico deficiente en dichos locales, tanto referido a la iluminación natural como a la artificial combinada con la natural**, según el rango impuesto por normativa IRAM AADL J 20-04, vigente para edificios educativos. La iluminación natural, que resulta altamente dependiente de la orientación de las áreas acristaladas, no resulta uniforme en los locales monitoreados (ni para el período cálido ni para el frío, según los resultados obtenidos), ya que en todos los casos se verifican niveles muy superiores en las cercanías a los aventanamientos, que disminuyen bruscamente al alejarse de los mismos. Cuando la iluminación natural y la artificial son utilizadas de manera simultánea, el nivel de iluminación general de los locales resulta sólo levemente superior, y la uniformidad de iluminación en los locales mejora. Se registran problemas de deslumbramiento en puntos específicos (como el punto A3, del Aula 8, que presenta entrada directa de radiación en horas de la mañana, y los puntos A1, A2 y A3 del Laboratorio, ubicados junto a las ventanas, que reciben mucha radiación en horas de la tarde), tanto en invierno como en verano. En general, los niveles de iluminancia promedio resultan, en invierno, un 35 a 45% menores respecto a los de verano. Este diagnóstico está orientando actualmente la propuesta de medidas de adecuación. Se verifica el desaprovechamiento de las posibilidades que brinda la iluminación natural y se evidencia la necesidad de implementar medidas de mejoramiento, a través del adecuado planteo de las aberturas de los locales y de sus dispositivos de regulación - protección.

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1] PIVIDORI, V. et al, *Condiciones de iluminación natural y artificial en el edificio de la Facultad de Arquitectura de la UNNE. Monitoreo para su diagnóstico según normativa vigente.* Actas de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 2013 (ASADES). Vol. 1, pp. 05.11 - 05.20, 2013.

[2] ALDAR S.A. *Atlas de Energía solar de la República Argentina* (elaborado por Hugo Grossi Gallegos y Raúl Righini, DEL Grupo de Estudios de la Radiación Solar – GERSolar- de la Universidad Nacional de Luján). Disponible en http://www.aldar.com.ar/novedades-atlas-solar.php. Consultado el 09/05/16.

[3] NORMA IRAM 11603: *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Buenos Aires, Argentina, 2012.

[4 a] MARTINA, P. et al, *Mediciones de algunos parámetros higrotérmicos y ambientales en el edificio de la Facultad de Recursos Naturales de la Universidad Nacional de Formosa*. Revista del Instituto de Matemática, Nº 19, Año 10. Facultad de Ingeniería - UNNE. ISSN 1850-9827. Pp. 8-17, 2014.

[4 b] MARTINA, P. et al, *Niveles de iluminación en edificios de la Universidad Nacional de Formosa. monitoreos y diagnóstico según normativa IRAM-AADL"*. Libro del VII Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura. (CRETA). ISBN N°978-987-29907-4-9. Junio de 2015. Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del Nordeste.

[5 a] NORMA IRAM-AADL J 20-06: *Luminotecnia. Iluminación artificial de interiores. Niveles de iluminación.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL). Buenos Aires, Argentina, 1972.

[5 b] NORMA IRAM-AADL J 20-04 (1974*): Iluminación en escuelas. Características.* Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), Asociación Argentina de Luminotecnia (AADL). Buenos Aires, Argentina, 1974.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

CONSUMO DE BIOMASSA DURANTE QUEIMA CONTROLADA DE FLORESTA TROPICAL

Simone S. Amaral [1], João A. Carvalho Jr. [1], Turíbio G. Soares Neto [2], Maria A. M. Costa[3], y José C. Santos [2]

[1] Departamento de Energia – Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, Guaratinguetá, Brasil
correo-e: simonesimoessi@gmail.com, joao.a.carvalho.jr@pq.cnpq.br
[2] Laboratório Associado de Combustão e Propulsão – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Rodovia Presidente Dutra km 39, Cachoeira Paulista, Brasil
correo-e: turibio@lcp.inpe.br, jcarlos@lcp.inpe.br
[3] Departamento de Bioquímica e Tecnologia Química – Universidade Estadual Paulista (Unesp)
Av. Prof. Francisco Degni 55, Araraquara, Brasil

RESUMO

A estimativa do consumo de biomassa, em queimadas florestais, é um dos métodos utilizados para quantificação das emissões de carbono. No entanto, ainda existem inúmeras incertezas associadas à quantidade de biomassa consumida nos diversos ecossistemas. Assim, o objetivo deste trabalho foi quantificar o consumo de biomassa durante queima controlada de floresta tropical. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com valores encontrados na literatura e discussões sobre o consumo de biomassa foram apresentadas. O experimento de queima foi conduzido na cidade de Candeias do Jamari, estado de Rondônia, Brasil. Em uma área de 2,25 ha, toda a vegetação foi inventariada, cortada e submetida à queima. A quantidade de biomassa por hectare foi medida por métodos indiretos, com a aplicação de fórmulas envolvendo parâmetros conhecidos do inventário florestal. O consumo de biomassa foi estimado para o material fino (combustível com diâmetro menor que 10 cm) e material grosso (combustível com diâmetro maior que 10 cm). Para o material fino, o consumo foi calculado em 12 áreas 2x2 m^2. O consumo para o material grosso foi estimado pela medição das dimensões de 10% dos troncos inventariados. O consumo da biomassa durante a queima de floresta tropical foi de 94,6% e 16,0%, para o material fino e grosso, respectivamente. O consumo do material grosso pareceu não ser influenciado apenas pelo diâmetro do tronco das árvores. Fatores como a distribuição da vegetação na floresta, antes e após o seu corte, podem ter alterado o processo de queima e, consequentemente, podem alterar a emissão de poluentes para a atmosfera.

Palavras Chaves: *Queimadas florestais; Consumo de biomassa; Emissões de carbono.*

1. INTRODUÇÃO

A floresta Amazônica é um dos maiores reservatórios de carbono no ecossistema terrestre [1]. Segundo [2], este ecossistema armazena em torno de 150-200 Pg de C, que está disponível na biomassa viva e no solo. A floresta Amazônica representa um terço das florestas tropicais do mundo [3] e contém 13,0% da biota mundial [4].

Apesar da importância da floresta Amazônica, sua queima tem sido uma prática comum e contribui significativamente para a liberação de gases e partículas na atmosfera [5]. Na bacia Amazônica, agricultores tem utilizado o fogo como uma técnica para estabelecer e manter as pastagens. Para [2] e [6], a floresta Amazônica pode se tornar uma fonte líquida de carbono atmosférico, perdendo sua função como um sumidouro deste elemento, devido aos efeitos combinados de seca e incêndios frequentes.

A quantificação das emissões, provenientes das queimadas florestais, é essencial para prever os seus impactos sobre o meio ambiente [7,8]. Além disso, a redução das emissões de carbono pode ser uma importante estratégia para minimizar as mudanças no clima [9,10].

Emissões de CO_2 e CO podem ser estimadas pela quantificação do carbono contido na biomassa acima do solo, utilizando a técnica conhecida como inventário florestal [10].

Vários estudos sobre os incêndios florestais e o consumo de biomassa, relacionados às emissões de carbono, vem sendo desenvolvidos durante as últimas duas décadas [7, 8, 11-15]. No entanto, ainda existem inúmeras incertezas associadas à quantidade de biomassa consumida nos diversos ecossistemas. Para [16], um maior número de inventários florestais deve ser realizado, para tornar o mapeamento de carbono, em florestas tropicais, amplamente disponível e confiável.

Assim, o objetivo deste trabalho foi quantificar o consumo de biomassa, durante queima controlada de floresta tropical. Um esforço adicional foi depositado na determinação do consumo de troncos, uma vez que esta categoria de combustível concentra a maior parte da biomassa disponível para queima.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. METODOLOGIA

2.1. Local do experimento

O experimento de queima foi realizado na cidade de Candeias do Jamari, estado de Rondônia, Brasil (Figura 1). Em Candeias do Jamari, o experimento foi conduzido em uma área quadrada de 2,25 ha. Nesta área, toda a vegetação foi inventariada, cortada e submetida à queima. No entanto, dados de consumo foram determinados apenas para o hectare central. O experimento de queima foi realizado no ano de 2014.

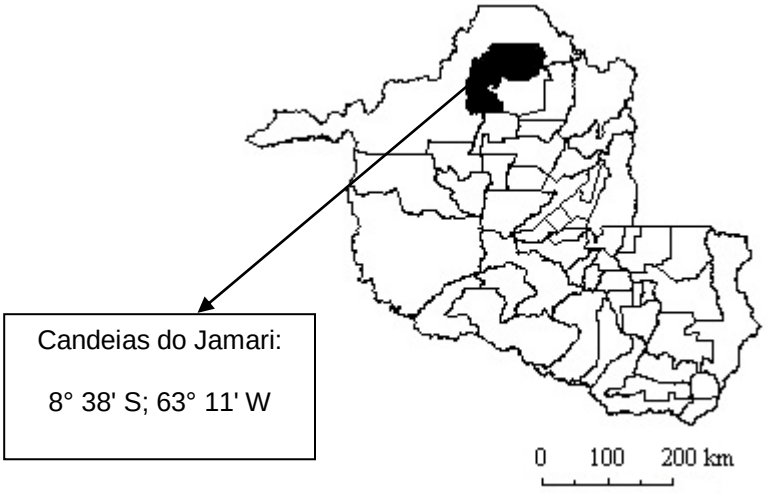


Figura 1: Cidade de Candeias do Jamari: local onde a queima foi realizada.

A floresta, no estado de Rondônia, é caracterizada como tropical úmida, e a atual cobertura de terra inclui pastagens e florestas secundárias. O clima da região é tropical úmido, tipo Aw na classificação de Köppen [17]. O estado de Rondônia está localizado entre as latitudes de 07°55' e 13°41' S e a longitudes de 59°51' e 66° 15' W. A taxa de precipitação anual é de 2300 mm ano^{-1}, e a estação chuvosa ocorre de novembro a abril [18].

2.2. Estimativa do consumo de biomassa

O consumo total de biomassa foi estimado a partir de duas categorias de combustíveis: biomassa grossa (DAP > 10 cm) e biomassa fina (DAP < 10 cm e liteira).

2.2.1 Consumo para biomassa grossa (DAP > 10 cm)

O primeiro passo, ao determinar o consumo para biomassa grossa (DAP > 10 cm), foi a realização de um inventário florestal no hectare central. Durante o inventário, cada amostra teve suas principais características medidas (diâmetro à altura do peito, altura do tronco, e altura do dossel).

Para estimar a biomassa fresca com DAP > 10 cm foi utilizada a Equação alométrica definida por [19]:

$$PF = \Sigma \exp [3{,}323 + 2{,}546 \ln (DAP)] \quad (1)$$

Em que: PF- é o peso fresco (t); DAP- é o diâmetro à altura do peito (m).

Logo após a realização do inventário, a floresta foi cortada. A atividade de derrubada das árvores foi realizada no mês de abril. A queima ocorreu no final de agosto, quando a vegetação estava suficientemente seca.

O consumo foi estimado com base no procedimento descrito por [20], que envolveu a determinação do volume, antes e após a queima, de troncos selecionados aleatoriamente. O esquema utilizado para o cálculo do consumo pode ser visualizado na Figura 2.

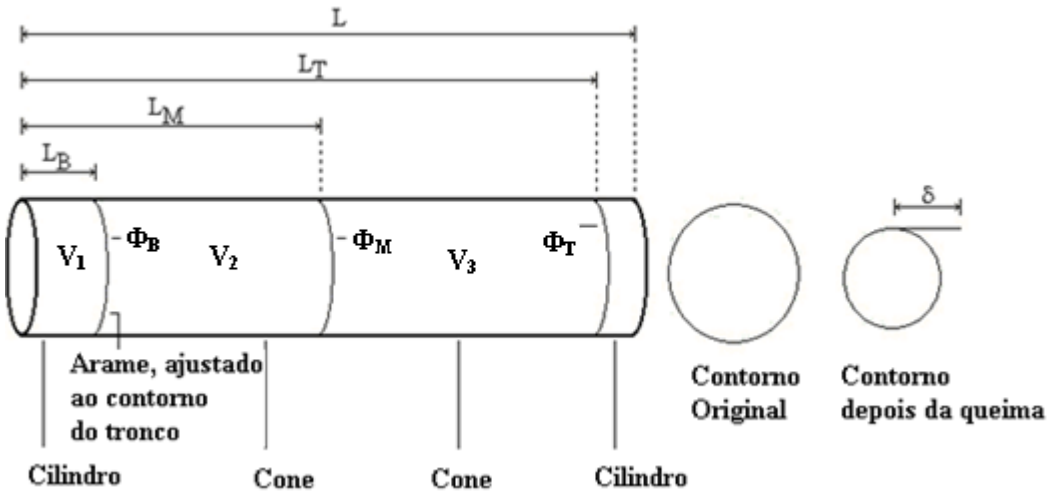


Figura 2: Esquema do tronco utilizado para cálculo do consumo.

O procedimento experimental consistiu na seleção e identificação de um total de 64 árvores no hectare central. Antes da queima, um arame foi preso na base, meio e topo do tronco das árvores, envolvendo toda a sua circunferência. Após a queima, os troncos foram encontrados com auxílio de um GPS. Os arames, que haviam sido colocados nos troncos, foram esticados e, devido ao consumo da biomassa, houve um deslocamento dos mesmos (δ). O deslocamento de cada arame permitiu o cálculo do diâmetro da seção queimada pelo fogo, para todo o comprimento do tronco.

O diâmetro do tronco após a queima (regiões 1, 2 e 3), utilizado para o cálculo do volume, foi determinado pela Equação 2.

$$\emptyset_{após} = \frac{(2\pi.\emptyset_{antes} - \delta)}{2\pi} \quad (5)$$

O volume para a biomassa com DAP > 10 cm foi calculado considerando que o tronco era composto por dois cones e dois cilindros. Assim, o volume total foi calculado pela soma das Equações 3, 4 e 5.

$$V_1 = \pi \left(\frac{\emptyset_B}{2}\right)^2 L_B \quad (3)$$

$$V_2 = \frac{\pi}{12}\left(\left(\emptyset_B{}^2 + \emptyset_B \emptyset_M + \emptyset_M{}^2\right)\left(L_M - L_B\right)\right) \quad (4)$$

$$V_3 = \frac{\pi}{12}\left(\left(\emptyset_M{}^2 + \emptyset_M \emptyset_T + \emptyset_T{}^2\right)\left(L_T - L_M\right)\right) \quad (5)$$

Em que: $V_1, V_2 e\ V_3$- representam o volume (m^3) da região 1, 2 e 3, respectivamente; $\emptyset_B, \emptyset_M$ e $\emptyset_T$- representam os diâmetros (m) da base, meio e topo do tronco, respectivamente; L_B, L_M e L_T- representam o comprimento (m) da região 1, 2 e 3, respectivamente; $\emptyset_{após}$ e $\emptyset_{antes}$- representam o diâmetro (m) das regiões do tronco, antes e após a queima, respectivamente; δ- representa o deslocamento do arame (m).

O volume consumido foi determinado pela diferença entre o volume total antes da queima e o volume total após a queima.

A execução do inventário florestal, bem como os métodos de consumo de biomassa, seguiram as metodologias descritas por [7,8] e [14].

2.2.2 Consumo para biomassa fina (DAP < 10 cm e liteira)

Para determinar o consumo da biomassa com diâmetro inferior a 10 cm, a área central de queima foi dividida em três transectos defasados 120°. O ponto de início, para definição dos transectos, foi selecionado aleatoriamente. Cada transecto foi composto por 4 subáreas de 2x2 m^2, totalizando 12 subáreas, conforme ilustrado na Figura 3.

A análise da biomassa fina, com DAP < 10 cm, incluiu o estudo de folhas, pequenos arbustos e galhos, liteira e lianas. A estimativa do consumo da biomassa fina foi realizada através de pesagem, antes e após a queima. A pesagem ocorreu apenas nas biomassas dispostas nas 12 subáreas dos transectos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

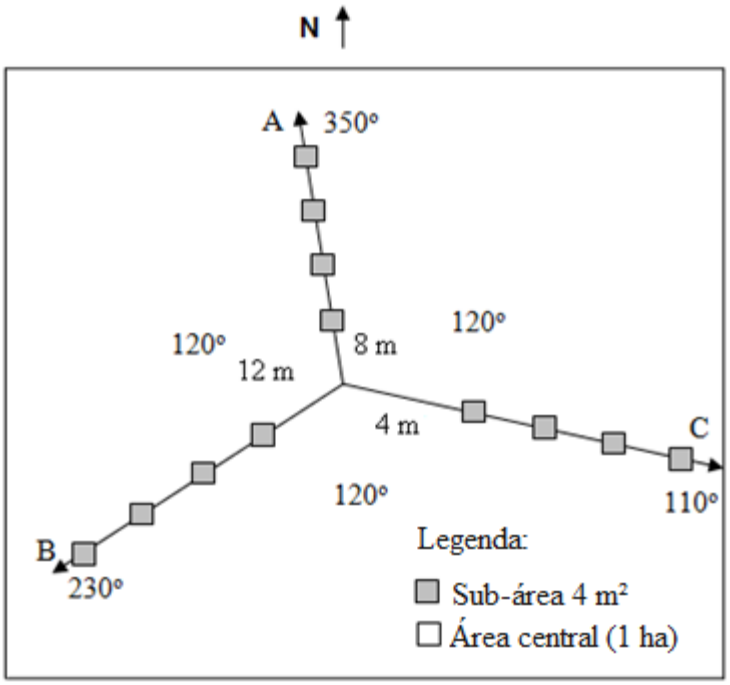


Figura 3: Localização das 12 subáreas “2x2” m^2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Consumo para biomassa grossa (DAP > 10 cm)

Os principais resultados do inventário florestal, referentes à biomassa grossa (DAP > 10 cm), foram apresentados na Tabela 1 e Figura 4.

O número de indivíduos no hectare central foi 595. A biomassa fresca total, para a classe com DAP > 10 cm, calculada através da Equação (1), foi 608,3 t ha^{-1}. Dos 595 indivíduos inventariados, 408 pertenciam à classe com DAP entre 10 e 20 cm, e representaram 12,7% da massa fresca total. Indivíduos de maior diâmetro (DAP entre 85 e 95 cm) representaram apenas 3,1% da massa total.

Tabela 1. Resultados do inventário florestal no hectare central.

Diâmetro (cm)	Classe	Indivíduos	Massa (t)	Massa (%)
10 – 15	10	281	34,9	6
15 – 20	15	127	42,4	7
20 – 25	20	74	48,3	8
25 – 30	25	43	46,8	8
30 – 35	30	21	34,6	6
35 – 40	35	15	35,7	6
40 – 45	40	9	28,8	5
45 – 50	45	7	31,2	5
50 – 55	50	1	6,0	1
55 – 60	55	2	14,9	2
60 – 65	60	3	25,9	4
65 – 70	65	2	20,8	3
70 – 75	70	1	13,3	2
75 – 80	75	3	44,6	7
80 – 85	80	2	35,1	6
85 – 90	85	1	18,9	3
90 – 95	90	0	0,0	0
95 – 100	95	1	25,0	4
> 100	100	2	101,0	17
Total	_	595	608,3	_

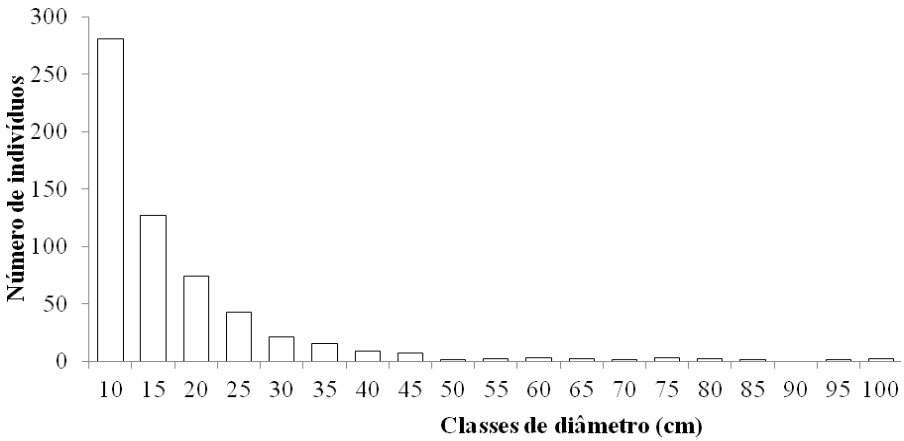
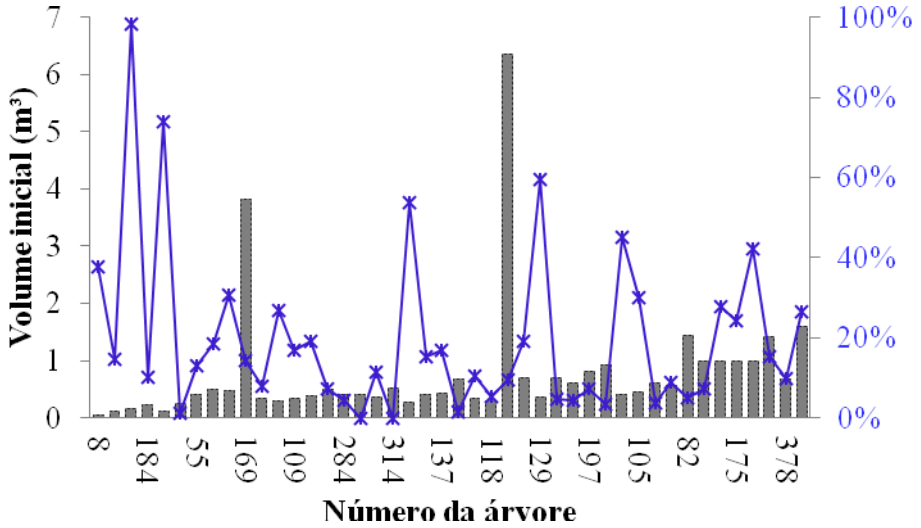


Figura 4: Número de indivíduos no hectare central, em função das classes de diâmetro.

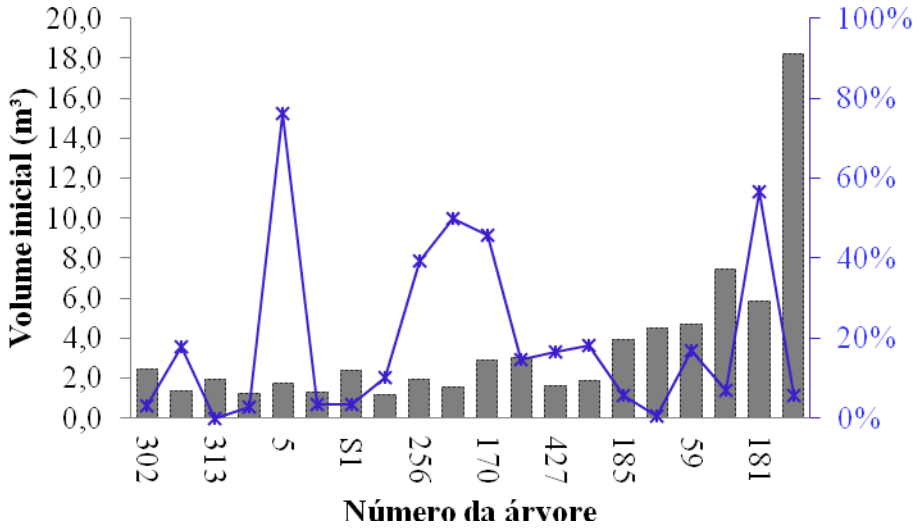
ISBN: 978-987-1676-63-7

Dos 64 troncos selecionados e marcados antes da queima, 44 pertenciam à classe 10 cm < DAP < 30 cm e, 20 pertenciam à classe DAP > 30 cm.

Na Figura 5, o volume inicial e o consumo, para cada um dos indivíduos que pertenciam às classes 10 cm < DAP < 30 cm e DAP > 30 cm, podem ser observados.



(a)



(b)

Figura 5: Volume antes da queima e consumo, em função da árvore analisada: (a) classe 10 cm < DAP < 30 cm; (b) classe DAP > 30 cm.

Ambas as classes de tronco analisadas apresentaram elevada variação no volume, antes da queima (Figura 5). Esta variação no volume é decorrente da altura, que está associada ao padrão de crescimento dos indivíduos. Em florestas tropicais, como a Amazônica, é esperada uma grande heterogeneidade no padrão de crescimento das árvores, devido à variedade de espécies encontrada. O volume médio dos troncos antes da queima, para a classe 10 cm < DAP < 30 cm, foi de 0,76±1,05 m³, sendo os volumes mínimo e máximo de 0,06 e 6,36m³, respectivamente. Para a classe DAP > 30 cm, os volumes médio, mínimo e máximo foram de 3,56±3,85, 1,17 e 18,25 m³, respectivamente.

Na Figura 5, também pode ser observado um padrão desigual no consumo individual dos troncos, para ambas as classes. O consumo individual médio, na classe 10 cm < DAP < 30 cm, foi de 20±21%, como valores variando entre 0 e 98%. Na árvore 314, por exemplo, cujo volume inicial estava abaixo de 1 m³ (0,51 m³), o consumo individual foi nulo. Em contrapartida, na árvore 169, que apresentou o segundo maior volume (3,81 m³), referente à classe com 10 cm < DAP < 30 cm, o consumo individual foi de 14%. O consumo individual total, para a classe com 10 cm < DAP < 30 cm, foi de 15,1% (5,1 m^3 / 33,6 m^3). Para a classe com DAP > 30 cm, os consumos individuais médio, mínimo e máximo foram de 20±22, 0 e 76%, respectivamente. Na árvore 5, com volume de 1,76 m³, o consumo individual foi de 76%. Em contrapartida, na árvore 313, com volume muito similar (1,93 m³) ao da árvore 5, não foi observado consumo. Para a classe com DAP > 30 cm, o consumo individual total foi de 16,5% (11,7m^3 / 71,1m^3).

Os resultados obtidos no experimento conduzido em Candeias do Jamari demonstraram que, em troncos pertencentes à classe de maior diâmetro, o consumo individual total foi um pouco mais elevado em relação aos troncos mais finos. Esperava-se que o consumo total fosse maior em troncos de menor diâmetro, devido a maior facilidade de queima.

Na Figura 6, o consumo individual foi plotado como uma função do diâmetro do tronco.

ISBN: 978-987-1676-63-7

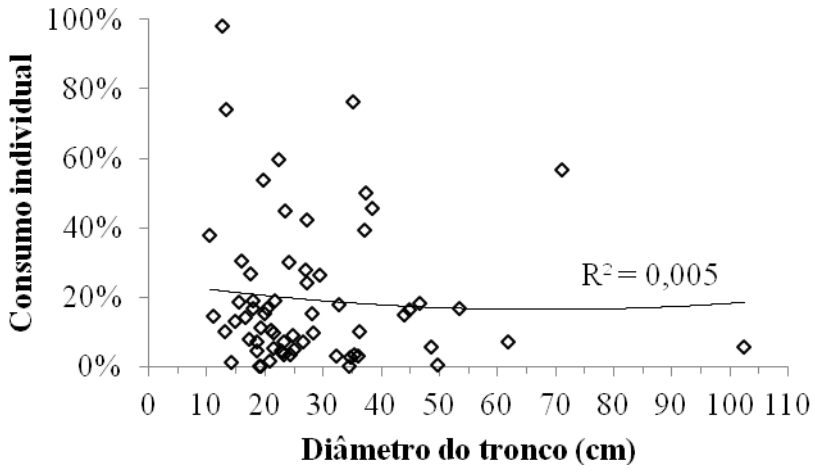


Figura 6: Consumo de cada indivíduo em função do diâmetro do tronco.

Apesar do consumo individual total ter sido ligeiramente mais elevado em troncos de maior diâmetro, na Figura 6 é possível observar uma baixa correlação entre consumo individual e o diâmetro do tronco (R^2= 0,005). Deste modo, o consumo parece não ter sido influenciado pelo diâmetro do tronco. Esta baixa correlação pode ter ocorrido devido à distribuição da vegetação viva sobre o terreno, e o procedimento de corte, que pode ter resultado em um arranjo totalmente aleatório da vegetação. Após o corte, algumas áreas praticamente não contém vegetação, em contrapartida, outras áreas podem concentrar grande quantidade de biomassa empilhada. A biomassa de tamanho pequeno, em um local limpo, pode não queimar.

Além do mais, o material fino (D < 10 cm), possivelmente, concentrava-se perto de troncos com DAP > 30 cm, o que facilitou a propagação do fogo e o consumo de biomassa nesta classe. Em troncos maiores, para que a combustão seja autossustentada, aquecimento adicional do material combustível é necessário. Este aquecimento, em um incêndio florestal, é proporcionado pelo acúmulo de biomassa fina nas proximidades dos troncos. De acordo com [21, 22], em incêndios florestais, materiais de tamanho menores, tais como folhas, arbustos e pequenos ramos sustentam o consumo em troncos e em galhos de maior dimensão.

Além da disposição dos troncos na área de queima, heterogeneidade nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas das espécies pode também ter contribuído para a variabilidade no consumo individual. [21] relataram que algumas espécies de árvores, mesmo aquelas de grandes dimensões, podem queimar completamente, quando o material em combustão possui alta porosidade devido à degradação.

O consumo total, para o material grosso (DAP > 10 cm), considerando as duas classes de troncos analisados, foi de 16,0% (16,8 m^3 / 104,8 m^3). O baixo consumo de material grosso pode estar

ISBN: 978-987-1676-63-7

associado com: a massa de material fino, que, neste experimento, representou apenas 13,3% do peso total; uma maior porcentagem de indivíduos com DAP > 30 cm; e a maior concentração de biomassa, em comparação com outros testes.

Na Figura 7, a contribuição de cada indivíduo para o consumo total, em função do diâmetro do tronco, foi apresentada.

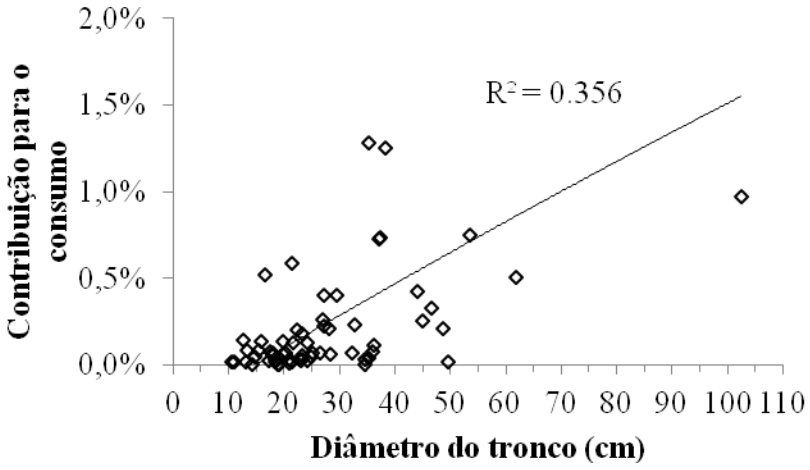


Figura 7: Contribuição de cada indivíduo para o consumo geral em função do diâmetro do tronco.

Na Figura 7 é possível observar que, a contribuição para o consumo total tendeu a aumentar com o aumento do diâmetro do tronco (R^2= 0,36). Assim, os indivíduos de maior diâmetro apresentaram maior contribuição para o consumo total.

3.2 Consumo para biomassa fina (DAP < 10 cm e liteira)

A massa fresca total de material fino (DAP < 10 cm e liteira), considerando as doze áreas 2×2m^2, foi de 447,40 kg (224,9 + 222,5), conforme a Tabela 2.

Extrapolando o resultado obtido nas 12 subáreas 2x2m², para o hectare central, a biomassa fresca total disponível durante a queima foi de 93,2 t ha^{-1}.

A biomassa fresca total (biomassa grossa e biomassa fina), disponível para queima no local do teste, foi de 701,5 t ha^{-1} (608,3 + 93,2). A biomassa fresca total, para a região de Alta Floresta, estado de Mato Grosso, foi estimada por [7] e [8] em 528 e 496 t ha^{-1}, respectivamente. [14] estimaram a biomassa fresca total em 685 t ha^{-1}, para a região de Manaus, estado do Amazonas.

A massa fresca de material fino representou apenas 13,3% da massa fresca total, que inclui ambas as classes diametrais.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A massa total de material fino, que permaneceu não queimada foi de 24,2 kg, correspondente a um consumo de 94,6% ((447,4-24,2) / 447,4).

Tabela 2: Resultados do consume para biomassa fina, obtido nas 12 sub áreas 2x2 m^2.

Área	Massa de material, D < 5 cm (kg)	Massa de material, 5 cm < D < 10 cm (kg)	Massa remanescente depois da queima (kg)
A1	3,6	3,8	1,2
A2	4,3	11,8	8,2
A3	11,9	16,8	2,7
A4	9,8	11,4	1,8
B1	33,6	5,7	0,0
B2	41,8	31,8	0,0
B3	57,5	64,5	0,0
B4	5,2	9,9	4,7
C1	5,0	19,8	3,7
C2	21,0	17,1	0,7
C3	13,0	9,7	0,4
C4	18,2	20,2	0,8
Total	224,9	222,5	24,2

Assim, o consumo na biomassa fina (94,6%) foi superior ao consumo na biomassa classificada como grossa (16,0%), conforme esperado. De acordo com [21], em materiais mais finos, a superfície exposta é maior (maior relação área superficial /volume), o que contribui para a perda de umidade, facilitando a transferência de calor por radiação e convecção e, consequentemente, facilitando a propagação do fogo e o consumo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSÕES

O experimento de queima controlada, conduzido em Candeias do Jamari, permitiu as seguintes conclusões:

- Os resultados encontrados para biomassa fresca total foi próximo àqueles da literatura;

- O consumo de biomassa fina (94,6%) foi superior ao consumo de biomassa grossa (16,0%);

- O consumo de material grosso pareceu não ser influenciado apenas pelo diâmetro do tronco das árvores. Fatores como a distribuição da vegetação na floresta, antes e após o seu corte, podem ter alterado o processo de queima;

- Quando avaliado o consumo nos troncos (material grosso), aqueles de maior diâmetro tenderam a contribuir mais para o consumo.

5. REFERÊNCIAS

[1] Brienen R.J.W., Phillips O.L., Feldpausch T.R. *Long-term decline of the Amazon carbon sink*. Nature, 519 (7543), 344-348, 2015.

[2] Feldpausch T.R., Lloyd J., Lewis S.L., Brienen R.J.W., Gloor M., Monteagudo Mendoza A., Lopez-Gonzalez G., Banin L., Abu Salim K., Affum-Baffoe K., Alexiades M., Almeida S., Amaral I., Andrade A., Aragão L.E.O.C., Araujo Murakami A., Arets E.J.M.M., Arroyo L., Aymard G.A.C., Baker T.R., Bánki O.S., Berry N.J., Cardozo N., Chave J., Comiskey J.A., Alvarez E., de Oliveira A., Di Fiore A., Djagbletey G., Domingues T. F., Erwin T.L., Fearnside P.M., França M.B., Freitas M.A., Higuchi N., Honorio C. E., Iida Y., Jiménez E., Kassim A.R., Killeen T.J., Laurance W.F., Lovett J.C., Malhi Y., Marimon B.S., Marimon-Junior B.H., Lenza E., Marshall A.R., Mendoza C., Metcalfe D. J., Mitchard E.T.A., Neill D.A., Nelson B.W., Nilus R., Nogueira E.M., Parada A., Peh K.S.-H., Pena Cruz A., Peñnuela M.C., Pitman N.C.A., Prieto A., Quesada C.A., Ramírez F., Ramírez-Angulo H., Reitsma J.M., Rudas A., Saiz G., Salomão R.P., Schwarz M., Silva N., Silva-Espejo J.E., Silveira M., Sonké B., Stropp J., Taedoumg H.E., Tan S., ter Steege H., Terborgh J., Torello-Raventos M., van der Heijden G.M.F., Vásquez R., Vilanova E., Vos V.A., White L., Willcock S., Woell H., Phillips O.L. *Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates*. Biogeosciences, 9 (8), 3381-3403, 2012.

[3] Barber C.P., Cochrane M.A., Souza C.M., Laurance W.F. *Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon*. Biological Conservation, 177, 203-209, 2014.

[4] Lewinsohn T.M., Prado P.I. *How Many Species Are There in Brazil?* Conservation Biology, 19 (3), 619-624, 2005.

[5] Crutzen P.J., Andreae M.O. *Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles*. Science, 250, 1669-1678, 1990.

[6] Gatti L.V, Gloor M., Miller J.B., Doughty C.E., Malhi Y., Domingues L.G., Basso L.S., Martinewski A., Correia C.S.C., Borges V.F., Freitas S., Braz R., Anderson L.O., Rocha H., Grace J., Phillips O.L., Lloyd J. *Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements*. Nature, 506 (7486), 76-80, 2014.

[7] Neto T.G.S., Carvalho J.A., Veras C.A.G., Alvarado E.C., Gielow R., Lincoln E.N., Christian T.J., Yokelson R.J., Santos J.C.. *Biomass consumption and CO_2, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire*. Atmospheric Environment, 43, 438–446, 2009.

[8] Carvalho J.A., Costa F.S., Veras C.A.G., Sandberg D.V., Alvarado E.C., Gielow R., Serra, A.M., Santos J.C. *Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in Northern Mato Grosso, Brazil*. Journal of Geophysical Research, 106 (D16), 17877–17887, 2001.

[9] Arima E.Y., Barreto P., Araújo E., Soares-Filho B. *Public policies can reduce tropical deforestation: Lessons and challenges from Brazil*. Land Use Policy, 41, 465-473, 2014.

[10] Gonzalez P., Kroll B., Vargas C.R. *Tropical rainforest biodiversity and aboveground carbon changes and uncertainties in the Selva Central, Peru*. Forest Ecoloy and Management, 312, 78-91, 2014.

[11] Carvalho J.A., Amaral S.S., Costa M.A.M., Soares Neto T.G., Veras C.A.G., Costa F.S., Van Leeuwen T.T., Krieger Filho G.C., Tourigny E., Forti M.C., Fostier A.H., Siqueira M.B., Santos J.C., Lima B.A., Cascão P., Ortega G., Frade E.F. *CO_2 and CO emission rates from three forest fire controlled experiments in Western Amazonia*. Atmospheric Environment, 135, 2016.

[12] van Leeuwen T.T., van der Werf G.R., Hoffmann A.A., Detmers R.G., Rücker G., French N.H.F., Archibald S., Carvalho Jr. J.A., Cook G.D., de Groot W.J., Hély C., Kasischke E.S., Kloster S., Mccarty J.L., Pettinari M.L., Savadogo P., Alvarado E.C., Boschetti L., Manuri S., Meyer C.P., Siegert F., Trollope L.A., Trollope W.S.W. *Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database*. Biogeosciences, 11, 7305-7329, 2014.

[13] Araújo T.M., Carvalho J.A., Higuchi N., Brasil A.C.P., Mesquita A.L.A. *A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the state of Para, Brazil*. Atmospheric Environment, 33, 1991–1998, 1999.

[14] Carvalho J.A., Higuchi N., Araújo T.M., Santos J.C. *Combustion completeness in a rainforest clearing experiment in Manaus, Brazil*. Journal of Geophysical Research, 103 (D11), 13195–13200, 1998.

[15] Carvalho J.A., Santos J.M., Santos J.C., Leitão M.M., Higuchi N. *A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region*. Atmospheric Environment, 29, 2301–2309, 1995.

[16] Asner G.P., Mascaro J. *Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric*. Remote Sensing of Environment, 140, 614–624, 2014.

[17] Ferraz S.F.B, Vettorazzi C.A., Theobald D.M., Ballester M.V.R. *Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: Assessment and future scenarios*. Forest Ecoloy and Management, 204 (1), 67–83, 2005.

[18] Brown I.F., Martinelli L.A., Thomas W.W., Moreira M.Z., Cid Ferreira C.A., Victoria R.A. *Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondônia, Brazil*. Forest Ecology and Management, 75 (1-3), 175-189, 1995.

[19] Santos J. *Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa para a Amazônia brasileira "Terra Firme" Floresta tropical úmida*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Brasil, 1996.

[20] Sandberg D.V., Ottmar R.G. *Slash burning and fuel consumption in the Douglas-fir subregion*. 7th Conference on Fire and Forest Meteorology, Fort Collins, Colorado, 1983.

[21] Rabelo E.R.C., Veras C.A.G., Carvalho J.A., Alvarado E.C., Sandberg D.V., Santos J.C. *Log smoldering after na Amazonian deforestation fire*. Atmospheric Environment, 38, 203-211, 2004.

[22] Carvalho E.R., Veras C.A.G., Carvalho J.A. *Experimental investigation of smouldering in biomass*. Biomass and Bioenergy, 22, 283–294, 2002.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, Brasil (Projeto temático número 08/04490-4 e bolsa de doutorado número 13/21231-0), pelo suporte financeiro.

Agradecemos à CNPq e à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental de Rondônia – SEDAM, por permitirem a realização do experimento de queima em Candeias do Jamari.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EXPERIMENTOS DE TÚNEL DE VENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE UMA FONTE PONTUAL LOCALIZADA EM DIFERENTES PONTOS DE UMA ZONA URBANA

Raquel S. Viana[1], Cyntiya L. Herkenhoff[1] Emanuelle R. Lama y Reginaldo R. C. de Paula[1]

[1] Coordenadoria de Física – Instituto Federal do Espírito Santo
Av. Vitória 1729, Vitória, E.S., Brasil
correo-e: quelviana2@hotmail.com

RESUMO

Nas últimas décadas, muitas cidades do mundo, principalmente, nos países em desenvolvimento, têm sofrido um rápido crescimento urbano e industrial. Na ausencia de um planejamento urbano e de políticas ambientais adequadas este processo tem causado uma degradação da qualidade do ar, com o aumento do lançamento de gases tóxicos, odores e material particulado para a atmosfera [1]. Esta degradação da qualidade do ar tem um impacto significativo no meio ambiente e na saúde humana. O entendimento dos mecanismos de transporte e dispersão de poluentes em áreas urbanas pode contribuir para um melhor planejamento urbano, a fim de evitar mitigar os efeitos adversos da poluição atmosférica [2]. Assim, estudos sobre a localização e altura de fontes emissoras de poluentes podem fornecer uma visão geral das influencias destes fatores na qualidade do ar e como eles podem ser avaliados e identificados. O presente trabalho investigou as influencias de diferentes localizações de uma fonte de fumaça em uma área urbana idealizada formada por prédios cúbicos de altura 0,06 m e prismáticos retangulares de algura 0,12 m. Foram realizados experimentos de túnel de vento com uma fonte pontual de altura de $1H_b$ localizada a montante da zona urbana e no seu centro, onde H_b é a altura dos prédios. Foram analisadas duas vazões de saídas de poluentes. Para visualização da pluma de poluentes foram utilizadas as técnicas direta de injeção de fumaça e plano de laser de luz verde. Os resultados mostraram que a morfologia do espaço urbano tem uma boa influência na dispersão de poluentes e que o aumento da vazão de saída favorece um melhor transporte da pluma de fumaça.

Palavras Chaves: *Poluição urbana, fonte estacionária, experimentos de túnel de vento, fonte estacionária.*

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento desornedado de áreas urbanas de países em desenvolvimento desempenha um importante papel no aumento da rugosidade superficial com consequente aumento da turbulência mecânica e diminuição da velocidade do vento e mudanças na sua direção [3]. Este fenômeno tem um forte impacto no desenvolvimento social e econômico da população, influenciando assim, seu modo de vida devido ao aumento da poluição atmosférica de origem industrial e veicular.

Nos últimos anos as investigações das influências de um conjunto de obstáculos no escoamento e dispersão de poluentes na camada limite urbana tem adquirido uma importância crescente em várias áreas das engenharias mecânica, ambiental e civil. Assim, um melhor conhecimento sobre o problema da poluição atmosférica em zonas urbanas tem contribuído para definir estratégias que possibilitem mitigar seus impactos negativos no meio ambiente e na saúde da população.

Estudos do sistema de ventilação natural em zonas urbanas envolvem parâmetros meteorológicos, tais como velocidade e direção do vento, parâmetros da configuração urbana, tais como a altura dos prédios e espaçamento entre eles [4]. Além disso, o transporte de poluentes gasosos é largamente determinado pela altura e localização da fonte, turbulência atmosférica (associada com a rugosidade superficial), estrutura do telhado e presença de obstáculos vizinhos [5 e 6].

Estudos de túnel de vento podem ser considerados ferramentas importantes na avaliação de como diferentes morfologias do espaço urbano influenciam o transporte de poluentes provenientes de uma fonte estacionária nas proximidades dos obstáculos. Na literatura encontram-se várias simulações físicas de túnel de vento realizadas para investigarem a poluição do ar de fontes estacionárias em áreas urbanas [7,8].

A principal vantagem destas pesquisas em túnel de vento é o controle vários parâmetros físicos e a possibilidade de isolar seus efeitos e assim, identificar quais os impactos individuais destes no transporte, dispersão e acumulo de poluentes em áreas urbanas [9]. Entretanto, existem várias limitações, tais como o tempo de preparação e realização dos experimentos e a simplificações de alguns parâmetros na modelagem física [10].

O principal objetivo deste trabalho foi investigar a influência da localização de uma fonte estacionária de poluentes em uma zona urbana idealizada formada com prédios de altura H_b e $2H_b$. Para alcançar este objetivo foram realizados experimentos em um túnel de vento de camada limite atmosférica considerando diferentes morfologias do espaço urbano.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizados experimentos em túnel de vento do lançamento de poluentes em uma área urbana idealizada. Este é um túnel de vento de camada limite atmosférica com seção de teste de (2,0 x 0,5 x 0,5) m e está localizado no Laboratório de Fenômenos de Transporte em Alto Lage, Cariacica, E.S. Para construir as diferentes configurações da zona urbana foram utilizados 12 obstáculos cúbicos de acrílico (0,06 x 0,06 x 0,06) m e seis obstáculos prismáticos retangulares de acrílico (0,06 x 0,06 x 0,12) cm. O perfil de velocidade vertical do vento médio obedeceu a uma lei de potência dada por:

$$u(z) = u_o\,(z/z_o)^p \qquad (1)$$

onde, z é a altura u(z) é a velocidade média do vento medida em uma altura *z* acima da superfície, uo é a velocidade média na altura dos prédios, z_o é altura dos obstáculos tomada como referência, e p = 0,35 é o parâmetro de rugosidade para ventos que se desenvolvem em regiões urbanas de acordo com a Categoria V da NBR-6123/88 [11].

Para o lançamento de poluentes foram realizados experimentos com a fonte estacionária de diâmetro de saída dos gases de 10 mm e de altura $H_f = H_b$, localizada a uma distância de $1H_b$ a montante da zona urbana e no centro da zona urbana, onde H_f e H_b são respectivamente as alturas da fonte e dos prédios. Foram determinadas as velocidades médias na saída da fonte emissora para o cálculo da vazão do lançamento de poluentes. Para determinadas configurações da zona urbana foram testadas duas vazões de saída $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s e $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s, correspondente às velocidades médias de exaustão de V_{e1} = 0,51 m/s e V_{e2} = 1,10, respectivamente. As medições foram realizadas com um tubo de Pitot (sonda de 3mm) acoplado a um manômetro digital (TSI, EBT720). Figura 1 mostra uma representação esquemática da fonte emissora e sua localização.

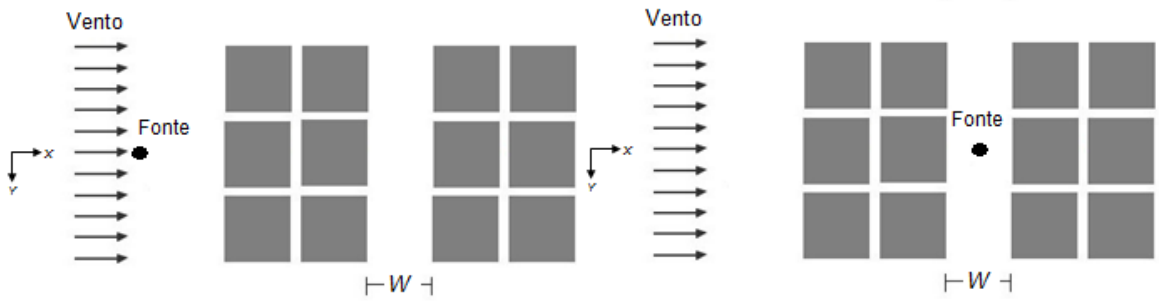


Figura 1: Representação esquemática da morfologia da zona urbana e localização da fonte estacionária.

Foram simuladas diferentes configurações de zona urbana com uma razão de aspecto $W/H_b = 1$, onde W é a largura da rua. Durante a realização dos experimentos, o vento externo incidiu perpendicularmente ao eixo central da rua. Para o cálculo do número de Reynolds considerou-se como escala de comprimento a altura dos prédios (H_b = 0,06 m e $2H_b$ = 0,12 m) e como velocidade de escala as velocidades médias do vento nas alturas dos prédios, respectivamente, V_1 = 0,23 e V_2 = 0,33, assim, $Re_{H1} = 9{,}0 \times 10^2$ e $Re_{H2} = 2{,}6 \times 10^3$. Essas velocidades foram medidas na direção do escoamento principal a uma distância $4H_b$ a montante dos prédios.

Para a visualização da pluma de poluentes foi utilizada a técnica de plano de luz de laser verde (500 mW e λ = 532 nm) e para captura das imagens, uma câmera digital Fuijifilm HS 10 com uma velocidade de captura de 240 frames por segundo. Na Figura 2 tem-se uma representação da seção de testes do túnel de vento e metodologia utilizada para a visualização da pluma de poluentes.

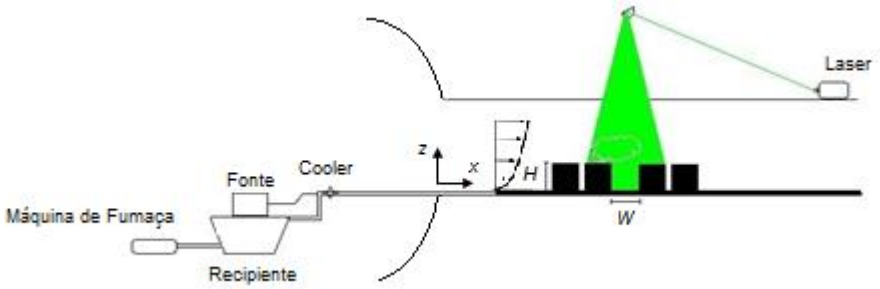


Figura 2: Representação esquemática dos aparatos experimentais para visualização do escoamento na seção de testes do túnel de vento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 FONTE LOCALIZADA A MONTANTE DA ZONA URBANA

3.1.1 Emissões para vazão da fonte $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s

A Figura 3 mostra a emissão de poluentes para fonte a montante da zona urbana formada por nove predios cúbicos (H_b = 0,06m) localizada a uma distancia de $1H_b$ dos prédios para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s. A pluma de fumaça sofre uma curvatura um pouco acima da altura dos obstáculos apresentando um comportamento turbulento. Além disso, ela não foi capturada pela região do escoamento incidente e nem por uma zona de recirculação que ocorre no telhado dos primeiros prédios.



Figura 3: Emissões de poluentes para fonte localizada a montante da zona urbana formada por prédios cúbicos para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s.

A Figura 4 mostra a emissão de poluentes para fonte a montante da zona urbana formada por seis prédios de altura $2H_b$ adjacentes a fonte e seis predios cúbicos. A fonte estava localizada a uma distancia de $1H_b$ dos prédios para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s. Para esta vazão a pluma apresentou um caráter turbulento imediatamente após a saída da chaminé. Apesar dos prédios altos atuarem como uma barreira a pluma, não foi observado um acúmulo de poluentes na base frontal do prédio.

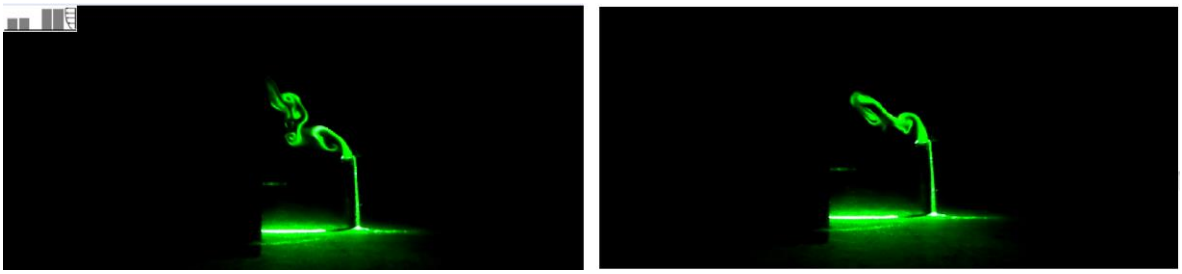


Figura 4: Emissões de poluentes para fonte localizada a montante da zona urbana formada por prédios de altura $2H_b$ próximos a fonte para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s.

3.1.2 Emissões para vazão da fonte $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s

A Figura 5 mostra a emissão de poluentes para fonte a montante da zona urbana formada por nove prédios cúbicos de altura H_b localizada a uma distancia de $1H_b$ dos prédios para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s. Para esta vazão a pluma de fumaça também sofre uma curvatura um pouco acima da altura dos obstáculos e também não foi capturada pela região do escoamento incidente e pela zona de recirculação que ocorre no telhado dos primeiros prédios.



Figura 5: Emissões de poluentes para fonte localizada a montante da zona urbana formada por prédios cúbicos para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s.

A Figura 6 mostra a emissão de poluentes para fonte a montante da zona urbana formada por seis prédios de altura $2H_b$ adjacentes a fonte e seis predios cúbicos. A fonte estava localizada a uma distancia de $1H_b$ dos prédios para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s. Para esta vazão inicialmente a fonte apresentou um caráter laminar imediatamente na após a saída da chaminé e somente a certa altura ocorreu a transição a turbulência. Neste caso, apesar dos prédios altos também atuarem como uma barreira a pluma, não foi observado um acúmulo de poluentes na base frontal dos prédios imediatamente a jusante da fonte, ocorrendo um bom transporte a jusante da fonte.



Figura 6: Emissões de poluentes para fonte localizada a montante da zona urbana formada por prédios de altura $2H_b$ próximos a fonte para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s.

3.2 FONTE LOCALIZADA NO CENTRO DA ZONA URBANA

3.2.1 *Emissões para vazão da fonte* $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s

A Figura 7 mostra a emissão de poluentes para fonte localizada no meio da zona urbana formada por nove prédios cúbicos de altura H_b para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s. Parte dos poluentes propaga-se a jusante da zona urbana, Figura (a). Parte da pluma de fumaça é transportada para o interior da rua, onde os poluentes são capturados por uma zona de recirculação na base dos prédios localizados a jusante da fonte, Figura (b).

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 7: Emissões de poluentes para fonte no centro da zona urbana formada por prédios cúbicos para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s.

A Figura 8 mostra a emissão de poluentes para fonte localizada no meio da zona urbana formada por seis prédios de altura $2H_b$ e seis prédios cúbicos de altura H_b, respectivamente a montante e a jusante da fonte. Os resultados mostram um comportamento intermitente da pluma, pois em determinados instantes a fumaça é transportada a montante da chaminé, Figura (a) e em outros instantes é transportada a jusante, Figura (b). Este comportamento pode estar associado a fonte estar localizada totalmente na zona de cavidade dos prédios altos a montante, que é caracterizada por uma turbulência intensa com turbilhões de várias escalas de comprimento.

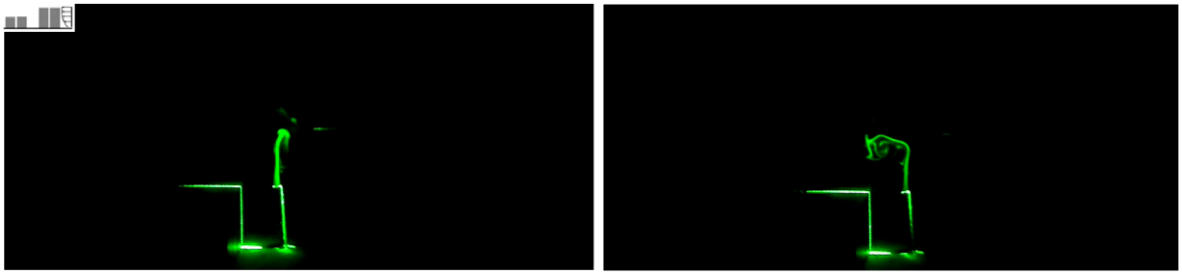


Figura 8: Emissões de poluentes para fonte no centro da zona urbana formada por prédios altos a montante da fonte e prédios cúbicos a jusante para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s.

A Figura 9 mostra a emissão de poluentes para fonte localizada no meio da zona urbana formada por seis prédios cúbicos de altura H_b e seis prédios prismáticos de altura $2H_b$, respectivamente a montante e a jusante da fonte. Os resultados mostram que a pluma de fumaça quase sempre é transportada para a base dos prédios altos a jusante da fonte, que funcionam como uma barreira a dispersão de poluentes, bem como geram um grande turbilhonamento entre os prédios.

ISBN: 978-987-1676-63-7

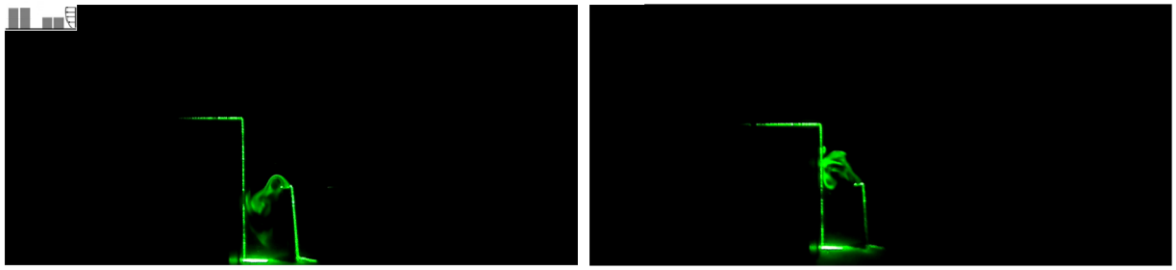


Figura 9: Emissões de poluentes para fonte no centro da zona urbana formada por prédios cúbicos a montante da fonte e prédios altos a jusante para $Q_1 = 4{,}00 \times 10^{-5}$ m^3/s.

2.2.2 *Emissões para vazão da fonte* $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s

A Figura 10 mostra a emissão de poluentes para fonte localizada no meio da zona urbana formada por nove prédios cúbicos de altura H_b para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s. Os resultados mostram que para que com o aumento da vazão a pluma de fumaça é sempre transportada a jusante da fonte e acima dos prédios, não sendo capturada pela recirculação entre os prédios.



Figura 10: Emissões de poluentes para fonte no centro da zona urbana formada por prédios cúbicos para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s.

A Figura 11 mostra a emissão de poluentes para fonte localizada no meio da zona urbana formada por seis prédios de altura 2H e seis prédios cúbicos de altura H, respectivamente a montante e a jusante da fonte para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s. Com o aumento da vazão a pluma de poluentes escapou da zona de cavidade dos predios altos a montante e assim, não impacta o interior da região urbana. Os resultados sugerem que a fumaça foi capturada pelos vórtices *shedding* que se formam nos obstáculos altos a montante da fonte e assim, sendo transportada a jusante. Assim, não ocorreu um acúmulo de poluentes no interior da zona urbana.

ISBN: 978-987-1676-63-7

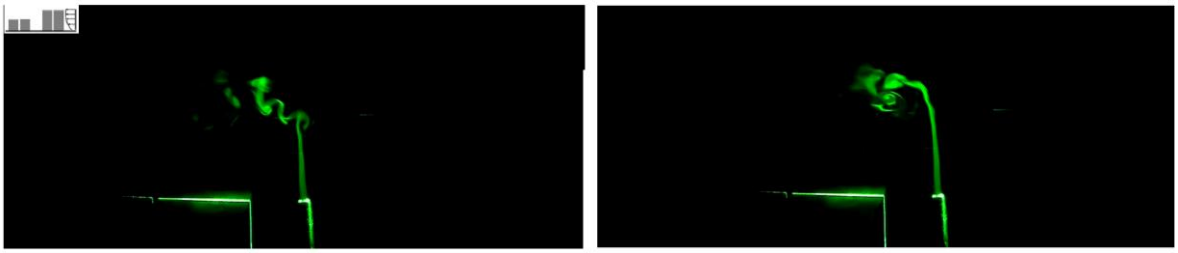


Figura 11: Emissões de poluentes para fonte no centro da zona urbana formada por prédios altos a montante da fonte e prédios cúbicos a jusante para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s.

A Figura 12 mostra a emissão de poluentes para fonte localizada no meio da zona urbana formada por seis prédios cúbicos de altura H_b e seis prédios prismáticos de altura $2H_b$, respectivamente a montante e a jusante da fonte para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s. Neste caso, os prédios altos a jusante da fonte também atuaram como uma barreira a pluma de fumaça, não favorecendo a boa dispersão de poluentes.

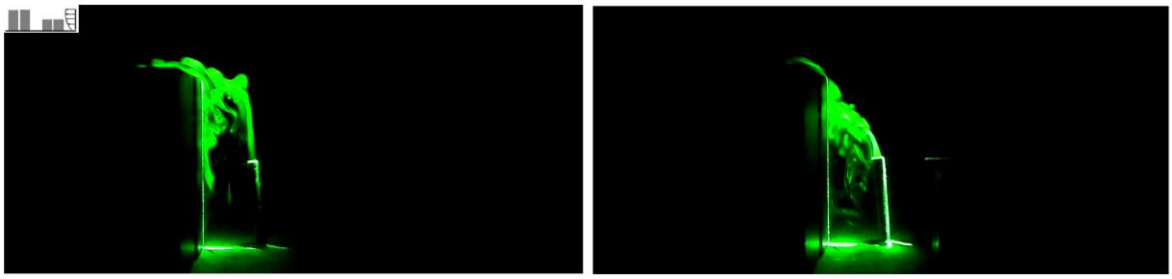


Figura 12: Emissões de poluentes para fonte no centro da zona urbana formada por prédios cúbicos a montante da fonte e prédios altos a jusante para $Q_2 = 8{,}64 \times 10^{-5}$ m^3/s.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizados experimentos de túnel de vento de camada limite atmosférica para verificar a influência da morfologia do espaço urbano na dispersão de poluentes provenientes de uma fonte estacionário localizada a montante e no centro da zona urbana.

Para a fonte puntual localizada a montante da zona urbana formada somente por prédios cúbicos e por seis prédios altos adjacentes a ela não foi observado um acúmulo de poluentes na base dos primeiros prédios da zona urbana. Isto sugere que a altura da fonte e as duas vazões de saídas analisadas contribuiram para um bom transporte a jusante. Porém, no interior da zona urbana a pluma de fumaça foi capturada pela grande recirculação que existe entre os prédios, resultados

ISBN: 978-987-1676-63-7

não apresentados na visualização do escoamento. Para baixas vazões de saída a pluma de fumaça foi mais influenciada pelo escoamento, pois apresentou um comportamento turbulento. Com o aumento da vazão quando se considerou a presença de prédios altos imediatamente a jusante da fonte, inicialmente ela apresentou um regime laminar de saída da fumaça.

Para a fonte puntual localizada no centro da zona urbana formada somente por prédios cúbicos e prédios altos a montante o aumento da vazão contribuiu para uma melhor dispersão de poluentes. Entretanto, com a presença de prédios altos a jusante da fonte mesmo com o aumento da vazão foi observado o transporte de poluentes para o interior da rua.

5. REFERENCIAS

[1] Princevac, M., Baik, J-J., Li, X., Pan, H., Park, S-B., *Lateral channeling within rectangular arrays of cubical obstacles*, J.Wind Engineering Aerodynamics, V. 98, pp. 337-385, 2010.

[2] Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry, K.K., *Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 93, pp. 697–717, 2005.

[3] Chan, A.T., Au, W.T.W., So, E.S.P., *Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons*, Atmospheric Environment 37 (2003) 2761–2772

[4] Bangallee, M.Z.I., Miau, J.J., Lin, S.Y., Yang, J.H., *Flow visualization PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model*, Original Research Article Energy and Buildings, V. 66, pp. 306-314, 2003.

[5]White, B.R., Stein, W., *Wind-tunnel studies of variable stack heights for a low-profile building*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 36(1–3), pp. 675–687, 1990.

[6]Yassin, M.F., *Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons*, Atmospheric Environment, V. 45, pp. 5220-5229, 2011.

[7] Contini, D., Cesari, D., Donateo, A., Robins, A.G.,*Effects of Reynolds number on stack plume trajectories simulated with small scale models in a wind tunnel*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 97 (9-10), 468–474, 2009.

[8] Hajra, B., Stathopoulos, T., *A wind tunnel study of the effect of downstream buildings on near-field pollutant dispersion*. Building and Environment 52, 19–31, 2012.

[9] Gromke, C., Buccolieri, R., Sabatino, S.D., Ruck, B., 2008. *Dispersion modeling in a street canyon with tree planting e evaluation of CFD simulations with wind tunnel data*. Atmospheric Environment, V. 42, pp, 8640-8650, 2008.

[10] Nakiboglu, G.; Gorlé, C., Horváth, I., van Beeck, J., Blocken, B. *Stack gas dispersion measurements with Large Scale-PIV, Aspiration Probes and Light Scattering Techniques and comparison with CFD*, Atmospheric Environment, V. 43, pp. 3396-3406, 2009.

[11] Blesmann, J. *O Vento na Engenharia Estrutural*, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho desejam agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio aos bolsistas de Iniciação Científica.

Área temática: Energía y Medio Ambiente

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DE ROTORES EÓLICOS TIPO SAVONIUS

Fernando Marques Fernandes[1], **Clodoaldo do Rosário Santos**[1], **Laís Gomes Fernandez**[1], **Lucas Alexandre Bueno Mateus**[1], **Ricardo Yuiti Tota Honda**[1], **Victor Nascimento Pereira**[1], **Yan Felipe de Oliveira Cavalcante**[1], **Francisco de Assis Corrêa**[1] e **Carlos Alberto Amaral Moino**[1].

[1] Universidade Santa Cecília.
Rua Oswaldo Cruz, 255/277 – Boqueirão – Santos – São Paulo – Brasil – CEP 11045-907
fmarques@unisanta.br

RESUMO

Devido à crise energética, que marca não somente o Brasil, mas também vários outros países há um grande empenho em encontrar fontes de energia renováveis, com maiores rendimentos.
Com o foco em encontrar soluções viáveis, este trabalho tem por objetivo estudar, através da fonte de energia eólica, a melhor geometria e montagem de pás, para este gerador de energia com eixo vertical, denominado Savonius. Para tal determinação foi criado um dispositivo que permite realizar ensaios para obtenção de valores de velocidade do vento, força gerada, rotação do eixo do rotor, entre outros parâmetros que viabilizam os cálculos necessários para a determinação do rendimento e potência. A fim de facilitar os cálculos, o fluido foi tratado como incompressível, mesmo o ar apresentando um fator de compressibilidade relativamente alto em relação a outros fluidos. Importante salientar que o coeficiente de sustentação foi considerado nulo nas pás, de acordo com simulações realizadas no *SolidWorks®*.

Palavras Chaves: *Energia Renovável; Eólica; Savonius.*

1. INTRODUÇÃO

Ao verificar os problemas presentes no cotidiano da humanidade, nota-se que um desses é o aquecimento global [1]. Sendo assim, é necessário efetuar a redução dos gases-estufa e a utilização de fontes alternativas de energias podem ser consideradas boas soluções para atender a demanda de energia. Neste aspecto, existem inúmeras opções como fontes solares, oceânicas, geotérmicas e eólicas, todas com capacidade de gerar energia limpa e renovável. Para reduzir este problema, dentre outras opções verificadas, existem os geradores de eixo vertical tipo Savonius, que se destacam pelo baixo custo de fabricação e manutenção. Porém, este gerador em específico pode ser construído com pás de diferentes tipos, sendo o principal objetivo do trabalho acadêmico o estudo de alguns modelos de pás para determinação e montagem do que apresenta melhor rendimento.

A Figura 1 apresenta as tendências de eficiência de diferentes tipos de turbina eólica em relação à razão de velocidade periférica [2]. Cada tipo de turbina possui sua faixa de aplicação mais recomendada. Sendo assim, não é recomendado em aerogeradores Savonius possuir uma alta razão de velocidade periférica.

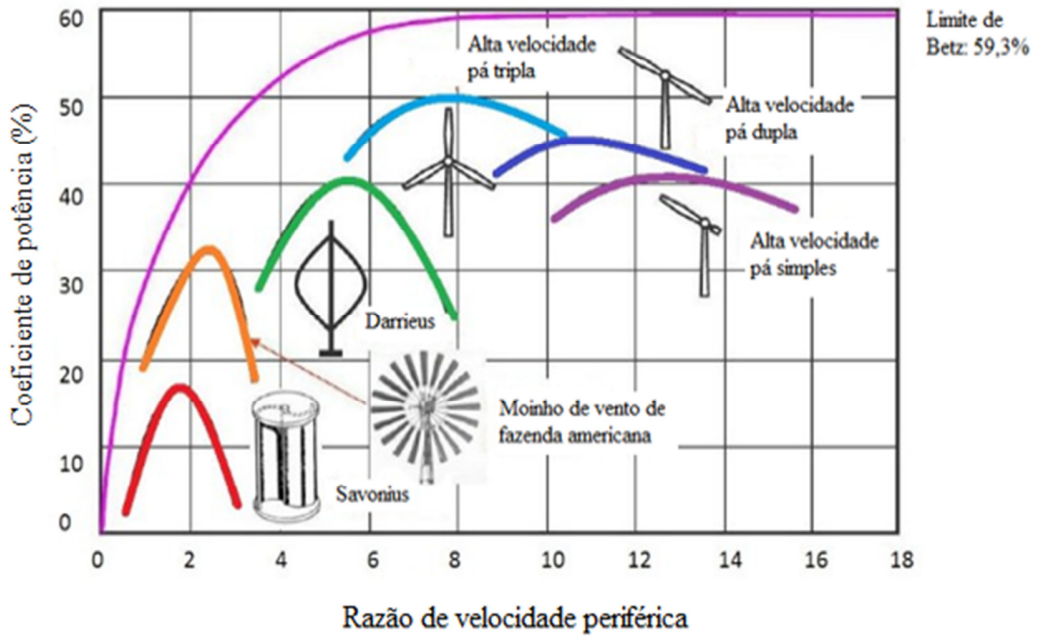


Figura 1 - Relação entre o coeficiente de potência e a razão de velocidade periférica para vários tipos de rotores eólicos [3].

Com o foco em encontrar soluções viáveis, este trabalho tem por objetivo estudar, através da fonte de energia eólica, a melhor geometria e montagem de pás, para este gerador de energia com eixo vertical, denominado Savonius. Para tal determinação foi criado um dispositivo que permite realizar

ISBN: 978-987-1676-63-7

ensaios para obtenção de valores de velocidade do vento, força gerada, rotação do eixo do rotor, entre outros parâmetros que viabilizam os cálculos necessários para a determinação do rendimento e potência.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Lista de materiais utilizados para a construção da estrutura e do rotor:

- Perfil laminado de aço ASTM-A123, barra retangular 40 x 20: 11,944 m;
- Perfil laminado de aço ASTM-A36 L 1” x 2,2 Kg/m: 0,9 m;
- Perfil laminado de aço ASTM-A500, tubo 3/4” SCH 40: 1,4 m;
- Chapa de aço ASTM-A36, espessura de 1/16”: 0,0035 m²;
- Chapa de aço ASTM-A36, espessura de 3/16”: 0,0035 m²;
- Perfil duralumínio NBR 7075, 100 mm x 75 mm x 40 mm;
- Chapa de alumínio NBR 6999, espessura de 2 mm: 1,2 m².

A Figura 2 apresenta a estrutura de base do dispositivo, a pá cilíndrica e a pá elíptica.

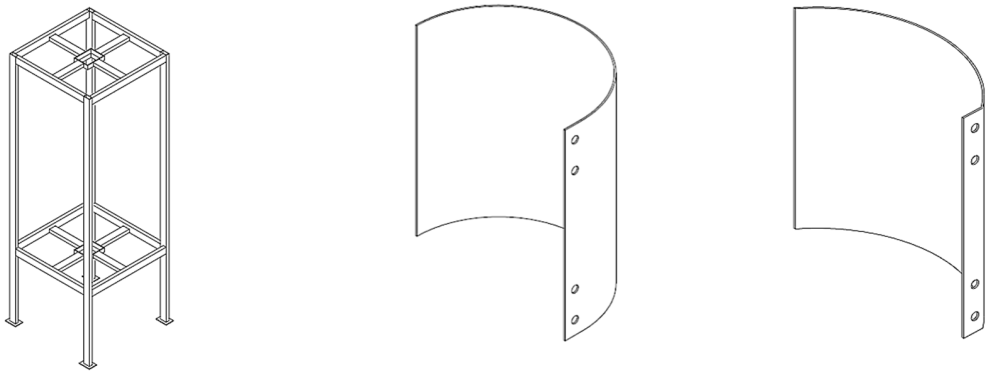


Figura 2 - Estrutura de base, Pá cilíndrica e Pá elíptica. (Fonte: Autores do trabalho).

A Figura 3 apresenta o dispositivo utilizado no experimento.

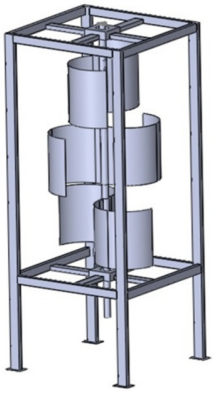


Figura 3 – Dispositivo utilizado no experimento. (Fonte: Autores do trabalho).

ISBN: 978-987-1676-63-7

A Figura 4 apresenta as formas de montagem utilizadas no experimento.

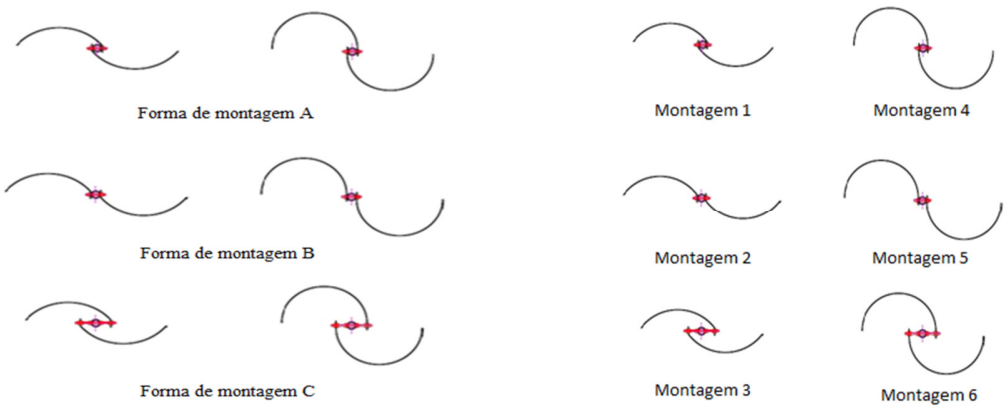
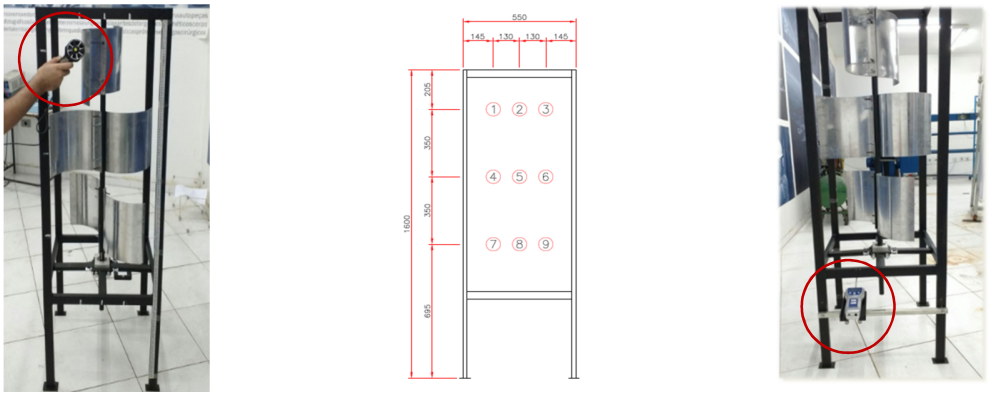


Figura 4 - Formas de montagens utilizadas no experimento. (Fonte: Autores do trabalho).

A Figura 5 apresenta a forma utilizada para a coleta de dados do projeto



(A) (B) (C)

Figura 5 – Coleta de dados: (A) Medida da velocidade do vento com anemômetro, (B) Pontos de medição, (C) Medida da força com dinamômetro. (Fonte: Autores do trabalho).

Para a realização dos cálculos, foi necessário comprovar se o fluido seria tratado como compressível ou incompressível [3]. Deste modo, foram feitas simulações do comportamento do ar em contato com as pás. Para todas as simulações no *SolidWorks®* foram utilizados os parâmetros da Tabela 1.

Tabela 1 – Valores utilizados nas simulações no *SolidWorks®*. (Fonte: Autores do trabalho)

Parâmetro	*Valor*
Velocidade média (m/s)	8,0
Pressão (Pa)	101325
Temperatura (K)	293,2

ISBN: 978-987-1676-63-7

As simulações mostraram que o valor máximo do número de Mach encontrado é 0,03, Figura 6, sendo menor que o número mínimo para ser considerado um fluido compressível (Mach=0,3) de acordo com [4], portanto os cálculos foram realizados considerando o fluido incompressível.

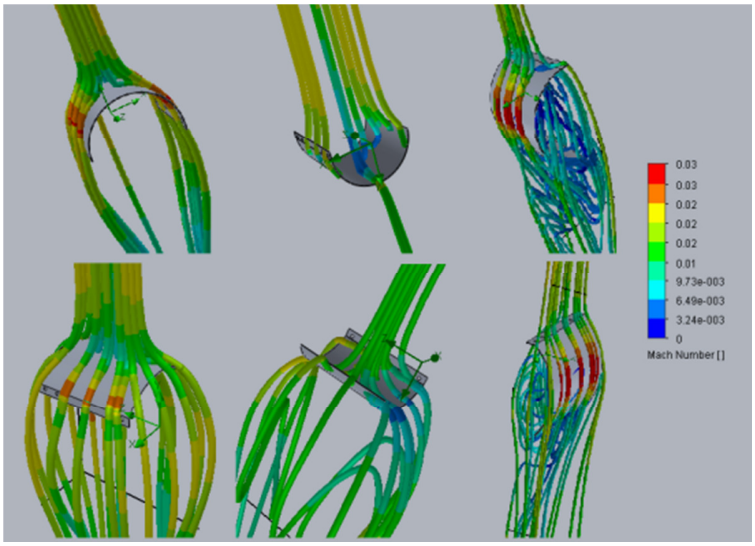


Figura 6 – Ensaio do Número de Mach no *SolidWorks®*. (Fonte: Autores do trabalho).

Para calcular a influência da força de sustentação no desempenho dos rotores foram realizadas simulações no *SolidWorks®*. A variação de pressão do ar em torno das pás foi mínima conforme Figura 7, podendo ser considerada desprezível, desta forma as simulações mostraram que, para essa configuração de rotor Savonius, não há interferência de força de sustentação.

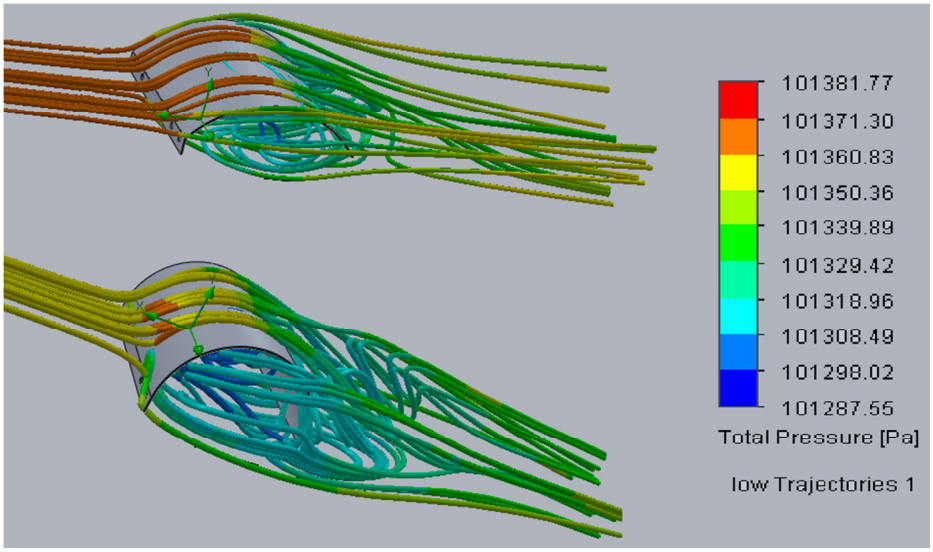


Figura 7 - Ensaio do número de Mach no *SolidWorks®*. (Fonte: Autores do trabalho).

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. RESULTADOS

Para determinar a rotação, através do tacômetro, foram efetuadas 7 medições e com os valores obtidos foi calculada a média dos valores para sua utilização. Quanto às rotações do eixo do rotor, os ensaios realizados demonstram que a melhor forma de montagem foi a C, seguindo das formas de montagens A e B, conforme apresenta a Tabela 2.

O motivo destes resultados pode ser analisado através da Figura 8, a qual demonstra o fluxo de ar nas pás, que podem auxiliar na rotação à medida que há o escoamento do fluido pelos laterais da pá convexa e na lateral que mais se aproxima da pá côncava, o escoamento do fluido auxilia na sua rotação, pois há um escoamento livre, comparado com a montagem B, onde o eixo interfere no escoamento do fluido.

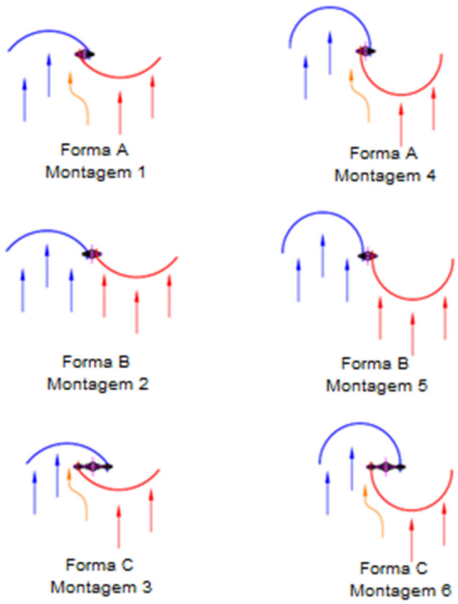


Figura 8 – Influência do vento nas pás de acordo com as montagens. (Fonte: Autores do trabalho).

Tabela 2 - Rotações encontradas experimentalmente (RPM). (Fonte: Autores do trabalho).

Medição	Montagem 1 (RPM)	Montagem 2 (RPM)	Montagem 3 (RPM)	Montagem 4 (RPM)	Montagem 5 (RPM)	Montagem 6 (RPM)
1	71,26	53,64	85,13	103,80	70,74	111,84
2	89,46	65,10	109,74	128,71	90,91	145,76
3	194,76	145,24	228,24	256,01	192,70	286,50
4	219,94	163,39	248,69	278,67	216,84	323,93
5	213,87	169,30	260,70	278,67	213,89	321,99
6	245,96	186,77	278,46	312,24	233,63	366,10

A força proporcionada pelas pás fixadas foi obtida de duas maneiras, a primeira de modo experimental, medida com o dinamômetro, foi verificada a maior força de cada montagem, a segunda obtida de modo teórico envolve a massa específica, a velocidade do vento, o coeficiente de arrasto e o diâmetro da pá. Analisando-se os valores encontrados experimentalmente, é

ISBN: 978-987-1676-63-7

possível verificar que existe uma variação do melhor valor encontrado, conforme observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Força encontrada experimentalmente (N). (Fonte: Autores do trabalho).

Medição	Montagem 1 (N)	Montagem 2 (N)	Montagem 3 (N)	Montagem 4 (N)	Montagem 5 (N)	Montagem 6 (N)
1	1,10	1,45	1,01	1,71	1,42	1,10
2	1,98	2,17	1,38	2,22	2,09	1,73
3	6,30	6,77	4,93	6,38	7,93	6,70
4	6,97	8,49	7,15	7,75	8,60	7,57
5	7,89	8,61	8,26	11,40	11,06	8,11
6	11,95	12,85	9,51	12,51	13,70	10,55

Com os valores, é possível analisar teoricamente a montagem que apresenta a maior força é a montagem 2, referente a forma de montagem “B”, seguido pelas formas de montagens “A” e “C” como visto na Tabela 4. Devido à força ter relação direta com a área, é notório que as pás na forma de montagem “B” possuem uma área útil (ilustrada em azul) maior do que a força de montagem “A” e mais observável ainda na forma de montagem “C”, mostrada na Figura 9. A área em vermelho indica um fator que prejudica a força gerada pelas pás.

Tabela 4 - Força por unidade de área (N/m^2). (Fonte: Autores do trabalho).

Medição	Montagem 1 (N/m^2)	Montagem 2 (N/m^2)	Montagem 3 (N/m^2)	Montagem 4 (N/m^2)	Montagem 5 (N/m^2)	Montagem 6 (N/m^2)
1	6,87	9,09	6,35	7,90	6,58	6,88
2	12,43	13,58	8,64	10,27	9,65	10,87
3	39,48	42,44	30,93	29,51	36,67	42,02
4	43,70	53,26	44,80	35,87	39,77	47,44
5	49,44	54,00	51,76	52,73	51,17	50,85
6	74,93	80,54	59,59	57,86	63,37	66,14

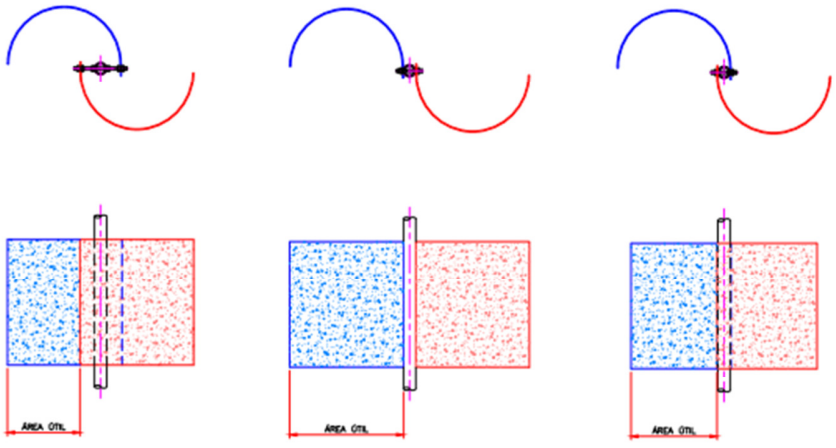


Figura 9 - Área de incidência dos ventos. (Fonte: Autores do trabalho).

De acordo com [5], rendimento é a relação entre a potência aproveitada e a potência total, definido pela Equação (1).

$$\eta = \frac{P_{REAL}}{P_{TOTAL}} \tag{1}$$

Onde:

η é o rendimento adimensional;

P_{REAL} é a potência gerada em W;

P_{TOTAL} é a potência total em W.

Para calcular o rendimento pelo torque, pode-se considerar o torque originado pelo gerador Savonius, de acordo com [6], através da Equação (2).

$$\tau = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot V_m^{\,2} \cdot C_D \cdot D \tag{2}$$

Sendo:

τ o torque em N.m;

ρ a massa específica em kg/m³;

V_m a velocidade média em m/s;

C_D o coeficiente de arrasto adimensional;

D o diâmetro da pá em m.

De acordo com [6], é possível determinar a potência em relação ao torque através da Equação (3).

$$P_{ROTOR} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \tau}{60} \tag{3}$$

Onde:

P_{ROTOR} é a potência no rotor em W;

n é a rotação em RPM;

τ é o torque em N.m.

Para determinar a potência total utiliza-se a Equação (4).

$$P_{TOTAL} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^{\,3} \cdot A \tag{4}$$

Sendo:

P_{TOTAL} a potência total em W;

ρ a massa específica em kg/m³;

V_m a velocidade média em m/s;

A a área de ação do vento em m².

Sendo conhecida a potência do rotor e a potência total, é possível determinar o coeficiente de potência, através da Equação (5).

$$C_P = \frac{P_{ROTOR}}{P_{TOTAL}} \tag{5}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Onde:

C_P é o coeficiente de potência adimensional;

P_{ROTOR} é a potência no rotor em W;

P_{TOTAL} é a potência total em W.

Para a determinação do coeficiente de potência para o torque prático, os valores de velocidade, rotação e força foram obtidos de maneira experimental.

Tabela 5 - Coeficiente de potência para o torque prático. (Fonte: Autores do trabalho).

Medição	Montagem 1	Montagem 2	Montagem 3	Montagem 4	Montagem 5	Montagem 6
1	0,2322	0,2307	0,2731	0,4084	0,2613	0,2731
2	0,1549	0,1241	0,1327	0,1808	0,1273	0,1327
3	0,5564	0,4653	0,4805	0,5091	0,5000	0,4805
4	0,3747	0,3408	0,3671	0,3354	0,3019	0,3671
5	0,2673	0,2414	0,2515	0,2678	0,2116	0,2515
6	0,2420	0,2040	0,1734	0,2032	0,1679	0,1734
Média	0,3171	0,2805	0,3010	0,3403	0,2804	0,3010

Para a determinação do coeficiente de potência para o torque teórico foram utilizadas as Equações (2), (3), (4) e (5).

Tabela 6 - Coeficiente de potência para o torque teórico. (Fonte: Autores do trabalho).

Medição	Montagem 1	Montagem 2	Montagem 3	Montagem 4	Montagem 5	Montagem 6
1	0,0936	0,0704	0,1156	0,2557	0,1783	0,2735
2	0,0823	0,0602	0,1001	0,2148	0,1541	0,2432
3	0,1379	0,1036	0,1568	0,3230	0,2460	0,3628
4	0,1266	0,0949	0,1370	0,2827	0,2221	0,3305
5	0,1037	0,0829	0,1199	0,2364	0,1829	0,2751
6	0,1030	0,0790	0,1099	0,2275	0,1714	0,2690
Média	0,1088	0,0824	0,1259	0,2625	0,1967	0,2970

Os melhores coeficientes de potência para o torque prático foram encontrados nas montagens 1 e 4, pois elas apresentam valores intermediários de rotação e força, conforme observado na Tabela 5, já nos coeficientes de potência para o torque teórico foi verificado que a montagem 6 é a melhor, conforme Tabela 6.

4. CONCLUSÕES

Objetivando um maior rendimento do dispositivo de rotor Savonius através da geometria e configuração de montagem das pás, foi necessário realizar ensaios experimentais, medições e cálculos teóricos para conhecer e analisar os parâmetros relevantes, como a velocidade do vento, força gerada e rotação.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Com base nos resultados obtidos através das simulações no *SolidWorks®*, tratamos o fluido como incompressível e concluímos que não há influencia da força de sustentação nas pás.

Nos ensaios práticos pôde-se verificar que a forma de montagem que apresentou maior valor de coeficiente de potência para o torque foi a Montagem A. Porém, ao analisar os valores teóricos, nota-se que a Montagem C foi a que apresentou maior coeficiente de potência para o torque em comparação com as outras estudadas. A Tabela 7 indica os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 7 - Dados obtidos no experimento.

	Força (N)	Rotação (RPM)	Coeficiente de Potência para o Torque Prático (C_{PP})	Coeficiente de Potência para o Torque Teórico (C_{PT})
Montagem A	6,51	199,45	0,3287	0,1857
Montagem B	7,10	150,18	0,2805	0,1396
Montagem C	5,67	230,58	0,3010	0,2115

É importante salientar que os parâmetros que mais influenciaram nos resultados do rendimento foram: a força para retirar o rotor do estado de inércia e a rotação, que foram obtidos experimentalmente.

5. REFERENCIAS

[1] LIMA, Moisés, A.F.; SANTOS, Italo C.M., *Aquecimento Global ou Resfriamento Global? Eis a questão.* VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovações. Palmas, 2012. Disponível em: <http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/209/1427> Acesso em: 16 maio 2015.

[2] FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J., *Introdução à Mecânica dos Fluidos,* 7ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2010.

[3] BRIGHTON, J. A.; HUGHES, W. F., *Dinâmica dos Fluídos*, Editora McGraw-Hill, Porto Alegre, 2011.

[4] ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M., *Mecânica dos Fluidos*, AMGH Editora, Porto Alegre, 2015.

[5] MELCONIAN, S.; *Elementos de Máquinas*, 9ª edição, Editora Erica, São Paulo, 2009.

[6] DEB, Bachu; GUPTA, Rajat; MIRSA, R.D.; *Performance Analysis of a Helical Savonius Rotor Without Shaft at 45° Twist Angle Using CFD*, Journal of Urban and Environmental Engineering, v.7, n.1, p.126-133.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNISANTA - Universidade Santa Cecília pelo apoio recebido durante toda a execução desta pesquisa e a todos que colaboraram para a produção deste artigo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDO DE CASO DE REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA DE CONDENSADO DE CONDICIONADORES DE AR

Fernando Marques Fernandes[1], **Adilson Vicente da Silva**[1], **Everton Miguel de Brito**[1], **Luiz Antônio da Paz**[1], **Pedro Augusto dos Santos**[1], **Rodrigo Moreno Desesardes Leite**[1], **Antônio Santoro**[1] e **Carlos Alberto Amaral Moino**[1].

[1] Universidade Santa Cecília.
Rua Oswaldo Cruz, 255/277 – Boqueirão – Santos – São Paulo – Brasil – CEP 11045-907
fmarques@unisanta.br

RESUMO

O uso racional da água pode ser feito através de práticas e técnicas que possibilitem a melhoria da eficiência do seu uso, e com isso alcançar uma redução significativa do volume de água potável consumido, hoje utilizada praticamente para a realização de todas as atividades, contribuindo assim para um planeta mais sustentável, minimizando os impactos ambientais causados pelo consumo da água. Além de esgotar todos os recursos tecnológicos disponíveis para reduzir o uso de água, em casa, atividades comerciais e industriais, é preciso pensar em sistemas para o uso adequado da água, isto é reutilizar água, que de outra forma se tornaria água residual, quanto possível por meio de tratamentos adequados. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso da média de produção de água condensada em condicionadores de ar, e propor um sistema de captação dessa água para que seja reaproveitada de maneira racional. Para isso foram feitos cálculos estimativos e experimentos da captação de água condensada de um condicionador de ar de 39.000 btu/h da marca Sanyo. Esse ar-condicionado é capaz de gerar 636 litros de água se permanecer ligado 8 horas em um período de 30 dias em um ambiente semelhante ao de Santos – SP – Brasil. A realização das medições foi feita em uma sala da Universidade Santa Cecília em diferentes dias, para determinar a vazão em vários níveis de umidade e temperatura. Através dos resultados obtidos pode-se constatar que o volume de água condensada em grande escala é suficiente para justificar a viabilidade da implantação de um sistema de captação para o uso desta água. Tendo como locais mais indicados: edifícios comerciais, condomínios, escolas, universidades e demais construções que utilizam vários condicionadores de ar, visando construções mais sustentáveis e mais alinhadas aos padrões de green building.

Palavras Chaves: *reuso; água; sustentabilidade; condicionadores de ar; green building.*

1. INTRODUÇÃO

Sempre que a água com qualidade requerida para determinado uso torna-se um recurso escasso, são buscadas, de forma sistematizada ou não, alternativa de suprimento ou repressão do consumo, para que seja restabelecido o equilíbrio oferta/demanda [5]. Segundo [4] para restabelecer o equilíbrio entre oferta e demanda de água e garantir a sustentabilidade do desenvolvimento econômico e social, torna-se necessário que métodos e sistemas alternativos modernos sejam desenvolvidos e aplicados em função de características de sistemas e centros de produção específicos.

A Gestão de recursos hídricos é um dos maiores desafios do presente século. Com o aumento da população, aumenta o consumo per capita, e o abastecimento de água atual diminui, os recursos hídricos estão cada vez mais críticos a nível mundial [2]. Existem diversos trabalhos e pesquisas sobre o tema, reuso de água, principalmente em países com maior escassez desse líquido. Na maioria dos casos, o reaproveitamento se dá nas indústrias e na agricultura recebendo um tratamento diferenciado dependendo do fim que se destina, porém as práticas relacionadas à conservação e ao reuso da água devem ser reforçadas durante a formação dos profissionais de engenharia e junto aos empreendedores imobiliários, que devem implantar em seus projetos o reuso de água em novas edificações.

Dentro do contexto de preservação e reaproveitamento da água, este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de caso de um sistema de reuso de água condensada nos evaporadores de sistemas de ar-condicionado, e apresentar um estudo para a redução do consumo de água potável em edificações comerciais, onde são utilizados aparelhos de grande carga térmica. Visando demonstrar a viabilidade da proposta, o presente trabalho tem como objetivo específico o estudo de caso em um dos edifícios da Universidade Santa Cecília – Santos – SP - Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelo de Instalação para a Água Obtida do Condensado

O modelo de instalação para a obtenção do condensado foi através do desvio do despejo de dreno do equipamento, que iria para o esgoto. Ou seja, o dreno foi desviado a um reservatório onde se pôde coletar o condensado. O sistema de reuso de condensados de condicionadores de ar viabiliza a junção desses pontos de drenos em diversos caminhos se concentrando em um único reservatório. Esse reservatório por sua vez poderá ter diversos tamanhos, dependendo da quantidade de máquinas no local ou da demanda de água solicitada.

É importante lembrar que a água reutilizada substitui a água potável e que recebe certo tratamento, para fins de limpeza em geral, e não para consumo humano.

Logo após a coleta, realizada de hora em hora, era quantificado seu volume e anotados todos os parâmetros térmicos, como por exemplo, umidade relativa, temperatura de bulbo seco, tanto

ISBN: 978-987-1676-63-7

interna como externa. Com este exemplo se deduz diversos parâmetros, porque de acordo com a capacidade total gerada, pode-se estimar um possível dado de quantificação desse condensado.

2.2. Instrumentos e Materiais Utilizados

Para a realização dos experimentos foram utilizados: um termo higrômetro; um becker e um cronômetro; conforme mostrado nas Figuras 1, 2 e 3 respectivamente. Além destes, foram utilizados cola, conexões e tubos de PVC para a coleta da água.



Figura 1 - Termo higrômetro digital. (Fonte: Autores do trabalho).



Figura 2 – Becker. (Fonte: http://www.microbac.com.br)



Figura 3 - Cronômetro. (Fonte: http://www.spinlab.com.br/cronometros)

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3. Estudo da Vazão – Método Teórico

Para a obtenção dos valores psicrométricos necessários aos cálculos da quantidade de condensado que sairá pelo dreno do condicionador de ar, conforme [1], optou-se pela utilização do software PsyCalc (Psychrometric Calculator Properties of Air), conforme mostrado na Figura 4, pelo fato dos resultados obtidos serem mais precisos do que a observação visual da carta psicrométrica.

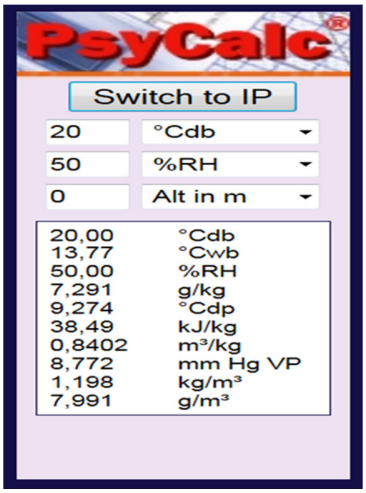


Figura 4 - Software Utilizado para a obtenção de valores psicrométricos. (Fonte: http://www.uigi.com/WebPsycH.html)

1° Passo: Obtenção dos valores de umidade absoluta $(W_{Ar\ Ext})$ e volume específico $(v_{l_{Ar\ Ext}})$, para a temperatura externa (T_E) e umidade relativa externa (Ur_{Ext}).

2° Passo: Obtenção do valor de umidade absoluta $(W_{Ar\ Int})$ e volume específico $(v_{l_{Ar\ Int}})$, para a temperatura interna (T_I) e umidade relativa interna (Ur_{Int}).

3° Passo: Obtenção do valor de umidade absoluta $(W_{S\ Sat})$, para a temperatura da serpentina do evaporador e umidade relativa (Ur) de 100% (ar saturado).

4° passo: Cálculo da vazão mássica do ar $(\dot{m}_{Ar\ Comb})$ utilizando como referência uma renovação do ar de 10%.

Para o cálculo da vazão de ar no evaporador foi utilizada a Equação (1):

$$Q_{Ar\ Evap} = \left(\frac{m^3}{min}\right) \tag{1}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Foi necessário identificar a vazão de ar que passava através do evaporador do equipamento (este dado pode ser obtido através do manual do fabricante do equipamento ou utilizando um anemômetro para fazer a medição).

Para o cálculo do volume específico da temperatura externa e interna foram utilizadas as Equações (2) e (3).

$$v_{l_{Ar\ Ext}} = \left(\frac{m^3}{kg}\right) \tag{2}$$

$$v_{l_{Ar\ Int}} = \left(\frac{m^3}{kg}\right) \tag{3}$$

Para o cálculo do volume específico do ar combinado foi utilizada a Equação (4).

$$v_{l_{Ar\ Comb}} = (v_{l_{Ar\ Ext}} \text{ x } \%\text{Renov}_{\text{Ar Ext}}) + [v_{l_{Ar\ Int}} \text{ x } (1 - \%\text{Renov}_{\text{Ar Ext}}] = \left(\frac{m^3}{kg}\right) \tag{4}$$

Para o cálculo da massa do ar combinado foi utilizada a Equação (5).

$$\dot{m}_{Ar\ Comb} = \frac{Q_{Ar\ Evap}}{v_{l_{Ar\ Comb}}} \frac{(\frac{m^3}{min})}{(\frac{m^3}{kg})} = \left(\frac{kg}{min}\right) \tag{5}$$

5° passo: Cálculo da vazão de água no evaporador $\left(Q_{Água}\right)$

Sendo:

A umidade absoluta do ar externo a Equação (6).

$$w_{Ar\ Ext}(\frac{kg_{H_2O}}{kg_{Ar\ Seco}}) \tag{6}$$

A umidade absoluta do ar interno a Equação (7).

$$w_{Ar\ Int}(\frac{kg_{H_2O}}{kg_{Ar\ Seco}}) \tag{7}$$

A umidade absoluta do ar saturado a Equação (8).

$$w_{S\ Sat}\ (\frac{kg_{H_2O}}{kg_{Ar\ Seco}}) \tag{8}$$

A renovação do ar 10% a Equação (9).

$$w_{Ar\ Comb} = (w_{Ar\ Ext} \text{ x } \%\text{Renov}_{\text{Ar Ext}}) + [w_{Ar\ Int} \text{ x } (1 - \%\text{Renov}_{\text{Ar Ext}}] \tag{9}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

A umidade absoluta do ar combinado a Equação (10).

$$w_{Ar\ Comb} = \left(\frac{kg_{H_2O}}{kg_{Ar\ Seco}}\right) \tag{10}$$

A massa de água a Equação (11).

$$\dot{m}_{Água} = \dot{m}_{Ar\ Comb}\ x\ (w_{Ar\ Comb} - w_{S\ Sat}) \tag{11}$$

Com a densidade da água a 21º C = 0,997992 (g/cm^3) [3], a massa de água fica conforme a Equação (12).

$$\dot{m}_{Água} = \frac{kg}{min} / 0.997992\ \left(\frac{g}{cm^3}\right) \tag{12}$$

Então a vazão de água do evaporador fica conforme a Equação (13).

$$Q_{água} = \frac{l}{min}\ x\ 60\left(\frac{l}{h}\right) \tag{13}$$

2.4. Ensaio para Medição da Capacidade de Geração de Condensado

Este estudo é realizado por meio de uma pesquisa que se caracteriza como quantitativa.

Foi feita a observação de como o experimento amostral se comporta dentro do período de tempo predeterminado, em um registro de coleta a cada 60 minutos. Ao observar como o experimento funciona, o operador coleta os resultados e registra em um relatório de acompanhamento, com a data da coleta, a duração da coleta e a quantidade de água coletada. A partir deste acompanhamento foram realizadas as análises dos registros de dados para comprovar se o ar condicionado produz sempre a mesma quantidade de água.

O coletor de águas estava localizado junto ao dreno do ar condicionado instalado na sala de testes. No local funcionavam 02 condicionadores de ar, sendo um de 39.000 btu/h da marca Sanyo modelo SPW - T365XH, e o outro de 54.000 btu/h também da marca Sanyo modelo SPW – T485XH. Os aparelhos trabalham com fluído refrigerante R410a, que mantém o insulamento do evaporador a aproximadamente 12,5º C.

3. RESULTADOS

A estimativa realizada demonstrou que, se em uma hora são coletados 2,65 litros de água, em 1 mês com o ar-condicionado ligado 08 horas diariamente, serão coletados 636 litros de água, por aparelho de 39.000 btu/h.

A sala de testes tem uma capacidade de refrigeração total instalada de 93000 btu/h, pode-se estimar uma grande quantidade de água de condensado conforme demostrado na Tabela 1, que apresenta a vazão do condensado em diferentes níveis de umidade relativa com a temperatura externa fixada em 30ºC e interna fixada em 21ºC, e a Figura 5 que apresenta o gráfico gerado.

Tabela 1 - Simulação da vazão do condensado em diferentes umidades. (Fonte: Autores do trabalho).

T_E (TBS) (°C)	T_I (°C)	T_S (Evaporador) (°C)	Ur_{Ext} (%)	V_{Ar} (m³/min)	$\%\text{Renov}_{\text{Ar}}$	$\dot{m}_{Ar\ Comb}$ (Kg/min)	$\dot{m}_{Água}$ (Kg/min)	$Q_{água}$ (l/h)
30	21	12,5	55	10	10	11,7905	0,0012	0,074
30	21	12,5	60	10	10	11,7879	0,0029	0,171
30	21	12,5	65	10	10	11,7852	0,0045	0,269
30	21	12,5	70	10	10	11,7826	0,0061	0,366
30	21	12,5	75	10	10	11,7798	0,0078	0,465
30	21	12,5	80	10	10	11,7772	0,0094	0,563
30	21	12,5	85	10	10	11,7745	0,0110	0,663

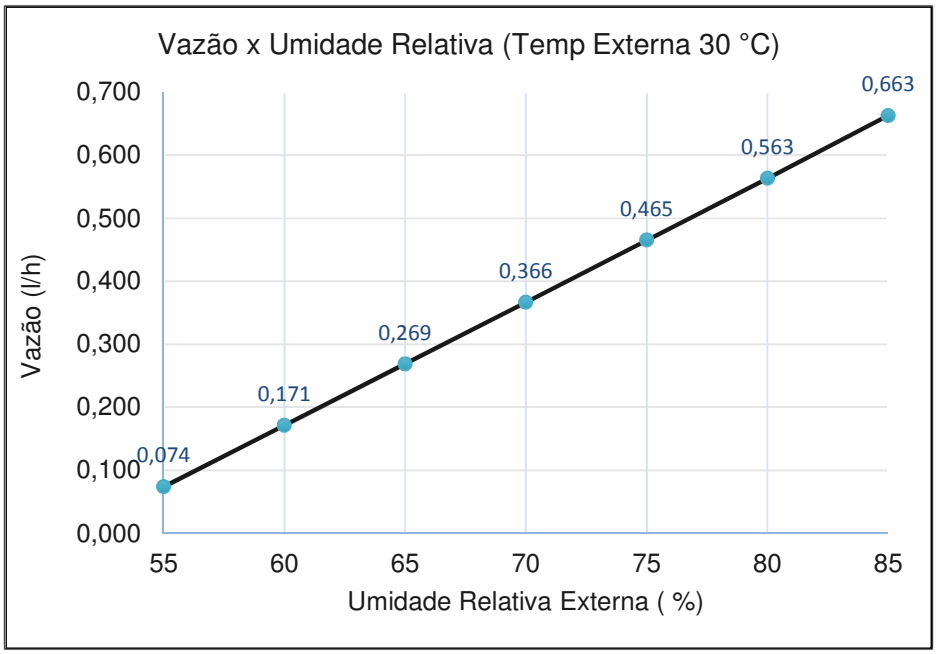


Figura 5 - Gráfico da vazão do condensado em diferentes níveis de umidade. (Fonte: Autores do trabalho).

Com base nos resultados práticos obtidos nos ensaios, pode-se estimar a economia de água a ser alcançada no prédio em estudo, o qual tem um consumo médio mensal de 600.000 litros de água, e 402 TR de capacidade de refrigeração nos condicionadores de ar conforme Tabela 2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 2 - Economia média de água consumida da rede externa. (Fonte: Autores do trabalho).

39.000 btu/h = 3,25 TR	
Vazão (l / h)	2,65
12.000 btu/h = 1,00 TR	
Vazão (l / h)	0,82
Capacidade de Refrig. (TR)	402
Funcionamento Horas/Dia	8
Funcionamento Dias/Mês	30
Vazão (l / Mês)	78.668
Consumo de água da rede/mês	
Vazão (l / mês)	600.000
Economia (%)	13,11

4. CONCLUSÕES

Através dos resultados práticos e teóricos estimamos obter uma média de 636 litros de água condensada em um condicionador de ar de 39.000 Btu/h operando 8 horas diárias durante um mês.

Com os dados obtidos pode-se constatar que o volume de água condensada em grande escala é suficiente para justificar um projeto de sistema de captação de condensado para posterior utilização desta água. Tendo como locais mais indicados: edifícios comerciais, condomínios, escolas, universidades e demais construções que utilizam uma grande quantidade de condicionadores de ar, sendo que em regiões como a de Santos – SP – Brasil onde foi feito o estudo de caso, predomina na maioria dos meses elevada temperatura (28 °C) e alta umidade relativa do ar (80%), parâmetros psicrométricos que favorecem uma maior vazão de água condensada.

Serve como sugestão a construtores, engenheiros e empreendedores ligados a construção civil, que é economicamente e ecologicamente viável a implementação do sistema visando construções mais sustentáveis e alinhadas aos padrões de green building.

Uma das vantagens que o sistema de reuso de água de condensado apresenta em relação a outros métodos é que os equipamentos de ar condicionado de edifícios comerciais costumam operar praticamente todos os dias do ano durante o horário comercial produzindo água de condensação. Isto também representa um resultado econômico significativo na administração econômica do empreendimento, e um grande avanço nas questões ambientais referentes à

ISBN: 978-987-1676-63-7

economia da demanda de água potável fornecida pela empresa pública, que por ser uma água tratada , deveria ser utilizada apenas para fins potáveis e não para lavar pisos, carros e calçadas.

5. REFERENCIAS

[1] SILVA, J.C.; SILVA, A.C.G.C., *Refrigeração e Climatização para Técnicos e Engenheiros*, Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2007.

[2] MOTA, S., *Introdução à Engenharia Ambiental*, Editora ABES, Rio de Janeiro, 2012.

[3] BORNAKKE, C.; SONNTAG, R.E., *Fundamentos da Termodinâmica*, Editora Blucher, São Paulo, 2013.

[4] COELHO, A. C. e MAYNARD, J. C. B. *Medição Individualizada de Água em Apartamentos,* Editora Comunicarte, Recife, 1999.

[5] ORNELAS, P., *Reúso de água em edifícios públicos: o caso da Escola Politécnica da UFBA - 2004,* Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecn. Ambientais no Processo Produtivo), Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNISANTA - Universidade Santa Cecília pelo apoio recebido durante toda a execução desta pesquisa e a todos que colaboraram para a produção deste artigo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

CUANTIFICACIÓN Y CALIFICACIÓN DE LA ENERGÍA TÉRMICA DISPONIBLE EN UN MOTOR DIESEL DE PROPULSIÓN FERROVIARIA, PARA SU RECUPERACIÓN, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE CICLOS RANKINE ORGÁNICOS

Maenza Luis Eduardo[1], Valea, Juan Francisco[2]; Oga, Juan Jose[3], Vernière, Pablo Raúl[4], Cantarelli, Marcio Walter[5], Donati, Julio Guido[6] y Baratçabal, Agustín Nicolás[7]

[1, 2, 3, 4, 5, 6,7] Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
correo-e: investigacionprimariasuns@gmail.com
[1, 2, 3, 4,6] Instituto Universitario Naval, ESOA, Puerto Belgrano
[1]correo-e: contactoenfoco@gmail.com
[2]correo-e: francisco.valea@uns.edu.ar
[3]correo-e: juanjose.oga@uns.edu.ar
[4]correo-e: pablo.verniere@uns.edu.ar
[5]correo-e: marcio.cantarelli@uns.edu.ar
[6]correo-e: juliogdonati@hotmail.com
[7]correo-e: abaratcabal@gmail.com

RESUMEN

El objetivo del trabajo es calificar y cuantificar la energía térmica recuperable en un motor Diesel de propulsión ferroviaria marca General Motors 12-645 C mediante la utilización de ciclos Rankine orgánicos, para lo cual se relevaron parámetros reales de funcionamiento, del mismo, y en función de la información disponible, se desarrolló una metodología para evaluar la energía recuperable, tanto cuantitativa como cualitativamente.
Atendiendo a una posible futura implementación se trabajó sobre ciclos Rankine organicos, básicos, por su relativa sencillez mecánica. En función del escenario de funcionamiento previsto y utilizando el calor que puede aportar el sistema de refrigeración del motor, se establecieron las temperaturas y magnitud de las fuentes fría y caliente. A modo de referencia se calcularon los rendimientos de Carnot y luego se resolvieron los ciclos propuestos utilizando el software SOLKANE®, asignándole, a los parámetros de funcionamiento, valores lo más cercanos a la realidad en función de la información disponible.
Se obtuvieron valores de recuperación de energía relevantes en determinadas condiciones de operación del motor, lo que anima a proseguir el trabajo, por un lado ajustando la precisión de la información relevada, mediante una adecuación de la instrumentación de monitoreo de funcionamiento del motor. Por otro explorando la posibilidad de incorporar ciclos con sobrecalentamiento o regeneración, utilizando el calor disponible en los gases de escape del motor.

Palabras clave: *ORC, Locomotora, Eficiencia Energética, Diesel, Recuperación*

1. INTRODUCCIÓN

La recuperación térmica de diversas fuentes de energía residual está cobrando un fuerte interés por parte de gobiernos e industrias.
Esta búsqueda de sistemas energéticos más eficientes, se orienta particularmente a los MCIA (fuentes muy numerosas de energía térmica residual [1]). El objetivo del presente es estudiar esta posibilidad de recuperación energética para un motor Diesel de propulsión ferroviaria, que puede extenderse a los propulsores de otros medios de transporte (aéreo, marítimo, automotriz, ferroviario, etc).

Sólo una parte de la energía puesta en juego por la combustión se convierte en trabajo útil en el eje propulsor del MCIA. Un porcentaje muy importante de esa energía se disipa en los sistemas de gases de escape, de refrigeración y por radiación.

Para mejorar el balance energético pueden utilizarse Ciclos Rankine Orgánicos (ORC) a fin de recuperar parcialmente el calor evacuado a la atmósfera por los MCIA. Estos ciclos son similares al Ciclo Rankine tradicional, utilizado mayoritariamente para la generación de energía eléctrica. La diferencia más importante radica en el fluido de trabajo empleado, en vez del agua, se utiliza un fluido frigorífico orgánico de bajo punto de evaporación; el cual permite recuperar calor, de bajo nivel térmico, para generar trabajo mecánico.

En estos ciclos se transfiere ese calor al fluido de trabajo en un intercambiador que cumple el rol de un evaporador. Los fluidos orgánicos que se utilizan pasan del estado líquido a fase vapor a valores relativamente elevados de presión. Luego evolucionan en un expansor, generando, de esta forma potencia mecánica. El ciclo se completa, condensando el fluido de trabajo y elevando su presión mediante una bomba hasta la presión de evaporación.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es el de calcular en base a los diferentes parámetros de funcionamiento y bajo distintas condiciones de carga, la energía térmica que un motor de propulsión ferroviaria cede al medio ambiente, para luego estimar la energía mecánica que podría obtenerse a partir de la misma .

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. DESARROLLO

El estudio se basa en un motor ferroviario Diésel de dos tiempos, modelo 12-645 C de 12 cilindros que desarrolla una potencia máxima de 963 kW (1310 CV) con admisión por lumbreras y escape por 4 válvulas a la cabeza. El aire de barrido de admisión es proporcionado por dos sopladores Roots acoplados mecánicamente al motor, la inyección es directa y mecánica con una bomba-inyector en la cabeza de cada cilindro.

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Las bombas de refrigeración pueden entregar un caudal máximo de 1800 dm^3/min y son accionadas a una velocidad proporcional a la de giro del propio cigüeñal. Como se aprecia en el siguiente esquema el fluido refrigerante es impulsado por las bombas, ingresa a las camisas del motor, absorbiendo calor de los cilindros, luego se dirige a las culatas, y finalmente, egresa de las mismas, atravesando una serie de conductos que están en contacto con los gases de escape.

Posteriormente, el refrigerante circula por el radiador donde disminuye su temperatura, intercambiando calor con el medio ambiente, y luego continúa hacia un depósito e intercambiador donde refrigera al aceite lubricante del motor. Finalmente, el fluido reingresa a las bombas de circulación para comenzar nuevamente su servicio.

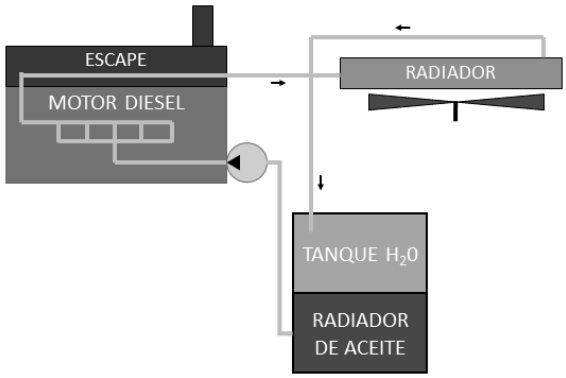


Figura 1: Esquema del circuito de refrigeración

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS DATOS EN BANCO DE PRUEBAS

Del ensayo en banco de pruebas de una de las maquinas en cuestión, con la disposición que muestra la Fig.2, se obtuvieron los siguientes datos:

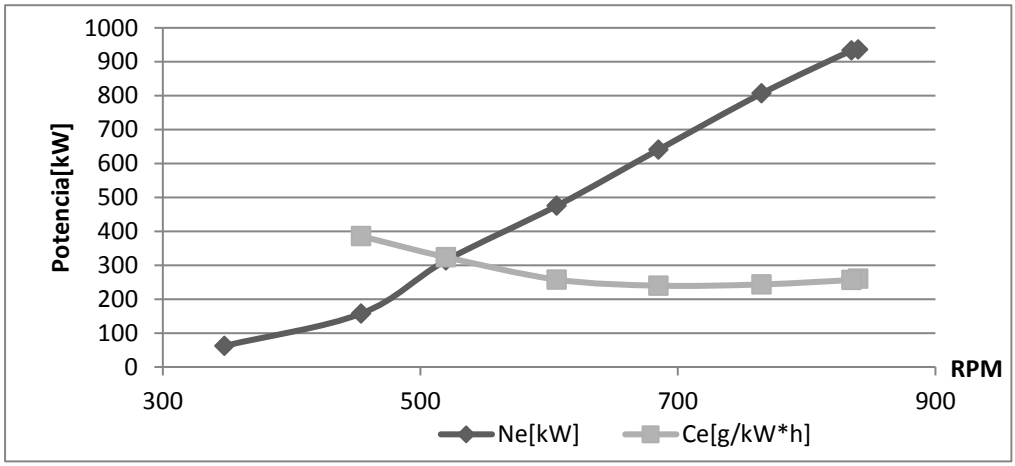


Figura 2: Gráfica de Ne y Ce en función de RPM

La potencia al freno declarada por FEPSA tiene en cuenta los accionamientos auxiliares del compresor, generador auxiliar, caja multiplicadora y ventilador, por lo que el cálculo de potencia basado en tensión y corriente debe afectarse por un coeficiente establecido por la empresa (ver figura 3)

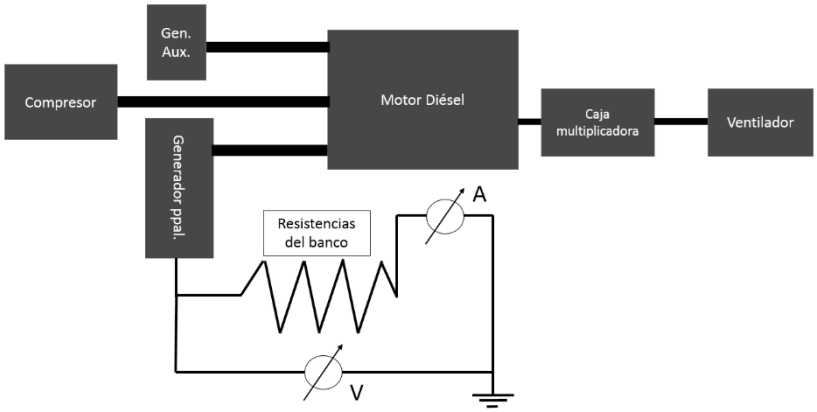


Figura 3: Diagrama de disposición de los equipos auxiliares y de medición de potencia eléctrica

Con los valores relevados en el banco de ensayo y datos complementarios de funcionamiento se confeccionó la tabla adjunta:

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Parámetros de funcionamiento

RPM	Potencia al freno [kW]	Caudal bombas [dm^3/seg]	Temp. de líquido refrig. de entrada al radiador [°C]	Temp. de líquido refrig. a la salida del radiador [°C]	Temperatura del recinto (Fuente Fría) [°C]	Flujo calórico extraído en el radiador [kW]
840	936	30,0	90	82	30	968
835	933	29,8	90	82	30	960
765	806	27,3	85	78	30	771
685	640	24,5	80	74	30	564
606	475	21,6	75	71	30	387
520	314	18,6	69	66	30	238
454	157	16,2	65	63	30	128
348	62	12,4	58	57	30	61

El flujo calórico extraído por el radiador, es expresado por la ecuación (1):

$$\dot{Q} = \left(\dot{m}.\, c_p.\, \Delta t\right) \qquad (1)$$

Nota: si bien el líquido refrigerante que utiliza el motor no es estrictamente agua, con un margen de error mínimo se tomará su calor específico para el cálculo, debido a que en este tipo de motores la máxima concentración de aditivos presentes nunca excede el 2 % en volumen [2]

A fin de calificar el desempeño de un ciclo Rankine orgánico, como el propuesto, para la recuperación parcial de energía térmica en un MCIA, se comparó su eficiencia con la de un ciclo de Carnot, trabajando con el mismo salto térmico, cuyos resultados se volcaron en la tabla 2, y se utilizaron las siguientes expresiones

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (2)$$

$$N_c = \eta_c.\, \dot{Q} \qquad (3)$$

Se analizaron alternativas de implementación con diferentes configuraciones de ciclos ORC [3]. Lógicamente aquellas que alcanzan los mejores rendimientos son también las más complicadas y voluminosas, ya que requieren la duplicación de componentes (evaporadores, condensadores, etc.). Considerando que eventualmente el equipo, debe instalarse en una locomotora de propulsión ferroviaria, se priorizaron:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Compacidad y peso del equipamiento.
- Complejidad mecánica y requerimientos de mantenimiento.
- Costo inicial.

Consecuencia de lo enunciado se decide inicialmente trabajar sobre un ciclo ORC simple, priorizando su sencillez a expensas de su eficiencia. A tal fin, se calculó la potencia y el rendimiento que se puede obtener si se instala un ciclo Rankine Orgánico (ORC) simple, sin regeneración, ni sobrecalentamiento, modificando el sistema de refrigeración del motor objeto de este estudio. Se propone que la sustracción de calor al líquido refrigerante del motor, por el sistema ORC, sea equivalente al efecto del radiador de refrigeración original, de acuerdo a un esquema como el de la figura 3.

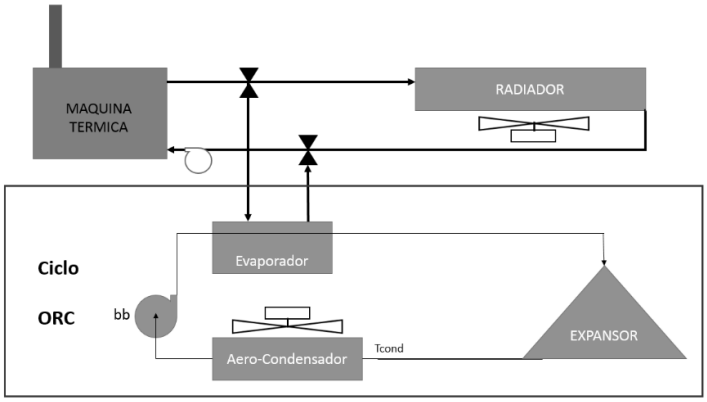


Figura 3: Ubicación esquemática del ciclo ORC dentro del sistema de refrigeración

Cabe acotar que para la selección del fluido frigorífico nos basamos en los criterios utilizados por Apostol et. al. [3] y Venturino et. al. [4], y, que se basan fundamentalmente en un adecuado comportamiento termodinámico, un mínimo impacto ambiental y disponibilidad comercial, concluyendo que los f.f. más aptos para nuestro caso de estudio son R134a y R123.

Para conocer el comportamiento termodinámico del ciclo ORC (principalmente potencia erogada y rendimiento) se utilizó el programa SOLKANE® 8.0 que es una base de datos informatizada creada por la empresa SOLVAY específicamente para realizar cálculos de ciclos de refrigeración utilizando diferentes configuraciones y fluidos frigoríficos.

Ingresando los datos abajo listados en SOLKANE® obtenemos los resultados que muestran los diagramas y se exponen en la tabla 2.

- Fluido de trabajo a utilizar.
- Temperatura del fluido frigorífico en el evaporador y en el condensador.
- Capacidad térmica.
- Rendimientos de los diferentes componentes del sistema ORC.

ISBN: 978-987-1676-63-7

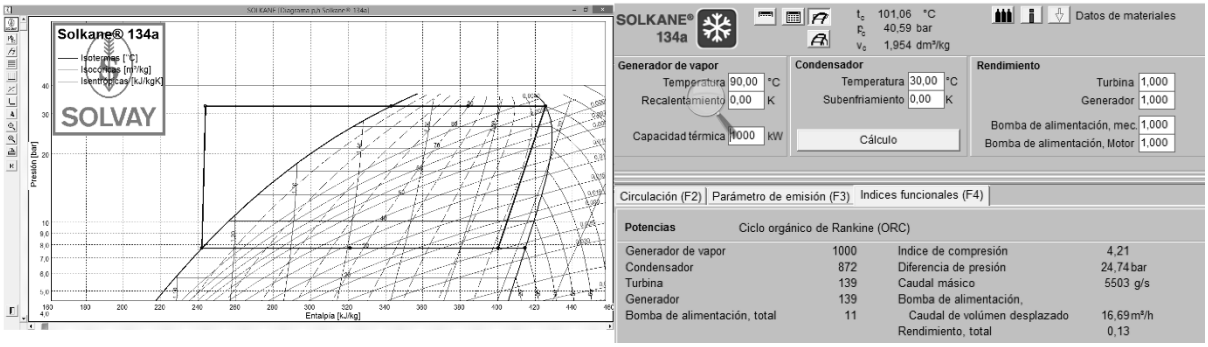


Figura 4: Gráfica en el plano P-h del ciclo ORC con R134a (izq.) y pantalla de ingreso de datos (der.)

De la simple observación de los ciclos, resultan evidentes las diferencias de presión y volúmenes resultantes, lo cual influye directamente en el tamaño de los equipos y la resistencia mecánica de tuberías, accesorios y componentes. También se observa que en el caso del R134a, la curva de expansión termina en la zona de vapor húmedo, lo que podría causar problemas en el expansor, o plantearía la necesidad de sobrecalentar a 110 °C, lo que no es posible utilizando como fuente de calor, solo el líquido refrigerante del motor, como alternativa se podría limitar la evaporación a 75°C y 25 bar, para que la expansión no concluya en condición de vapor húmedo.

Los datos obtenidos con el software SOLKANE® se muestran en las tablas 3 y 4 y comparados con aquellos obtenidos con el ciclo de Carnot. Como se dijo anteriormente.

Tabla 2. Resultados de rendimientos y potencias obtenibles utilizando la teoría de Carnot y SOLKANE® para diferentes estados de carga del MCIA

RPM/Pot al Freno [kW]	Potencia máxima Carnot [kW]	Rend. Máquina de Carnot (%)	Potencia máxima para **R123** según SOLKANE	Rend. ciclo ORC (%)	Vol esp. a salida de expansor [dm^3/kg]	Potencia máxima para **R134a** según SOLKANE	Rend. Ciclo ORC (%)	Vol esp. a salida de expansor [dm^3/kg]
840/936	160	17	138	14	146,2	135	13	24,5
835/933	158	16	128	13	146,2	134	13	24,5
765/806	119	15	103	13	145,7	102	12	24,9
685/640	80	14	70	12	145,2	70	12	25,3
606/475	50	13	44,5	11	144,7	44,5	11	25,6
520/314	27	11	24,5	10	141,1	24,6	10	25,8
454/157	13	10	12,1	9	143,7	12,2	9	25,9
348/62	5	8	-	-	143,1	-	-	26,1

ISBN: 978-987-1676-63-7

También, es importante mencionar que criterio se debe adoptar en la consideración de los rendimientos de los diferentes equipos constitutivos del modelo, no contemplada hasta el presente. La performance que más influye, en este aspecto, es la del expansor utilizado y en este estadío de desarrollo del estudio no pueden aún determinarse las características del mismo, motivo por el cual no es posible estimar con precisión su rendimiento, por lo que no se lo considera. Consecuencia de esta decisión los resultados obtenidos indicarían eficiencias superiores a las que realmente podrían alcanzarse, lo cual debe tenerse presente al valorizar los resultados.

En cambio, tanto para el evaporador como para el condensador puede considerarse una diferencia entre la temperatura del fluido con respecto a las fuentes, durante el proceso de intercambio de calor, que disminuye la temperatura de evaporación y aumenta la temperatura de condensación. Dichas variaciones en la temperatura traen consigo una disminución de la potencia máxima obtenible y del rendimiento del ciclo.

Conocer a ciencia cierta dichos saltos de temperatura entre fluidos implica diseñar y calcular los intercambiadores de calor, tareas que corresponden a una etapa posterior de desarrollo, por lo que en el presente trabajo se utilizaron saltos de temperatura acordes de acuerdo a criterios expresados por Wang et. al. [5]

Según recomienda Wang, el salto que existe entre la temperatura del líquido de refrigeración y el fluido evaporado no puede ser menor a 2 °C, siendo apropiado para nuestro caso de estudio un salto de temperatura del orden de 3°C, considerando las temperaturas de servicio del líquido refrigerante del motor y el flujo calórico que se intercambia.

Por otro lado el mismo autor sugiere que la temperatura de condensación tiene que ser del orden de 40 °C, pero en nuestro caso se toma una temperatura de condensación más alta, de 45 °C, teniendo en cuenta las condiciones más desfavorables para el caso, que serían las temperaturas máximas promedio del ambiente en verano (entre 30 y 40 °C) en la región central de nuestro país.

Del análisis de los resultados que se muestran en las tablas 3 y 4 y figuras 5a y 5b puede verse que no solo el rendimiento es considerable ya que estaría en el 50% aproximadamente que el de un ciclo de Carnot equivalente, sino además que la potencia lograda resulta interesante, sobre todo cuando el motor está cerca de las condiciones de plena carga.

Por ejemplo en aplicaciones particulares como la que nos ocupa, si observamos la disposición de los equipos auxiliares acoplados al motor (ver fig. 3), la potencia que requiere su accionamiento podría obtenerse de la recuperación que se lograría utilizando un ciclo ORC, como el propuesto, desvinculándolos de la planta motriz.

ISBN: 978-987-1676-63-7

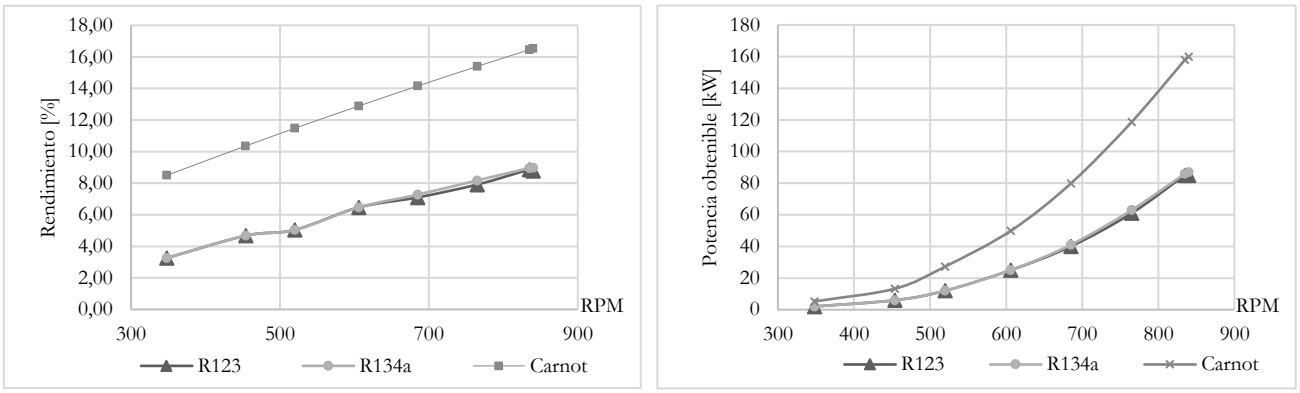
Tabla 3: Resultados de rendimientos y potencias obtenibles utilizando SOLKANE® cuando se consideran las caídas de temperatura en los intercambiadores de calor del sistema ORC utilizando R134a

RPM/Potencia al Freno [kW]	Flujo calórico extraído [kW]	Temp del f.f. (en el evap)[°C]	Temp del f.f. (en el cond) [°C]	Potencia máxima con R134a según SOLKANE [kW]	Rendimiento del ORC (%)
840/936	968	79	45	87	8
835/933	960	79	45	86	8
765/806	771	75	45	63	7
685/640	564	71	45	41	7
606/475	387	68	45	25	6
520/314	238	63	45	12	5
454/157	128	60	45	6	4
348/62	61	54	45	-	-

Tabla 4: Resultados de rendimientos y potencias obtenibles utilizando SOLKANE® cuando se consideran las caídas de temperatura en los intercambiadores de calor del sistema ORC utilizando R123

RPM/Potencia al Freno [kW]	Flujo calórico extraído radiador [kW]	Temp. del f.f. (en el evap.) [°C]	Temp del f.f. (en el cond.) [°C]	Potencia máxima con R123 según SOLKANE [kW]	Rendimiento del ORC (%)
840/936	968	79	45	85	9
835/933	960	79	45	83	8
765/806	771	75	45	61	7
685/640	564	71	45	40	7
606/475	387	68	45	25	6
520/314	238	63	45	12	5
454/157	128	60	45	6	4
348/62	61	54	45	2	3

ISBN: 978-987-1676-63-7



(a) (b)

Figura 5: (a) Comparación de rendimiento de ciclos ORC, con diferentes fluidos y la máquina de Carnot; (b) Comparación de potencia de ciclos ORC, con distintos fluidos y la máquina de Carnot

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido desarrollar una metodología relativamente sencilla y directa para, calificar y cuantificar la energía aprovechable proveniente del motor diésel ferroviario en estudio. El uso de la misma puede extenderse además a su aplicación en otro tipo de motores (de aplicación ferroviaria u otras).

Los resultados obtenidos permiten afirmar que solo en adecuadas condiciones de carga de la máquina (por encima del 70 %), la potencia recuperada efectivamente podría resultar útil para un aprovechamiento ulterior. Como corolario de lo anteriormente afirmado se puede decir que estos sistemas de recuperación de energía tienen una factibilidad de uso mayor en motores térmicos, que trabajen con elevados porcentajes de cargas, durante largos periodos de tiempo**.** Así y todo el nivel de potencia recuperado resulta muy interesante, en las condiciones establecidas.

Considerando los resultados obtenidos, debe ser muy precisa la selección o el diseño de los diferentes componentes, particularmente el expansor, para alcanzar valores de eficiencia cercanos a los calculados.

De los dos fluidos considerados en el presente, si bien la potencia recuperada es semejante, atendiendo a la compacidad de los equipos que requieren resulta mucho más interesante el 134a que el 123, ya que la diferencia de volumen específico es notable, lo que hace a los equipos mucho más compactos y livianos.

En función de los resultados obtenidos se considera importante desarrollar el estudio del desempeño de ciclos regenerativos o sobrecalentados, para mejorar los resultados que pueden obtenerse y aprovechar el calor recuperable de los gases de escape, lo que además permitiría evitar la condición de vapor húmedo, luego de la expansión, para el R134a.

ISBN: 978-987-1676-63-7

7. REFERENCIAS

[1] Usman, Muhammad; Imran, Muhammad; Yang, Youngmin; Park, Byung-Sik, "Impact of Organic Rankine Cycle system installation on light duty vehicle considering both positive and negative aspects", Energy Conversion and Management vol 112: p.382-384, 2016

[2] Mesny, Marcelo, "*Manual de mantenimiento Diesel*" Ed. Alsina, 1958.

[3] Apostol, Valentin; Pop, Horatiu; Dobrovicescu, Alexandru; Priesecaru, Tudor, Alexandru, Ana; Prisecaru, Mälina "Thermodinamic Analysis of ORC Configurations Used for WHR from a Turbocharged Diesel Engine". Procedia Engineering, vol 100: p. 549-558, 2015

[4] Venturino, Enrique; Valea, Juan Francisco; Oga, Juan Jose; Donati, Julio Guido; Maenza, Luis Eduardo; Baratcabal, Agustin Nicolas, "Diseño de un banco de ensayo que permita evaluar el desempeño, caracterizar fluidos y relevar parámetros de funcionamiento en un ciclo Rankine orgánico" , 2do Congreso de Energía Sustentable, 2016

[5] Wang, Xurong ; Yang, Yi ; Wang, Mingkun ; Zheng, Ya ; Wang, Jiangfeng ; Dai, Yiping, "Utilization of waste heat from intercooled, reheat and recuperated gas turbines for power generation in Organic Rankine Cycles" , 3rd International seminar on ORC Power Systems, 2015

8. NOMENCLATURA Y ABREVIATURAS

ORC: Ciclo Rankine orgánico
MCIA: Motor de combustión interna alternativo
RPM: Revoluciones por minuto
Ne: Potencia efectiva [kW]
Ce: Consumo especifico de combustible [g/kW.h]
$\dot{Q}$: Flujo calórico extraído por el radiador [kW]
$\dot{m}$: Caudal másico del fluido refrigerante [kg/s]
Cp.: Calor especifico del fluido de refrigeración [J/g. K]
Δt: Salto térmico del refrigerante entre entrada y salida del radiador [K]
ηc: Rendimiento de la máquina de Carnot
T_2: Temperatura de fuente fría [K]
T_1: Temperatura de fuente caliente [K]
N_c: Potencia erogada por la máquina de Carnot [kW]
f.f: Fluido frigorífico
v: volumen especifico [dm^3/kg]

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

CALENTADOR SOLAR DE AIRE BASADO EN TECNOLOGÍA WICKLESS LOOP HEAT PIPE, PARA APLICACIONES AGROPRODUCTIVAS.

Gomez Khairallah A. [1], **Cattaneo C.** [2], **Togo S.** [2], **Biasoni E.**[2], **Gomez Khairallah U.** [1]

[1] Departamento Académico de Mecánica – FCEyT-Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina
correo-e: agomez@unse.edu.ar.

[2] Departamento Académico de Fisica – FAyA-Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, Santiago del Estero, Argentina
correo-e: cacatta@unse.edu.ar.

RESUMEN

Las aplicaciones técnicas de aprovechamiento térmico destinado a actividades agroproductivas, basadas en energía solar como lo son sistemas de desalación, producción de agua caliente sanitaria y en particular el calentamiento de aire, apuntan cada vez más a mejorar el desempeño de estos sistemas, optimizando el uso de los recursos materiales, humanos y energía empleada para su construcción.

La tecnología de tipo Heat Pipe en combinación con sistemas de tubo evacuado [1], ampliamente empleada para producción de agua caliente sanitaria, es el ejemplo más representativo de la situación mencionada, circunstancia que motivó el desarrollo local de una alternativa técnica basada en tecnología de termosifón bifásico cerrado de tipo Wickless Loop Heat Pipe (WLHP) [2] destinada al calentamiento de aire. En el presente trabajo se expone una variante novedosa de la tecnología mencionada, adaptada a la disponibilidad de materiales así como también a la tecnología de manufactura disponibles en el medio, en el trabajo se describen las características del equipo construido, sus ventajas respecto de otras alternativas, las variables sobre las que se actuó, destacándose las dos más importantes para las diferentes condiciones de ensayo, las que fueron el fluido de trabajo y el grado de llenado del sistema.

Los resultas obtenido del equipo ensayado empleando Agua y R141b como alternativas de fluido de trabajo, permiten inferir en primera instancia una dependencia importante del desempeño del sistema con el fluido de trabajo empleado en su funcionamiento, de forma semejante el grado de llenado del sistema. Así mismo la forma y disposición de la placa absorbedora permite mejorar el aprovechamiento del recurso solar tanto en el amanecer como en el atardecer del ciclo diario.

Palabras Claves: *Wickless Loop Heat Pipe,Colector solar de aire.*

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo estratégico de las políticas económicas regionales de agregar valor a las producciones primarias del agro, implican el crecimiento de la demanda de energía en todas sus formas, en localidades del interior de las distintas provincias, una situación de suma complejidad de carácter técnico, económico y político, sobre todo en lo que se refiere a las redes de gas natural como fuente de energía térmica.

En el caso de las actividades agroproductivas de secado, una solución alternativa a las convencionales, es el aprovechamiento del recurso solar, existiendo variedad de trabajos que abordan la temática desde esta óptica con sistemas de colección de características semejantes en todas ellas, con un común denominador, el aire a ser tratado (calentado por la radiación solar captada por el colector), atraviesa el colector del sistema de aprovechamiento solar, que posee por diseño, color, textura y demás características que lo hacen idóneo para dicha aplicación. Este rasgo común, provoca la rápida degradación de las características del colector por la deposición sobre este de particulado, afectando su desempeño en el tiempo.

El sistema que se describe en el presente trabajo pretende solucionar esta complicación, por medio de la implementación de tecnología de tipo Wickless Loop Heat Pipe (WLHP) que basa su funcionamiento en la evaporación y condensación cíclica de un fluido de trabajo en dos dispositivos de transferencia de calor, los que son el sistema de evaporación y el sistema de condensación, vinculadas por medio de tuberías conformado un sistema hermético, constituyendo el primer prototipo que emplea tecnología de tipo (WLHP) diseñado, construido y ensayado por el equipo de trabajo, y representa tecnología innovadora a nivel regional, a pesar de emplear conceptos físicos básicos.

La tecnología (WLHP) empleada en el prototipo, permite aislar la circulación de aire a ser tratado del sistema de colección de calor, en este caso representado por el evaporador, de modo que el aire atraviesa el sistema de condensación, quitando el calor ganado por el sistema de evaporación que constituye el colector.

Otra de las características que justifican tanto la iniciativa del trabajo es que los sistemas de tubos de calor planos, ofrecen ventajas respecto de los sistemas cilíndricos convencionales como lo es aumentar la relación área superficial a volumen con el fin de maximizar la densidad de potencia (de placa1). De igual forma y en el mismo sentido, trabajos tanto experimentales como de simulación de sistemas de estas características concluyen que un sistema de tipo (WLHP) es más eficiente en cuanto a transferencia de calor respecto al propio sistema Heat Pipe [2]

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. DESCRIPCION DEL SISTEMA PROTOTIPO CONSTRUIDO.

El sistema Wikless Loop Heat Pipe (WLHP) construido y ensayado en la ciudad de Santiago del Estero basa su funcionamiento en un conjunto de fenómenos físicos básicos que permiten la transferencia de calor por medio del cambio de fase de un fluido que evoluciona en el interior del sistema. Este consta de dos dispositivos técnicos de transferencia de calor, el evaporador y el condensador, el evaporador, que se encuentra integrado a la placa colectora de características especiales para optimizar el aprovechamiento del recurso primario, la radiación solar en este caso, es el encargado como su nombre lo indica de evaporar el fluido de trabajo gracias al calor ganado por la placa colectora. El fluido evaporado asciende por el evaporador por diferencia de densidad, alcanzando la parte más alta de este, donde es canalizado por medio de una tubería debidamente aislada hacia el condensador, dispositivo que permite precisamente la condensación del fluido de trabajo, cediendo calor al fluido tratado, aire en este caso, el que incrementa su temperatura en su tránsito por el condensador, una vez liquido el fluido de trabajo, desciende por acción de la gravedad, y es canalizado nuevamente al ingreso del sistema de evaporación por una tubería externa al sistema de colección conformado todo el conjunto un sistema hermético.



Figura 1: Imagen lateral del prototipo construido

El sistema evaporador está constituido por ocho tubos de cobre liso de 0,0083m de diámetro y 2m de longitud, soldados desde el frente sobre una lámina de acero cincado acanalada, que constituye la placa colectora, en los extremos de los tubos se encuentra instalado un sistema de vinculación de entre sí que permite una única entrada y salida del evaporador. Todo el sistema de absorción conformado por el evaporador y la placa colectora se encuentran instalados en un batidor construido de tubo estructural con dimensiones externas de 2,04x1,04x 0,28m con una cubierta transparente de policarbonato alveolar de 0,004m de

ISBN: 978-987-1676-63-7

espesor, mientras que el resto de las caras se encuentran revestidas de lámina de acero pintada de negro, con una capa de material aislante de fibra de vidrio de un espesor medio de 0,07m, todo este conjunto de dispositivos y elementos de sujeción, aislación constituyen precisamente el colector.

El sistema condensador se encuentra instalado en forma externa al dispositivo colector, logrando con este diseño sortear el inconveniente de los diseños de colector mencionados. Se trata de un arreglo de 13 tubos de cobre de 0,0063m de diámetro, con aletado externo con separación de 0,0025m, este conjunto tiene 0,33m X 0,26m X 0,08m como dimensiones externas, que además se encuentra aislado por medio de espuma de poliestireno. En el propio condensador se encuentra instalado un motoventilador de 0,25m de diámetro, encargado del movimiento de aire atreves del sistema, siendo expulsado de este por medio de un tubo de descarga que facilita la medición del flujo de aire en el sistema, según se puede apreciar en la Figura 1.

3 FLUIDO DE TRABAJO

El fluido de trabajo idóneo para ser empleado en un sistema de las características mencionadas debe cumplir ciertos condicionantes como lo son la compatibilidad con los materiales de construcción, que las presiones de trabajo no provoquen solicitaciones mecánicas que pongan en riesgo la integridad estructural del equipo, que sea amigable con el medio ambiente e inocuo para la salud y que además sea de fácil adquisición en el mercado. Este conjunto de condicionantes acota de forma importante las posibilidades de sustancia a elegir como potenciales de ser empleado en ensayos sobre el sistema siendo seleccionados para este trabajo dos fluidos, R141b y agua.

En relación al desempeño del sistema, este es afectado de forma importante con el grado de llenado del sistema, entendiéndose por tal, al porcentaje de líquido albergado en el evaporador respecto del volumen total de este, por lo que para los fines del presente trabajo se realizaron pruebas con los fluidos mencionados en días con niveles de radiación solar muy semejantes con un grado de llenado del 60% para los dos fluidos de trabajo seleccionados.

Para el ensayo del sistema colector construido, se registraron 6 (seis) temperaturas diferentes en distintas partes del equipo como lo son la temperatura de salida de gas desde el evaporador, la temperatura de salida de fluido condensado desde el condensador, la temperatura de ingreso y egreso de aire del condensador, la temperatura ambiente del aire en las inmediaciones del sistema ensayado y la temperatura del fluido en su reingreso al evaporador, que son indispensables para la caracterización del mismo así como también la velocidad de circulación del aire en la salida del condensador para la determinación en forma indirecta el flujo de aire con su correspondiente corrección por temperatura y la radiación solar en el plano del colector y la presión reinante en el interior del sistema.

4. RESULTADOS

Las mediciones se concretaron por duplicado para cada una de las dos sustancias seleccionadas como fluidos de trabajo, con días de radiación solar semejante en los días 11, 12, 22 y 23 de febrero en ciudad de La Banda, de la provincia de Santiago del Estero cuyas coordenadas de ubicación geográfica son 27°47′04″S 64°16′01″O. Donde los días 11 y 12 se ensayó el equipo utilizando refrigerante R141b como fluido de trabajo, mientras que los dos días restantes, el equipo se ensayó con agua, identificada R718 en la denominación de los refrigerantes.

En los cuatro ensayos del prototipo, el motoventilador encargado del movimiento de aire se encendió en su máxima velocidad, registrándose en el tubo de salida de aire una velocidad constante de 4m/seg.

Con los datos registrados en los ensayos, la valoración del desempeño del prototipo se hace por medio de un indicador, el rendimiento, que se determina según la Ecuación (1), semejante a como lo hacen en su trabajo otros autores reconocidos en la temática [3].

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{AI} \tag{1}$$

Donde el calor útil Qu se determina como se indica en la Ecuación (2), donde Cp representa el calor especifico del aire y Δt la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del aire del condensador del sistema ensayado, A es el área efectiva del colector y I la intensidad de la radiación solar.

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_P \Delta t \tag{2}$$

El flujo másico ṁ de la Ecuación (2) se determina en forma indirecta por medio de las mediciones de la velocidad de circulación de aire en el tubo de salida de aire y la temperatura del aire en este punto según la Ecuación (3), en la que δ representa la densidad del aire a la temperatura a la que este se encuentra, ν y A_t son la velocidad del aire y el área transversal en el punto de medición.

$$\dot{m} = \delta \nu A_t \tag{3}$$

En la Figura 2 se expone los resultados de la medición de la radiación solar incidente en el plano del colector, la cual es representativa de los cuatro días de medición sobre el prototipo, se aprecia valores que alcanzan los 1300w/m2 para el máximo lo que representa valores por demás interesantes para aplicaciones de aprovechamiento del recurso solar. Las fluctuaciones en la línea negra de la gráfica se asocian a perturbaciones de tipo atmosférica como lo es una ligera nubosidad transitoria, mientras que la curva continua roja resulta de una regresión polinómica del conjunto de valores medidos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

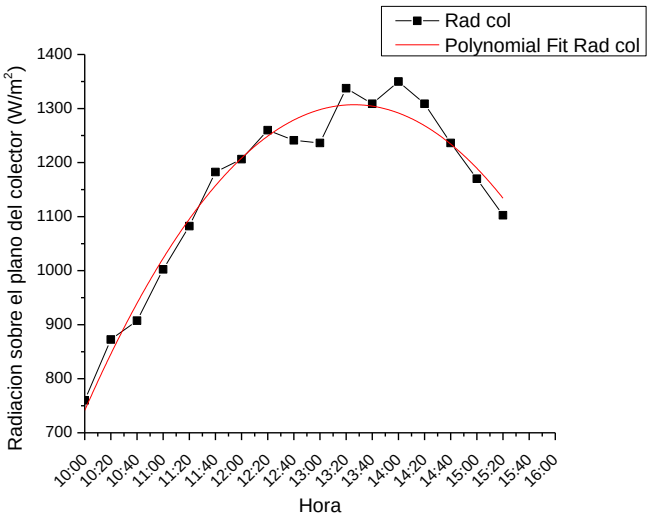


Figura 2: Registro de radiación solar sobre el plano del colector, día 11/02.

La evolución temporal de las diferentes temperaturas medidas, se visualizan en la Figura 3, en la que además de estos valores se encuentran los valores de la temperatura de evaporación del fluido de trabajo empleado, la que se determina en forma indirecta con la ayuda de la tabla de presiones de saturación del fluido empleado y el registro de la presión reinante en el interior del sistema en cada instante. Por medio de esta última temperatura, se puede inferir acerca de las condiciones de funcionamiento del equipo ya que por simple observación del alejamiento de la temperatura de evaporación y la de salida del gas desde el evaporador hacia el condensador, se puede establecer el grado de recalentamiento que posee.

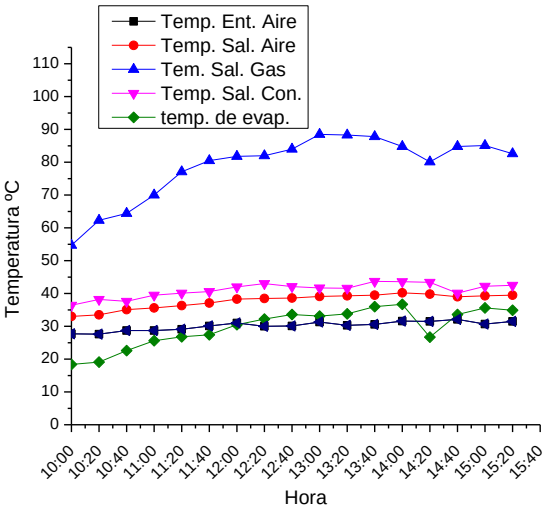


Figura 3a

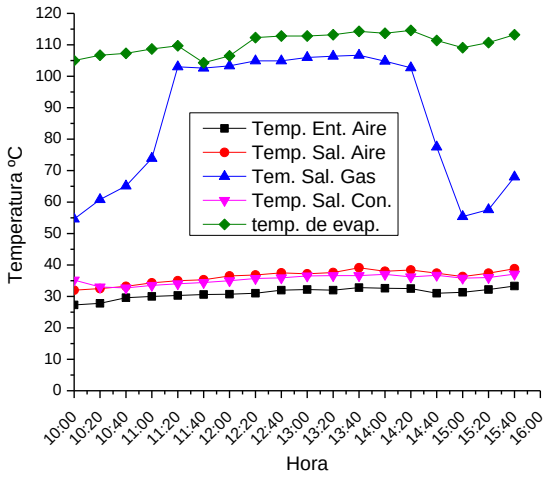


Figura 3b

Figura 3: Evolución temporal de la temperatura en el prototipo a) con R141b como fluido de trabajo, b) con R718 como fluido de trabajo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Figura 3 se infiere para el caso del sistema cargado con R141b en primera medida una importante diferencia de temperatura entre la temperatura de evaporación del fluido de trabajo y la temperatura de salida de gas al que se lo denomina recalentamiento, así como también en lo concerniente al efecto útil del dispositivo, representado por la ganancia de temperatura del aire que atraviesa el mismo se encuentra en el orden de los 8 ºC que resulta de interés para las aplicaciones mencionadas en un principio, siendo factible técnicamente, en caso se ser requeridos valores mayores, la instalación de dos o más de estos equipos en serie, uno a continuación de otro.

Un análisis semejante para el caso del sistema funcionando con R718 se tiene que para la gran mayoría del tiempo la temperatura de salida del vapor no alcanza la temperatura de saturación del fluido de trabajo, a pesar de existir un flujo másico circulando en el interior del sistema ya que se aprecia una ganancia de temperatura en el flujo de aire que atraviesa el sistema que ronda en este caso los 5,5ºC.

El calor ganado por el fluido de trabajo en el evaporador resulta de tres mecanismos en su tránsito a través de este, en primera instancia en su ingreso hacia el evaporador desde el condensador, se encuentra en fase liquida, incrementa su temperatura hasta alcanzar la temperatura de evaporación, a partir de esta región el fluido cambia de fase, siendo esta la porción de mayor interés del calor ganado y la que es preciso maximizar con la modificaciones pertinentes, una vez alcanzada esta fase el vapor ya próximo a la salida se recalienta hasta salir. Estas regiones se pueden identificar en la imagen termográfica de la Figura 4. La cuantificación del calor ganado en cada una de las etapas mencionadas, relacionado con el calor útil calculado en la Ecuación 2 permite determinar en forma indirecta el flujo másico del fluido de trabajo en el interior del sistema WLHP según la Ecuación 4 donde m_{ft} es el flujo másico del fluido de trabajo, Cpl, Cpv, Il y Iv son el calor especifico y la entalpia del líquido y el vapor respectivamente, además Tsg es la temperaturas de saturación del fluido de trabajo a la presión en el interior del sistema, Tgs temperatura de salida de fluido de trabajo desde el condensador y Tge la temperatura de vapor recalentado de salida del evaporador.

$$\dot{m}_{ft} = {Q_u}\Big/{\left[C_{pl}\left(T_{sg} - T_{gs}\right) + \left(I_v - I_l\right) + C_{pv}\left(T_{ge} - T_{sg}\right)\right]} \tag{4}$$

Los valores instantáneos promedio obtenidos para el flujo másico fueron de 0,00119 Kg/seg. con el sistema funcionando con refrigerante R141b como fluido de trabajo y 0,000070Kg/seg. para el sistema funcionando con R718, lo que representa un flujo 17 veces mayor para el caso del R141b, situación que permite explicar la discrepancia en las imágenes termográficas de la Figura 4.

ISBN: 978-987-1676-63-7

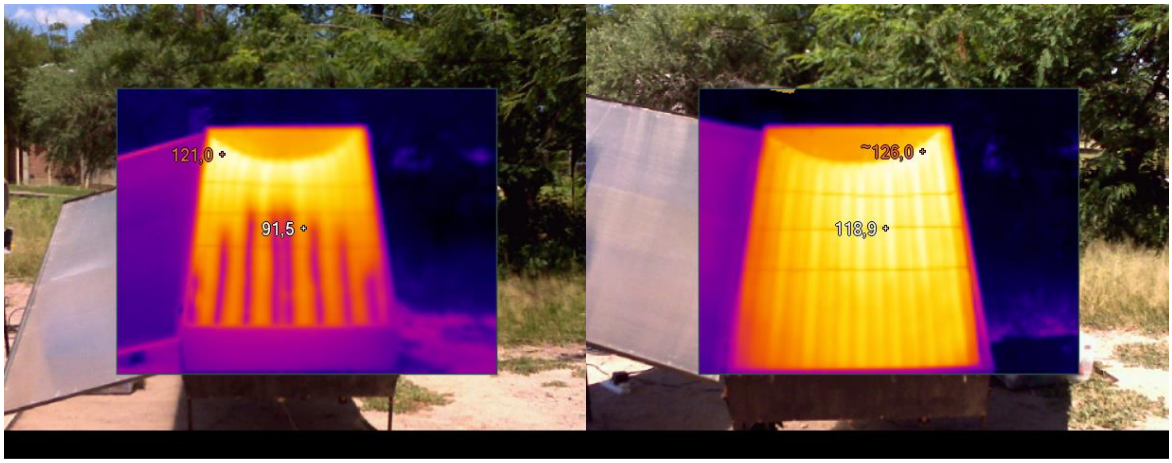


Figura 4a Figura 4b

Figura 4: Imágenes termográficas a) con R141b como fluido de trabajo, b) con R718 como fluido de trabajo.

Los valores indicados en las imágenes termográficas de la Figura 4 son los registros de temperatura en grados Centígrados obtenidos en forma indirecta por medio de una cámara termografica Fluke TI25 de los puntos más calientes y de la temperatura en el punto central, surge de la comparación con los registros de temperatura medidos en forma directa de salida de gas de la Figura 3 (Curvas celeste) una importante diferencia, la que se puede explicar por inconvenientes de aislación de la tubería que conecta la salida del sistema evaporador directamente con el sistema condensador asociado además a la importante masa de cobre de este último.

En la Figura 5 se tiene la representación del rendimiento del sistema funcionando con los dos fluidos de trabajo seleccionados, de la misma surge que los rendimientos rondan el 40% para el caso del sistema funcionando con R141b, mientras que el mismo equipo funcionando con R718 posee un 30% de rendimiento, asociando en gran medida esta discrepancia al hecho de que con este fluido no se alcanza en forma permanente la temperatura de saturación del fluido de trabajo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

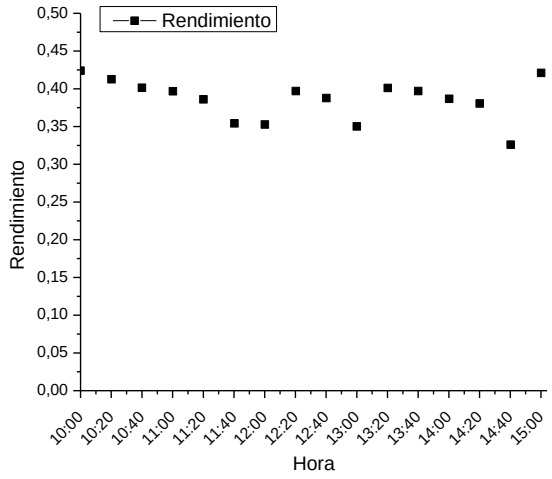


Figura 5a

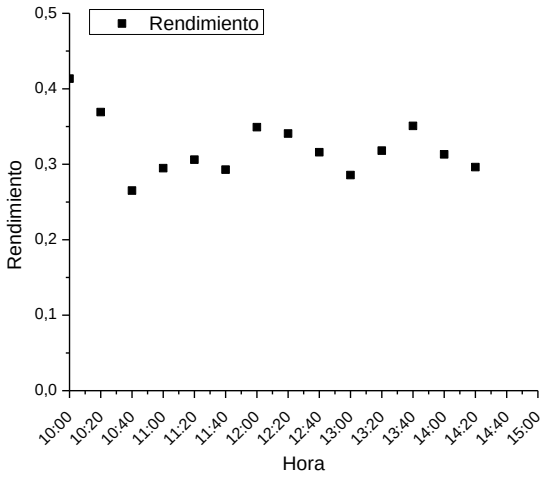


Figura 5b

Figura 5: Rendimiento del prototipo, a) con R141b como fluido de trabajo, b) con R718 como fluido de trabajo.

5. CONCLUSIONES

De la experiencia adquirida en el proceso de construcción, de los resultados de las mediciones y su análisis, se puede comentar que se logró un prototipo funcional al objetivo inicial de lograr un sistema hermético, en el que la placa absorbedora no se degrade por el uso del equipo (por el ensuciamiento de la placa absorbedora con polvo ambiental). Se trata de una tecnología prometedora en esta aplicación de calentamiento de aire y en el caso de aplicaciones de gran importancia como lo es la desalación de agua ya que como surge de la Figura 3 se alcanzaron temperaturas del orden de los 100 ºC.

Resulta claro que el desempeño del sistema construido depende fuertemente del fluido de trabajo empleado, de modo que es pertinente continuar buscando alternativas viables en cuanto a las limitaciones de mismo que permitan mejorar el desempeño del mismo.

Dependiendo del fluido de trabajo empleado, el sistema puede alcanzar elevados valores de recalentamiento (Diferencia de temperatura entre la temperatura del vapor de salida y la temperatura de saturación del fluido de trabajo a la presión reinante en el interior del sistema) considerado perjudicial a los fines de lograr el máximo desempeño del sistema, por lo que en cada caso se considera pertinente actuar sobre las variables del sistema como lo es el grado de llenado.

6. REFERENCIAS

[1] Placco C., Saravia L., Cadena C., Colectores solares para agua caliente, http://www.inti.gob.ar/e-renova/pdf/colectores_solares_aguacaliente.pdf.

[2] Hirasawa S., Sato S., Kawanami T., Study on Heat Transfer Characteristics of Loop Heat Pipe for Solar Collector, Transaction on control and mechanical systems, vol. 2, Nº 4, PP. 149-154, APR., 2013.

[3] Tanaka H., Nakatake Y. A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector Elsevier, Desalination 160 (2004) 195–205.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE EMISSÃO E CONCENTRAÇÃO DAS EMISSÕES DE PARTÍCULAS DE UMA PILHA DE ESTOCAGEM DE MINÉRIO DE FERRO

Suelem M. Melo[1], **Sthephanie C. Zucoloto**[1], **Raquel A. Viana**[1] **y Reginaldo R. C. de Paula**[1]

[1] Coordenadoria de Física, Instituto Federal do Espírito Santo, Ifes,
Av. Vitória, 1729, Vitória, Espírito Santo, Brasil
correo-e: stephanie.cz@hotmail.com

RESUMEN

A estocagem de pilhas de minério de ferro em pátios abertos é uma prática muito comum pois tem-se uma grande vantagem em relação ao armazenamento em vagões ou silos. Neste método pode-se armezar uma grande quantidade de minério de ferro, por longos períodos de tempo e a custo relativamente baixo [1]. Entretanto, devido a ação do vento tem-se as emissões fugitivas de material particulado destas pilhas de estocagem, que causam sérios problemas ambientais, danos a saúde humana, bem como geram corrosão e sujeira em superfíces [2]. Análises dos mecanismos de erosão de partículas são cruciais para avaliar os seus impactos ambientais. No presente trabalho foram realizados experimentos de túnel de vento com objetivo de identificar uma relação entre o tempo de emissão e o aumento da concentração em massa de partículas provenientes de pilhas de minério de ferro. Para alcançar este objetivos foram realizados experimentos com uma pilha formada por partículas de minério de ferro ultrafino. Para uma mesma velocidade do vento foram realizados diversas simulações físicas para diferentes intervalos de tempo. As partículas foram coletadas em diferentes pontos no interior do túnel de vento com o uso do método de superficies modificadas e a concentração em massa do material coletado foi determinado por gravimetria.

Palabras Claves: *pilhas de estocagem, poluição atmosférica, túnel de vento.*

1. INTRODUCCIÓN

As indústrias siderúrgicas e de mineração do ferro têm grande importância na economia brasileira. No Brasil estas atividades desempenham um papel fundamental em termos econômicos, no qual o pais é o 9º produtor mundial de aço bruto, sendo 2% do total mundial e 52,5% do total da América Latina [3].

Na indústria da mineração do ferro destacam-se também os procesos de estocagem e o manuseio do minério de ferro, que são atividades logísticas importantes para a redução de custos e aumento de produtividade. O minério de ferro pode ser estocado de diferentes formas: em vagões ferroviários, em silos e em pilhas em pátios abertos no caso de produto beneficiado [1].

A estocagem em pilhas é um método bastante usado na mineração, pois a grande vantagem sobre os outros tipos é a de permitir o armazenamento de grandes quantidades, por longos períodos de tempo e a custo relativamente baixo.

Em anos recentes devido ao aumento da demanda mundial pelo minério de ferro pilhas de estocagem em pátios tem-se tornado uma prática comum para o armazenamento de grandes quantidades deste material. Entretanto, as emissões fugitivas de material particulado destas pilhas de estocagem além de causarem sérios problemas ambientais.

O mecanismo de erosão eólica de partículas é muito complexo, pois depende de vários fatores, tais como: características do vento (direção, velocidade e rajadas); altura da pilha exposta ao vento; parâmetros das partículas (por exemplos, diâmetro, massa específica, geometria e teor de umidade) e topografia do local [4, 5 e 6].

Na erosão de partículas forças aerodinâmicas tendem a remover os grãos da superfície em que se encontram, e as forças gravitacionais e de adesão entre partículas tendem a resistir à remoção [7]. Dependendo do balanço dessas forças, podem-se desenvolver três tipos de movimentos: rolamento, saltação e suspensão [4].

Pátios de estocagem são formados por grandes áreas abertas em sítios industriais usados para acumulação de material granular que sofrem o processo de erosão eólica e que podem lançar na atmosfera uma grande quantidade de partículas. A poluição atmosférica pelo material particulado pode causar uma redução da visibilidade, gerar corrosão e sujeira em superfícies (prédios, tecidos, outros materiais e estruturas). Os efeitos adversos a saúde humana estão associados à capacidade do sistema respiratório de remover as partículas inaladas, presença nas partículas de

ISBN: 978-987-1676-63-7

substâncias tóxicas e de compostos orgânicos que possuem propriedades carcinogênicas. Além disso, podem ser consideradas as doenças respiratórias, cardiovasculares, decréscimo da função pulmonar, ataque de asmas, ataques cardíacos, arritmia cardíaca, morte pré-matura [8 e 9].

O entendimento do campo de vento nas proximidades de uma pilha de material é crucial nas análises dos mecanismos de erosão de partículas e de seus impactos ambientais [2]. Uma metodologia proposta pela Agência de Proteção Ambiental Americana [8] é geralmente adotada para estimar as emissões geradas pela erosão do vento com base nas medições da velocidade do vento.

Em anos recentes vários estudos da dinâmica dos fluidos computacional (DFC) têm sido realizados para investigar os mecanismos de erosão de partículas e estimar a potencial velocidade do vento que causa este mecanismo de pilhas de materiais [10 e 11]. Estudos realizados por [12] mostraram que aparentemente existe uma diferença entre os resultados numéricos das predições da velocidade do vento nas proximidades das pilhas em relação aos processos reais de erosão.

Experimentos de túnel de vento tornam-se uma importante ferramenta nas análises das emissões de partículas de pilhas de minério de ferro, bem como podem ser utilizados para validar as predições numéricas. Neste contexto o objetivo principal deste trabalho foi investigar experimentalmente a relação entre o tempo de emissão e o aumento da concentração em massa de partículas provenientes de pilhas de minério de ferro.

2. METODOLOGIA

Para realizar os experimentos foi utilizado um túnel de vento de camada limite atmosférica de retorno aberto com seção de testes de (2,0 x 0,5 x 1,5) m localizado em Alto Lage, Cariacica, E.S. Para gerar uma camada limite atmosférica em condições de estabilidade neutra no interior do túnel de vento foram construídos agulhas e elementos rugosos cúbicos de acordo com a metodologia proposta por [13]. Foram utilizadas três agulhas de madeira com dimensões 0,32 m de altura, 0,083 m de largura da base e 0,09m de distância uma da outra posicionadas a barlavento dos elementos rugosos cúbicos de 0,05 m de aresta. Estes foram colocados a barlavento da seção de testes em um padrão diamante com um comprimento total de 1,20 m.

O perfil vertical do vento gerado na entrada da seção de testes do túnel de vento segue uma lei de potência de acordo com a equação (1):

$$u(z) = u_o(z/z_o)^p \quad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

onde: u é a velocidade do vento na altura z; u_o é a velocidade de referencia medida na altura da pilha; z é altura z_o é altura de referencia p = 0,35 é o parâmetro de rugosidade. O parâmetro *p* de rugosidade superficial adotado foi 0,35 de acordo com Categoria V da NBR-6123/88 [14].

A geometria e dimensões da pilha em escala reduzida teve como base um modelo de pilha do pátio da Vale S/A (escala 1/300) conforme estudos realizados por [4], cujas dimensões foram: 0,27 m de comprimento, 0,13 m de largura e 0,053 m de altura. No presente trabalho foram utilizadas partículas de minério ultrafino na montagem das pilhas. Este minério foi fornecido pelo Laboratório de Metalografia do Ifes, Campus Vitória.

Em todos os processos de empilhamento do minério de ferro ultrafino foi utilizado o método Cone Shell na qual foi utilizado um funil plástico. Foi também utilizado um cilindro de madeira para descompactar o minério no interior do funil conforme ilustra a Figura 1. Este procedimento de montagem da pilha evitou a compactação do minério de ferro.



Figura 1: Processo de estocagem de partículas de minéiro ultrafino no interior do túnel de vento.

Para determinar a influência do tempo de emissão de partículas da pilha de minério foram analisadas quatro velocidades do vento:, 4,0 m/s; 4,6 m/s e 5,5 m/s. Para a coleta de partículas foi utilizado o método de substituição de superfícies com o uso de fita adesiva de dupla face para evitar a resuspensão das partículas. A coleta ocorreu em três diferentes pontos ao longo do eixo central do túnel de vento: x = 2,5 h_p, 6,25 h_p e 10 h_p, onde h_p é a altura da pilha.

Utilizou-se a análise gravimétrica para determinar a concentração em massa/m^2 da emissão de partículas com o uso de uma balança digital analítica de capela com carga máxima de 500 g e mínima de 0,02 g (menor divisão 0,001 g). Para filmagem do transporte de partículas foi utilizada uma máquina digital FUJIFILM HS10 com velocidade de captura de imagens 240 frames por segundo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A superfície foi pesada antes da coleta e com muito cuidado foi fixada na base do túnel de vento. Para cada velocidade do vento foram analisados os seguintes intervalos de tempo: 3min; 5 min; 8 min e 10 min. Após estes intervalos de tempo a superficie era retirada do interior do túnel de vento e imediatamente pesada para evitar a contaminação das amostras coletadas. Porém, em alguns casos estas amostras eram perdidas, sendo necessária a eliminação desta rodada experimental.

3 RESULTADOS

As Figuras 2 e 3 mostram uma visualização das emissões de partículas da pilha de minério para o vento externo incidindo na pilha com velocidade de 4,6 m/s e 5,5 m/s (velocidade de referencia no topo da pilha) para um intervalo de tempo de 8,0 min. Na Figura 2 pode-se observar um transporte de partículas da região frontal da pilha pelos vórtices ferraduras. Na Figura 3 pode-se observar uma significativa emssão de partículas do topo da pilha devido ao mecanismo de suspensão. Na base da pilha também foi observado um transporte de partículas da região frontal da pilha pelos vórtices ferraduras. Parte destas partículas são transportadas a jusante e parte penetram na região de esteira próxima da pilha.



Figura 2: Visualização da emissão de partículas da pilha de minério. Seta laranja: transporte de partículas a jusante pelos vórtices ferraduras.

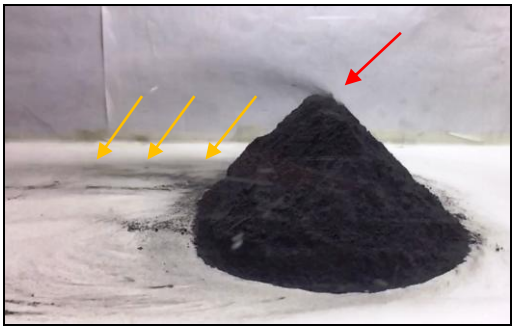


Figura 2: Visualização da emissão de partículas da pilha de minério. Seta vermelha: Emissão de partículas do topo da pilha. Seta laranja: transporte de partículas a jusante pelos vórtices ferraduras.

A Tabela 1 mostra os resultados experimentais das emissões de partículas de minério para velocidade do vento externo de 4,0 m/s incidindo no topo da pilha. Os resultados sugerem que para baixas velocidades do vento não ocorreram variações significativas das emissões de partículas de minério com o tempo de emissão. Para o primeiro ponto de emissão, x = 2,5 h_p foi observada praticamente a mesma quantidade em massa de partículas coletadas. Em x = 10 h_p, observa-se uma grande discrepância nos resultados obtidos para Δt = 10 min, em relação aos outros intervalos de tempo considerado, pois a foi obtida uma massa menor de partículas coletadas. Este erro pode estar associado ao processo de coleta considerado ou a precisão da balança utilizada.

Tabela 1. Relação entre tempo de emissão em massa de partícula coletada em diferentes pontos para velocidade do vento de 4,0 m/s.

Δt = 3 min		
Posição	Massa (g)	Concentração (g/cm^2)
2,5 h_p	0,034	$7{,}15 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,020	$4{,}21 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,018	$4{,}39 \times 10^{-4}$
Δt = 5 min		
2,5 h_p	0,031	$6{,}42 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,019	$3{,}88 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,015	$3{,}31 \times 10^{-4}$
Δt = 8 min		
2,5 h_p	0,031	$7{,}06 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,022	$4{,}90 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,013	$2{,}94 \times 10^{-4}$
Δt = 10 min		
2,5 h_p	0,031	$7{,}13 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,013	$2{,}78 \times 10^{-4}$
10,0 h_p	0,008	$1{,}62 \times 10^{-4}$

ISBN: 978-987-1676-63-7

A Tabela 2 mostra os resultados experimentais das emissões de partículas de minério para velocidade do vento externo de 4,6 m/s incidindo no topo da pilha. Para o primeiro ponto de coleta, x = 2,5 h_p ocorreu um aumento da massa de partículas coletadas no intervalos de tempos de 3 min para 5 min de 13,3%, de 5 min para 8 min de 5,00% e de 8 min para 10 min de 8,00%. Assim, não ocorreu um aumento significativo com o aumento do tempo de coleta. Em x = 6,25 h_p, nos intervalos de tempo de 3 min para 5 min ocorreu um aumento de 75,00%, de 5 min para 8 min, observou-se uma redução de 17,85% e de 8 min para 10 min, não houve variação da massa de partículas coletadas. Em x = 10h_p, de 3 min para 5 min, ocorreu um aumento de 57,14%, e uma redução de 57,14% de 5 min para 8 min e de 8 min para 10 min, ocorreu um aumento de 42,85%. Portanto, no último ponto de coleta foram observados aumentos significativos de um intervalo de tempo para outro, bem como uma redução significativa.

Tabela 2. Relação entre tempo de emissão em massa de partícula coletada em diferentes pontos para velocidade do vento de 4,6 m/s.

Δt = 3 min		
Posição	Massa (g)	Concentração (g/cm^2)
2,5 h_p	0,030	$6{,}61 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,016	$3{,}57 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,007	$1{,}54 \times 10^{-4}$
Δt = 5 min		
2,5 h_p	0,034	$7{,}60 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,028	$6{,}44 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,011	$2{,}58 \times 10^{-4}$
Δt = 8 min		
2,5 h_p	0,036	$7{,}94 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,023	$5{,}22 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,007	$1{,}54 \times 10^{-4}$
Δt = 10 min		
2,5 h_p	0,039	$8{,}37 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,023	$4{,}99 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,010	$2{,}14 \times 10^{-4}$

ISBN: 978-987-1676-63-7

A Tabela 3 mostra os resultados experimentais das emissões de partículas para velocidade do vento externo de 5,0 m/s incidindo no topo da pilha. Para x = 2,5 h_p ocorreu um aumento da massa de partículas coletadas no intervalos de tempos de 3 min para 5 min de 4,87%, de 5 min para 8 min de 4,65% e de 8 min para 10 min de 22,22%. Assim, nos três primeiros intervalos de tempo considerado não ocorreu um aumento significativo com o aumento do tempo de coleta, porém, de 8 min para 10 min, tem-se um grande aumento da massa de partículas coletadas. Em x = 6,25 h_p, nos intervalos de tempo de 3 min para 5 min ocorreu uma redução de 3,33 %, de 5 min para 8 min, observou-se um aumento de 6,89%. Estes resultados sugerem que não ocorreram variações significativas para estes intervalos de tempo analisados. Porém, de 8 min para 10 min, foi observada uma discrepância nos resultados, pois ocorreu uma redução de 19,35%. Em x = 10 h_p os resultados experimentais também apresentaram reduções e aumentos significativos de um intervalo de tempo para outro. De 3 min para 5 min ocorreu uma redução de 19,05%, de 5 min para 8 min ocorreu um aumento de 29,41% e de 8 min para 10 min ocorreu uma redução de 27,20%.

Tabela 3. Relação entre tempo de emissão em massa de partícula coletada em diferentes pontos para velocidade do vento de 5,0 m/s.

Δt = 3 min		
Posição	Massa (g)	Concentração (g/cm^2)
2,5 h_p	0,041	$8{,}68 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,030	$6{,}72 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,021	$4{,}77 \times 10^{-4}$
Δt = 5 min		
2,5 h_p	0,043	$9{,}79 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,029	$6{,}39 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,017	$3{,}65 \times 10^{-4}$
Δt = 8 min		
2,5 h_p	0,045	$9{,}90 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,031	$6{,}85 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,022	$4{,}71 \times 10^{-4}$
Δt = 10 min		
2,5 h_p	0,055	$1{,}07 \times 10^{-4}$
6,25 h_p	0,025	$5{,}95 \times 10^{-4}$
10 h_p	0,016	$3{,}81 \times 10^{-4}$

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho investigou-se uma relação entre o tempo de emissão de partículas de minério ultrafino de uma pilha de estocagem de material com a massa de partícula coletada em diferentes pontos no interior de um túnel de vento de camada limite atmosférica.

Na visualização experimental do escoamento foi possível observar os movimentos de saltação e rolamento de partículas para baixas velocidades do vento, 4,0 m/s e 4,6 m/s. Com o aumento da velocidade do vento foi possível também identificar uma grande emissão de partículas de minério de ferro ultrafino devido o mecanismo de suspensão.

Para baixas velocidades do vento externo incidente, 4,0 m/s, os resultados sugerem que o tempo de emissão não influencia a quantidade de partículas coletadas nos diferentes pontos de coleta. Para velocidades do vento de 4,6 m/s e 5,0 m/s, somente no primeiro ponto de coleta, x = 2,5 hp os resultados sugerem que o aumento do tempo de emissão não influencia de forma significativa a massa de partículas coletadas. Para os outros dois pontos considerados foram observadas grandes discrepâncias na massa de partículas coletadas.

Os resultados do presente trabalho ainda são preliminares, pois torna-se necessário realizar mais experimentos considerando-se outros intervalos de tempo, por exemplo, de 15 min e 20 min. Além disso, o método de coleta utilizado exigia bastante cuidados para evitar a contaminação das amostras de partículas, porém, em alguns casos estas amostras eram contaminadas, sendo necessária a eliminação desta rodada experimental. Uma grande limitação deste trabalho foi a balança digital utilizada, além de sua precisão ser de 0,001 g é um instrumento com muitos anos de uso nos Laboratórios de Física do Ifes, Campus Vitória. Somente foi permitido seu uso em finais de semana, quando era transportada do Ifes, Campus Vitória para Alto Lage, Cariacica onde atualmente se encontra o túnel de vento do grupo de pesquisa.

5. REFERENCIAS

[1] Fortes, F. F.; Figueiredo, A.C., *A interferência de atividades logísticas na qualidade do produto: um estudo de caso de uma empresa do setor de mineração*. Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Fortaleza – CE. p. 1-12, 2006.

[2] Bard, T.; Harion, J. L. *Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions*. Atmospheric Environmental. Vol 39, p. 5576-5584, 2005.

[3] Governo Federal do Brasil. Disponível em <www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1380735604.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2016.

[4] Malcum, K. C. *Avaliação dos efeitos de telas porosas sobre a aerodinâmica de pilhas de carvão*. 2006. 117f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

[5] Xuan, J. *Turbulence factors for threshold velocity and emission rate of atmospheric mineral dust*. Atmospheric Environmental. V. 38, p. 1777–1783, 2006.

[6] EPA (Environmental Protection Agency). *Technical Assessment Paper. Available Information for Estimating Air Emissions for Stone Mining and Quarrying Operations*. Eastern Research Group. 1998.

[7] Shao, Y. P. *Physics and Modelling of Wind Erosion*, 2nd ed., Editora Springer, 2008

[8] EPA (Environmental Protection Agency). *Review of the National Ambient Air Quality Standards for ParticulateMatter: Policy Assessment of Scientific and Technical Information.* OAQPS Staff Paper. 2005.

[9] Pope, C. A.; Dockery, D.W. *Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect.* Air Waste Manage Association Journal. Vol. 56, p. 709–42, 2006.

[10] Torano, J. A.; Rodriguez, R.; Diego, I.; Rivas, J. M., Pelegry. *A Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation*. Applied Mathematical Modelling. v. 31, p.2487–2502, 2006.

[11] Turpin, C.; Harion, J. L. *Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: Implications on dust emissions.* Atmospheric Encironment. Vol 43, p. 5579-5587, 2009.

[12] Ferreira, A. D., *Modeling of the Stockpiles' Free-Surface Deformation Due to Wind Erosion*, 11th Pan-American Congress of Applied Mechanics, Foz do Iguaçu, PR, Brazil, 2010.

[13] Irwin, H.P.A.H., The Design of Spires for Wind Simulation, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 7, pp. 361—366, 1981.

[14] Blesmann, J. *O Vento na Engenharia Estrutural*, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho desejam agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio aos bolsistas de Iniciação Científica.

Área temática: Energía y Medio Ambiente

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL ÁREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MEJORAMIENTO TERMOENERGÉTICO DE FACHADAS: DESARROLLO EXPERIMENTAL PILOTO PARA VIVIENDAS SOCIALES DE ZONA ÁRIDA

Arturo F. Buigues Nollens [1], **Esteban O. Rojos** [2] **y Leonardo A. Pogrebinsky** [3]

[1, 2 y 3] Instituto de Mecánica Aplicada – Facultad de Ingeniería (FI) - Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) - Av. Libertador Gral. San Martín (O) 1109, San Juan, Argentina.
Correo-e: abuigues@unsj.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo se encuentra dirigido a desarrollar a escala piloto, fachadas con envolventes eficientes, para el mejoramiento termo-energético de viviendas sociales construidas (VSC) en zonas árido-sísmica. La metodología considera estudios sobre la envolvente opaca a nivel teórico, mediante el análisis de alternativas de diseño, que contribuyan a resolver el confort higrotérmico interior, y a nivel práctico al considerar la construcción de multicapas termoaislantes. Se analiza la aplicación tanto en fachadas pesadas, como ligeras no ventiladas, con la concurrencia de materiales tanto convencionales, como no convencionales derivados de la naturaleza, considerados en distintas densidades, espesores, y consumos energéticos de producción. Se utilizaron módulos de prueba al aire libre, construidos con componentes estructurales livianos, móviles y desarmables. Estos permitieron realizar estudios comparativos relacionados con el análisis y experimentación "concreta", tanto de la problemática constructiva "en seco", como de su comportamiento térmico, a través de un sistema de medición "en tiempo real". Para ello se aplicaron procedimientos confiables, integrando parámetros propios como Transmitancia y Resistencia Térmica, a partir de variables mensurables como Temperaturas y Radiación Solar. El estudio de los componentes muestra en qué grado el diseño de las fachadas, cumple con las normativas nacionales, IRAM [1-6] y SSEDUV, [7]. La construcción se experimenta en el laboratorio del IMA-FI-UNSJ, el cual posee características similares a una VS existente, donde se analiza el comportamiento térmico de componentes y el grado de adaptabilidad a las condiciones de confort higrotérmico, para el mejoramiento de las Condiciones de Calidad del Aire Interior de VSC a nivel regional.

Palabras Claves: *Mejoramiento Térmico-Energético, Viviendas Sociales Construidas, Desarrollo Experimental, Fachadas Piloto, Zona Árida.*

1. INTRODUCCIÓN

El código de edificación la Provincia de San Juan, no ha sido pensado para lograr una sustentabilidad natural de la construcción. Esto genera en la actualidad, falta de confort higrotérmico y acústico, por aumento de la temperatura del termómetro de globo, y de la isla de calor en la ciudad, con consecuencias en la contaminación ambiental y en la desforestación, que se traducen en altos costos de funcionamiento de las VSC.

En las envolventes de las VSC de Zonas Áridas, generalmente se ha buscado resolver el confort térmico de interiores, con las tradicionales mamposterías de ladrillón y bloques de hormigón, vistos o simplemente revocadas, en espesores del orden de 0.20 m.
Esto ha determinado, una baja calidad térmica de la envolvente, que con similares proyectos fueron construidas en diferentes localidades de la Provincia de San Juan. En algunas zonas, es tal la rigurosidad climática estacional, que junto a la baja calidad mencionada, lleva a los usuarios a soportar tan críticas situaciones de habitabilidad, que torna a las VSC en prácticamente inhabitables, afectando la calidad de vida, la seguridad, el descanso y la salud de sus usuarios.
Debido a que en una gran cantidad de casos, los muros de las fachadas de estas envolventes, no cumplen con la transmitancia térmica para verano o invierno, admitida por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación o Normas del Instituto Argentino de Racionalización de Materiales IRAM. Y a que en general las entidades gubernamentales encargadas de distribuir la materia la energía y el trabajo sobre esta temática, parecen desconocer que el comportamiento energético de los edificios, consiste en el intercambio de calor que se produce entre los espacios interiores habitables y el ambiente exterior a través de su envolvente térmica.

1.1. Objetivos

El objetivo general de este trabajo, se encuentra dirigido al Mejoramiento Termo-Energético de Viviendas Sociales Construidas en Zonas Árido-Sísmicas, mediante el desarrollo teórico y experimental de fachadas con envolventes ecoeficientes.

1.1.1. *Objetivos Específicos*

- Contribuir a disminuir la escasez de combustibles y de consumo de recursos económicos en viviendas humildes.
- Desarrollar el proyecto, construcción y ensayo experimental de fachadas multicapas termoaislantes, facilitadoras del control de la transferencia de calor, y del aislamiento hidrófugo.
- Estudiar la integración de sistemas constructivos sustentables en seco con sistemas constructivos tradicionales.
- Aprovechar o reutilizar aislantes regionales de origen natural en la construcción de sistemas autoportantes.
- Contemplar e integrar la innovación, competitividad y sustentabilidad.
- Utilizar instrumentos de medición en tiempo real, que permitan sensar “lo más realmente posible” el comportamiento dinámico del sistema en estudio.
- Considerar el cumplimiento de las Normativas IRAM en la serie 11600, y los Estándares Mínimos de Calidad, promovidos por la Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Nación [1-7].

2. PROCEDIMIENTOS, EQUIPOS Y MÉTODOS.

La metodología considera estudios teóricos y prácticos, que tiene en cuenta el análisis de alternativas de diseño que contribuyan a resolver el confort higrotérmico de las VSC en Zona Árida.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.1. Estudios Teóricos

Los estudios teóricos están basados en los siguientes aspectos:

2.1.1. Análisis sobre la disposición del aislamiento térmico empleado: El aislamiento térmico desde un punto de vista energético racional, es un aspecto muy importante a tener en cuenta en las VSC de Zonas Áridas debido a que:

En la República Argentina el consumo de energía primaria en el sector residencial y terciario es aproximadamente el 30% del total. Esto es solamente para mantener la operatividad de los edificios. Si consideramos además, el consumo energético para la fabricación del los materiales de la construcción necesarios para construir el edificio, el porcentaje sube hasta cerca del 50%. Teniendo esto en cuenta, la contaminación ambiental del sector de vivienda resulta ser equivalente al consumo [8]. Así el sector residencial es el encargado del 53% del consumo energético nacional, del cual se utiliza el 58% para calefaccionar las VSC.

Las crisis energéticas sufridas, han provocado un incremento tarifario percibido en los últimos años. En la actualidad a nivel regional y del país, además de una quita de los subsidios a los servicios, existe un incremento de hasta un 400 por ciento en la boleta de gas, y 500 por ciento en la boleta de energía eléctrica, la cual cuenta con posibilidades concretas de duplicarse. Como una consecuencia de esto, los niveles de confort bajaron en los sectores con menor poder adquisitivo, debido a la incapacidad de asumir económicamente esta situación, [9-11]. Y por otro lado existe una crisis en materia de generación y distribución eléctrica, que en el último año redundo en cortes de hasta 33 horas promedio al año por usuario [12].

Debido a que en general las VSC, no presentan aislamiento en la envolvente vertical externa o de fachada, el calor tiende a "escaparse" a las zonas más frías para igualar la temperatura, provocando desplazamientos del aire caliente del interior al exterior en invierno y a la inversa en verano. Esta deficiencia desde el punto de vista energético, en la que en la masa interna no se acumula o conserva la temperatura, ni se detiene su aumento, necesita de un importante consumo energético destinado a la refrigeración o calefacción según la época del año [13]. Cabe mencionar que en cumplimiento a la normativa IRAM, se debió tener en cuenta la zona climática donde se ubica la VSC, ya que esto determina su comportamiento energético, debido a que se produce una interacción a través de la envolvente térmica con el exterior, intercambiando calor con el entorno. Así una VSC en la ciudad de San Juan, no se comporta desde el punto de vista térmico, de la misma manera que si esa misma vivienda se encuentra localizada en Calingasta, por lo que sus envolventes térmicas también serán diferentes [2].

2.1.2. Análisis sobre costos energéticos de producción del aislamiento térmico:

Otro aspecto de diseño que ha sido considerado en este trabajo, es el relacionado con el impacto ambiental del aislante térmico. En este sentido el trabajo de investigación se encuentra dirigido a la aplicación de materiales aislantes alternativos de la zona árida con origen mineral volcánico tal como es la Pomeca Puzolanica (PP) y la Perlita o Alearita.

La PP es extraída en forma natural y a cielo abierto de la cantera de Piedra Pómez, sin necesidad de utilizar en su proceso energías no renovables como el gas [14]. Posteriormente es trasladada 270 km en camión semirremolque hasta la Ciudad de San Juan desde San Carlos Mendoza, su disponibilidad esta relacionada con una producción renovable de 20.000 tn /año.

Perlita es también una denominación utilizada para designar una roca silícea volcánica que surge en forma natural. Con la diferencia que el término perlita incluye todo tipo de vidrio de origen volcánico que se expande cuando es llevado a altas temperaturas en hornos industriales. Esta expansión es debida a la presencia en un 2 al 6 % de agua en combinación dentro de sus poros, y finalmente al ablandarse el vidrio se escapa creando miles de canales y produciendo el efecto de exfoliación.

Los costos energéticos de producción de la PP varían de casi nulos a muy bajos, mientras que el de la Perlita presenta una variación que parte de 5 a los 20 MJ/Kg. Este sigue siendo bajo en relación a un aislante derivado de los combustibles fósiles muy utilizado en San Juan, tal como el Poliestireno Expandido o EPS cuyos costos energéticos de producción ascienden de 75 a 150

MJ/Kg [15]. Con este sentido cabe mencionar, que el efecto climático neto de los aislantes térmicos de los edificios, es la suma de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la energía utilizada en la fabricación (energía incorporada o embebida), además de la fuga a la atmósfera durante el uso de cualquier agente de expansión que tiene un efecto invernadero, menos las emisiones que se evitan debido a la energía ahorrada como resultado del aislamiento, (es cero si la energía renovable es la que se utiliza para la calefacción o refrigeración) [16].

2.1.3. Análisis del comportamiento térmico de la Fachada a través de la normativa IRAM 11600: En este trabajo también se ha considerado como premisa de diseño, el análisis del comportamiento térmico de las Fachadas a través de la normativa IRAM 11601, donde se describe el coeficiente de transmitancia térmica (K), que permite evaluar en régimen estacionario esta parte fundamental de la envolvente arquitectónica de una VSC. Para ello se aplica un Software de Diseño Higrotérmico, seleccionado por su adecuado y probado funcionamiento. Este software ha sido programado integrando las normas IRAM 11601, 11603, 11605, 11625 y 11630 [17]. A través del cual se realizan estudios sobre comportamientos térmicos para la rehabilitación de viviendas, considerando diferentes coeficientes de radiación solar tanto para verano como para invierno, en la búsqueda de obtener adecuados niveles de confort.

Así, las medidas a tomar a partir de introducir cambios tecnológicos en la VSC, se han considerado desde la fase proyectual, de manera que los sobrecostos resulten poco significativos o bajos en relación a los ahorros energéticos a obtener y al costo de la obra en su ciclo de vida [18]. Estos cambios tienen en cuenta, las condiciones del lugar, para así poder resolver problemas que impidan un aprovechamiento óptimo de las condiciones del medio. Están dirigidas a facilitar la incorporación de soluciones constructivas con combinaciones óptimas de aislamientos e inercia térmica. Con esta premisa en este trabajo y luego de analizar, tanto la fachada de mampostería de bloques de hormigón como al revoque, vistos por el exterior y también a ambos pintados de colores claros (blancos o beige), tal como comúnmente son terminadas las VSC, se ha propuesto un diseño modular, que incluye la combinación de aislamientos “en seco” sobre los húmedos, en distintas densidades o espesores, de manera que sea fácil de ser adaptable al lugar y adoptable en el tiempo bajo un concepto “evolutivo”, según las posibilidades de los usuarios con bajos recursos.

La Norma 11605 (IRAM, 1996), especifica tres niveles de transmitancia térmica K, que corresponden a un grado decreciente de la calidad térmica, en este caso de los paramentos verticales de la fachadas. Siendo Nivel A: recomendado, Nivel B: medio y Nivel C: mínimo. Con el sentido de mejorar la realidad térmica constructiva de las VS de San Juan, que en la actualidad demuestra ser precaria e inferior al Nivel C y considerando el aspecto térmico, práctico constructivo en relación a los espesores que se arriban con los aislantes de origen mineral y el económico, se adoptó el Nivel B.

La temperatura de diseño de invierno fue obtenida a través del valor de la temperatura mínima del lugar para el mes más crítico utilizado. Está en función de los valores mismos de la temperatura del lugar. En este sentido cabe mencionar, que para la ciudad de San Juan corresponde según la Norma IRAM 11603, una temperatura de diseño de -1,5 ºC para invierno y de 37,5 ºC para verano. La capital de la Provincia de San Juan pertenece a la Zona Bioambiental III – A, correspondiendo para el Nivel B 0,97 w/m^2°C en Muros y 0,48 w/m^2°C en Techos. Ahora bien, el valor adoptado es obtenido a través de un método más consistente y probado, desarrollado por el Instituto de Estudios para el Medio Ambiente (IEMA) de la Universidad de Mendoza, localizado también como San Juan, en la región árida del centro oeste del País. Este valor es -3 ºC, y difiere del propuesto por la Norma IRAM en -1,5 ºC [19].

Debido a que la Pomeca adoptada es finalmente zarandeada, lo cual lleva a disminuir su densidad, reduciendo la presencia de tierra volcánica, y capacidad puzolánica, (compuesta por feldespato y calcita), para así aumentar la presencia solo de pomeca con alta presencia de la piedra pómez, que se caracteriza por su capacidad como aislante térmico con gran cantidad de microcélulas cerradas y vacías. Y debido a que el material así seleccionado presenta mayor granulometría, con alto porcentaje de biotita y mica [19]. Solo a los fines de la simulación del

comportamiento térmico con el Software de Diseño Higrotèrmico mencionado, se ha adoptado la conductividad térmica de la Piedra Pomez suelta y granulada [1], por no participar los valores la Pomeca Suelta de los estudios de la Norma IRAM 11601 (de diciembre de 1988, con valores revisados según norma de 1996).

2.2. Estudios Prácticos

Por otro lado se ha considerado en la metodología de este trabajo de investigación, los siguientes estudios prácticos:

2.2.1. Estudio a nivel piloto de distintas alternativas de fachadas experimentales Multicapas Termoaislantes**: S**e analizó la aplicación de aislantes térmicos convencionales y no convencionales, considerando los consumos energéticos de producción e integrando productos aislantes derivados de la naturaleza.

Los materiales aislantes seleccionados son de materia prima muy poco elaborada, y se los ha adoptado por encontrarse lo más cerca posible de la obra. Además de encontrarse exentos de elementos nocivos, estos facilitan los intercambios de humedad entre la vivienda y la atmósfera.

Con este sentido en esta etapa, se dio comienzo a estudios sobre el comportamiento térmico de materiales regionales con origen volcánico natural, tal como la pomeca puzolánica, perlita, entre otros [20], junto a sus posibles combinaciones con el poliestireno expandido. En estas alternativas se busco resolver además de la aislación térmica, la aplicación de superficies de protección y seguridad sísmico resistente. Por ello se adoptaron los metales en las construcciones en seco. Estas superficies se estudiaron dispuestas, sobre los “tradicionales materiales” de las Fachadas de VSC, en distintos complejos húmedos tal como la arena o el cemento. También se tuvo en cuenta en los materiales elegidos que pudieran ser reciclados y reciclables.

2.2.2. Estudios comparativos a través del sistema de medición en tiempo real mencionado mediante módulos de prueba al aire libre: Estos módulos se construyeron con una estructura liviana, conteniendo aislación térmica, son móviles y desarmables según corresponda. Permiten la fácil inclusión de diferentes densidades o aislantes térmicos. Se vinculan fácilmente a una vivienda real, tal como es el laboratorio del IMA existente en la FI, y que presenta características similares a una VSC.

Se analizó, el desempeño energético de componentes constructivos fijos, para posibilitar posteriormente la transferencia de conocimientos dirigidos a la construcción de la envolvente opaca de las VS. De manera que, como envolventes verticales, resultan facilitadoras del control de la transferencia de calor, y del aislamiento hidrófugo, por esto funcionan no ventiladas en el periodo frio y ventiladas en el cálido, contribuyendo así a disminuir sobrecostos y a proteger el ambiente.

2.2.3. Utilización de instrumentos de medición en tiempo real*:*

Para sensar el comportamiento dinámico del sistema en estudio, se adaptó y acondicionó la fachada principal este del Box de Ensayos para VS, que cuenta el AEA del IMA.

Estos estudios térmicos, han considerado como metodología la obtención de información de las características dinámicas de los materiales componentes de fachadas termoaislantes, a través de la búsqueda de mediciones in-situ de distintos parámetros térmicos.

La tarea se realizó mediante la utilización de un sistema de medición integrado en tiempo real, que se caracteriza como instrumento de medición por su simultaneidad, escalabilidad, flexibilidad a distintos parámetros. Este sistema facilita el registro temporal en ambiente MATLAB, de las observaciones pasadas o actuales de todos los sensores y sus respectivos parámetros, tal como la temperatura del aire interior y exterior, radiación solar, y velocidad del aire [21].

El mencionado sistema permite obtener, respuestas dinámicas con rapidez o velocidad, lo cual facilita detectar fallas en el comportamiento del sensado y de funcionamiento.

El relevamiento de las variaciones en la dinámica del mismo, se realiza con un retardo acotado y apropiado, debido a que el muestreo de dicho sistema se realiza más rápido que la evolución del

ISBN: 978-987-1676-63-7

mismo. Para el análisis de las mediciones destinadas a estudiar en forma experimental comportamientos térmicos, se utilizaron procedimientos confiables.

3. RESULTADOS

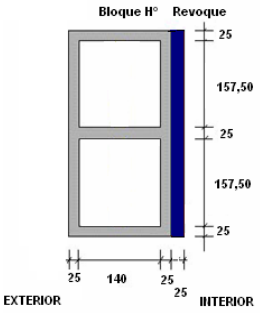
A los efectos de concretar los objetivos propuestos, se muestran los resultados de aplicar la Norma IRAM 11600 y el Software de Diseño Higrotérrmico.

3.1. Situación Original de la Fachada

El muro de bloques de hormigón vistos, que determina una fachada modular vista y estructura de hormigón visto, No Verifica su utilización ni para verano ni invierno debido a que la Transmitancia Térmica Total (K del muro) alcanza los 2,44 W/ m² °C, valor muy superior al Kmax adm.
Se observa que es el revoque aislante con complejo perlítico el que alcanza una Resistencia Térmica (RT) del 45 %, mientras la cámara de aire confinada e interna del bloque alcanza el 31 % de la RT, seguida por el 18 % de la resistencia superficial interna del muro, Figura 1.

Situación Original de la Fachada

Muro Exterior Existente



Resultados sobre el K máx. admisible y el K del muro

Elemento	MURO	Nivel Confort B	w/(m²°C)	VERIFICA
K max admisible	w/(m²°C)	K		
Verano	1,25	Verano	2,44	NO
Invierno	0,87	Invierno	2,44	NO
P. Térmico	3,66	P. Térmico	2,44	SI

Resultados sobre la Resistencia Térmica según capas y materiales

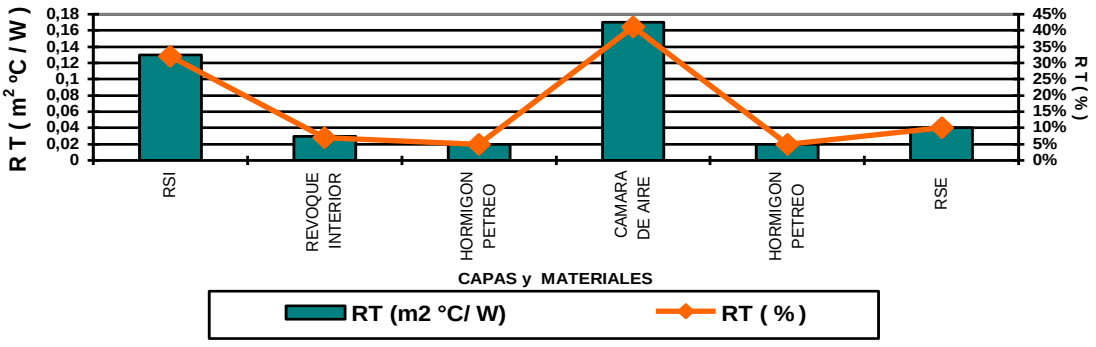


Figura 1: Resultados del Comportamiento Térmico de la Situación Original de la Fachada

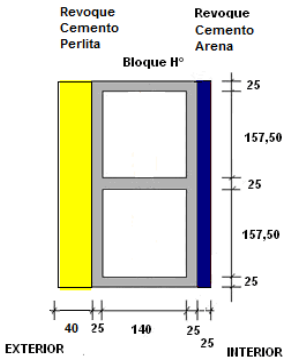
ISBN: 978-987-1676-63-7

3.2. Primera Situación de Mejoramiento

En esta situación, el muro de bloques de hormigón fue revestido por el exterior con 4 cm del complejo cemento perlita. Vemos que No Verifica su utilización ni para verano ni invierno cuando este permanece sin pintar debido a que la Transmitancia Térmica Total (K del muro) alcanza 1,35 W/ m² °C, valor superior al Kmax adm, pero cuando es pintado con una pintura en base de agua y de color blanco reflectivo, el K del muro Si Verifica para verano pero no para invierno.
Se observa que la RT de 0,17 m² °C/W asume el 41 % de la resistencia térmica del muro, seguida por el 30% de la resistencia superficial interna del muro, Figura 1.

1ª Situación de Mejoramiento

Muro Exterior Propuesto



Resultados sobre el K máx. admisible y el K del muro

Elemento	MURO	Nivel Confort B	w/(m²°C)	Verifica
K max adm	w/(m²°C)	K		
Verano	Revoque sin pintar 1,25	Verano	1,35	NO
	Con pintura blanca 1,50		1,35	SI
Invierno	0,87	Invierno	1,35	NO
Puente Térmico	1,82	Puente Térmico	1,35	SI

Resultados sobre la Resistencia Térmica según capas y materiales

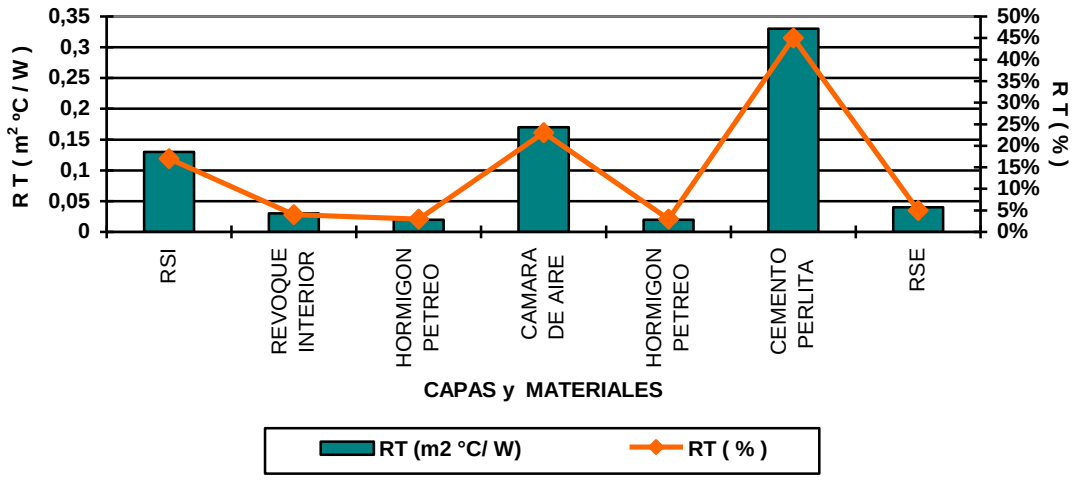


Figura 2: Resultados del Comportamiento Térmico de la 1ª Situación de Mejoramiento

3.3. Segunda Situación de Mejoramiento

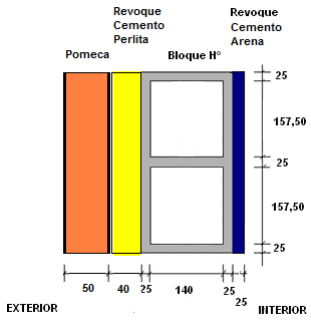
El mejoramiento del muro de bloques de hormigón, continuó con la adición de otro material de origen volcánico. Esta capa fue dispuesta por el exterior en un espesor de 5 cm, y colocada por

ISBN: 978-987-1676-63-7

encima del revestimiento del complejo cemento perlita asumiendo un valor total de 9 cm. Vemos que aún con este incremento No Verifica su utilización para invierno aún cuando esta pintada con esmalte sintético satinado blanco brillante, debido a que la Transmitancia Térmica Total (K del muro) alcanza 1,21 W/ m² °C, valor superior al Kmax adm y si verifica para verano. Se observa que la RT del complejo perlítico asume el 33 % de la resistencia térmica del muro, seguida por el 24 % de la resistencia de la pomeca suelta y seguida por el 17 % de la cámara de aire interna del muro de bloques, Figura 3.

2ª Situación de Mejoramiento

Muro Exterior Propuesto



Resultados sobre el K máx. admisible y el K del muro

Elemento	MURO	Nivel Confort B	w/(m²ºC)	VERIFICA
K max admisible	w/(m²ºC)	K		
Verano	1,50	Verano	1,21	SI
Invierno	0,87	Invierno	1,21	NO
P. Térmico	1,63	P. Térmico	1,21	SI

Resultados sobre la Resistencia Térmica según capas y materiales

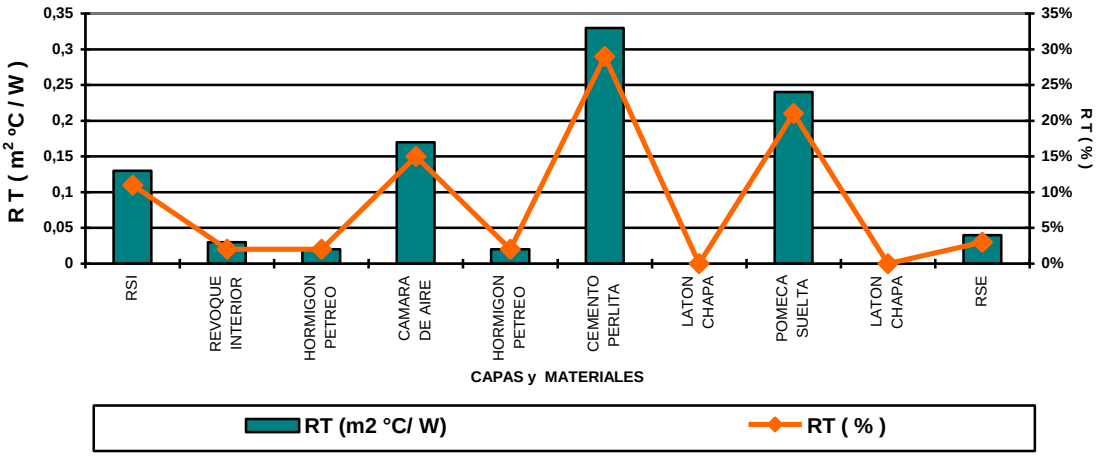


Figura 3: Resultados del Comportamiento Térmico de la 2ª Situación de Mejoramiento

3.4. Tercera Situación de Mejoramiento

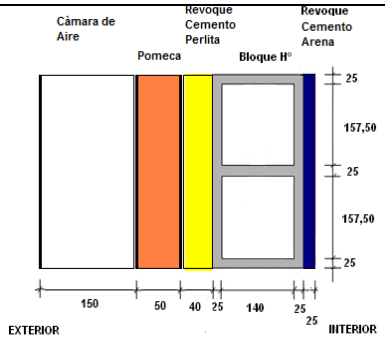
El mejoramiento de la Fachada de bloques de hormigón, continuó con la adición de otra capa exterior conformada por una cámara de aire estanca de 15 cm, dispuesta sobre el material de origen volcánico en un espesor de 5 cm, y por encima del revestimiento del complejo cemento perlita, asumiendo un valor total como espesor aislante, de 24 cm. En esta alternativa si bien aún con este incremento No Verifica su utilización para invierno, debido a que la Transmitancia

ISBN: 978-987-1676-63-7

Térmica Total (K del muro) alcanza 1,00 W/ m² °C, valor superior al Kmax adm de 0,87 y si para verano, vemos que con la utilización de la pomeca zarandeada y seleccionada es posible alcanzar el valor de 0,87 y obviamente también con una menor selección o zarandeado, es posible cumplir con el valor de 0,97 que la Norma exige como Kmax. Se observa que la RT del complejo perlítico, asume el 33 % de la resistencia térmica del muro seguida por el 24 % de la resistencia de la pomeca suelta seguida por el 17 % de la cámara de aire nueva y seguida por un 16% de la cámara de aire interna del muro de bloques, Figura 4.

3ª Situación de Mejoramiento

Muro Exterior Propuesto



Resultados sobre el K máx. admisible y el K del muro

Elemento	MURO	Nivel Confort B		w/(m²°C)	Verifica
K max adm	w/(m²°C)	K			
Verano	1,50	Verano	Sin Seleccionar	1,00	SI
			Zarandeada	0,87	SI
Invierno	0,87	Invierno	Sin Seleccionar	1,00	NO
			Zarandeada	0,87	SI
Puente Térmico	1,35	Puente Térmico	Sin Seleccionar	1,00	SI
	1,17		Zarandeada	0,87	SI

Resultados sobre la Resistencia Térmica según Capas y Materiales

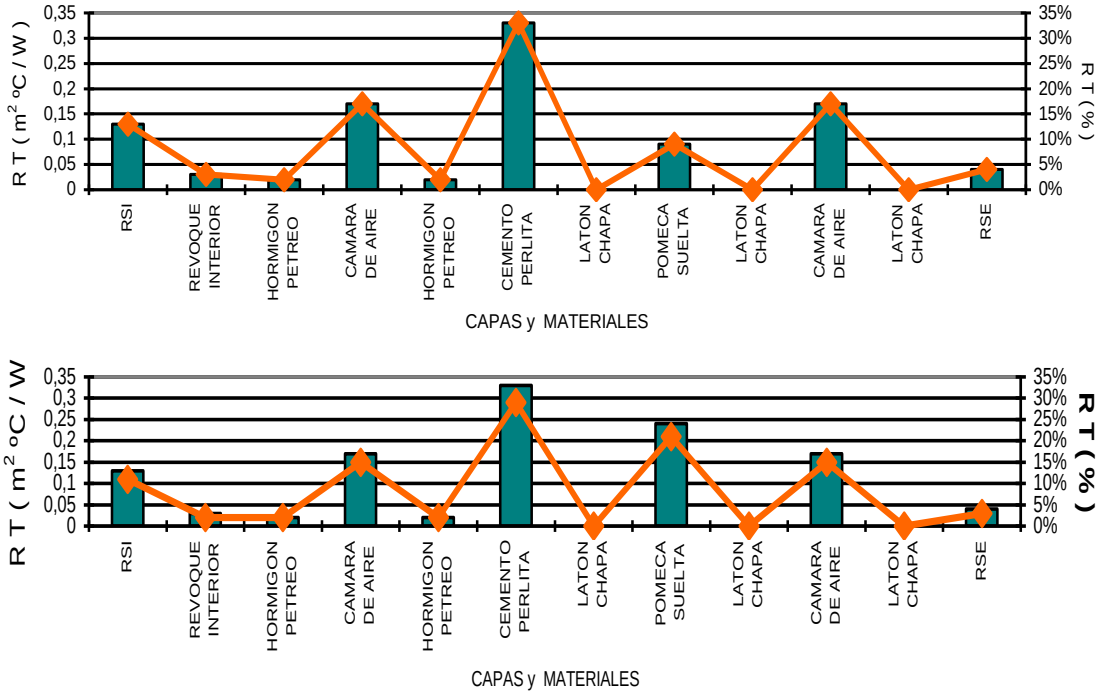


Figura 4: Resultados del Comportamiento Térmico de la 3ª Situación de Mejoramiento

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.5. Discusión

Las posibilidades de mejoramiento por el exterior de la Fachada de bloques de hormigón visto pueden ser visualizadas en la Figura 5. En esta se observa cómo se comporta térmicamente el muro aislado (en forma conjunta con el revoque aplicado de cemento y perlita junto con la pomeca suelta sin clasificar (línea azul) y zarandeada (línea naranja), dando cumplimiento a la Normativa 11600 con una amplitud o variación térmica de 21ºC. Esta situación demuestra que las pérdidas de calor son proporcionales a la pendiente del gradiente de temperaturas, por lo que al elevarse la temperatura del interior del muro, el escape de energía de la vivienda con la fachada con bloque visto y sin mejorar (línea roja) se reduce notablemente, Figura 5. En estas circunstancias una parte considerable de la energía procede del calor acumulado en el aire y en la envolvente interna de la fachada. A la vez se observa, que este cambio de pendiente es posible con la incorporación por el exterior, de 240mm entre aislación térmica y cámara de aire, frente a los 30mm de revoque común, a los que se acostumbra adicionar a modo de terminación las fachadas.

Como alternativa se ha estudiado mediante el Software de Diseño Higrotérmico mencionado [17], el uso no combinado de aislantes naturales de origen mineral, resultando posible utilizar solamente 120mm de pomeca suelta zarandeada o solo 70mm, mas lo 150mm de cámara de aire. Lo cual lleva a incorporar un espesor por el exterior de 250mm o 220mm respectivamente. La selección de estas alternativas dependerá de las disponibilidad de espacio y del diseño de la fachada sustentable deseada considerando los aspectos relacionados con la práctica constructiva, económicos además de la termo energética.

Cabe señalar que la cámara de aire fue incorporada, para ventilar la fachada en verano y así facilitar las pérdidas de calor por convección radiación y conducción, limitando su transferencia hacia el interior de la VSC. En este sentido es necesario explicitar, que el muro así programado, con materiales extraídos y procesados a nivel regional, junto a la tecnología alternativa aplicada por el exterior, permite resolver además del confort y el ahorro energético, la propagación de ruidos al interior del ambiente y la humedad al muro, debido a sus condiciones como aislante acústico e hidrófugo.

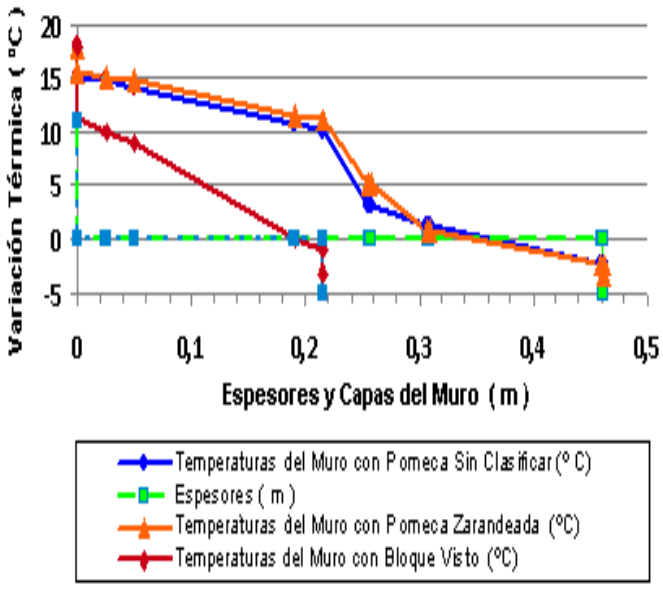


Figura 5: Variación térmica de la Fachada incluyendo la Tercera Situación con la Pomeca suelta sin seleccionar y la zarandeada respecto a la Primera Situación de Mejora



Figura 6: Muro experimental con sensores LM35(izquierda) y LM73 (derecha), en la Primera y Tercera Situación de Mejora

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la campaña de mediciones representativa de la época invernal de la ciudad de San Juan, realizada entre el 17 al 20/06/2016 inclusive, sobre la fachada del laboratorio del IMA-FI-UNSJ, se verificó en el área cubierta por el Módulo aislado y con Cámara de Aire una variación o amplitud térmica de casi 18 ºC, entre el exterior y el interior, Figura 6. Esto pudo observarse en el segundo día de medición a las 07:51 h cuando para con una mínima de Aire Exterior de 4.75 ºC, Humedad Relativa del 88% y viento en calma, se registraba 4.12 ºC en la Capa Externa, 7.18 ºC en la Capa Interna de la Cámara de Aire y sobre la pomeca, 16.62 ºC en el Revoque Externo del muro con perlita y una Temperatura de Revoque Interno de 22.15 ºC. Mientras que en el sector del muro sin el Módulo aislante se obtuvo una variación térmica menor a 9 ºC, como diferencia entre los 7.12 ºC del Revoque Externo sin módulo y los 16.09 ºC del Revoque Interno, Figura 7.

El procedimiento de medición incluyó sensores LM35 que se conectaron a un Datalogger Fluke Hydra 2625ª y sensores LM73 los cuales se conectaron a la Interfaz a Sensores del sistema IEDRA, de desarrollo propio del Área de Energías Alternativas del IMA-FI-UNSJ. Ambos sistemas de medición se conectaron a una PC genérica. El Datalogger Fluke Hydra 2625A se conectó mediante una conexión serie RS232 cableada; mientras el sistema IEDRA por medio de un par de transceptores inalámbricos, envía las mediciones a la PC a través de un puerto USB (visible como puerto serie RS232, por un driver interno de la PC que realiza la conversión USB-RS232).

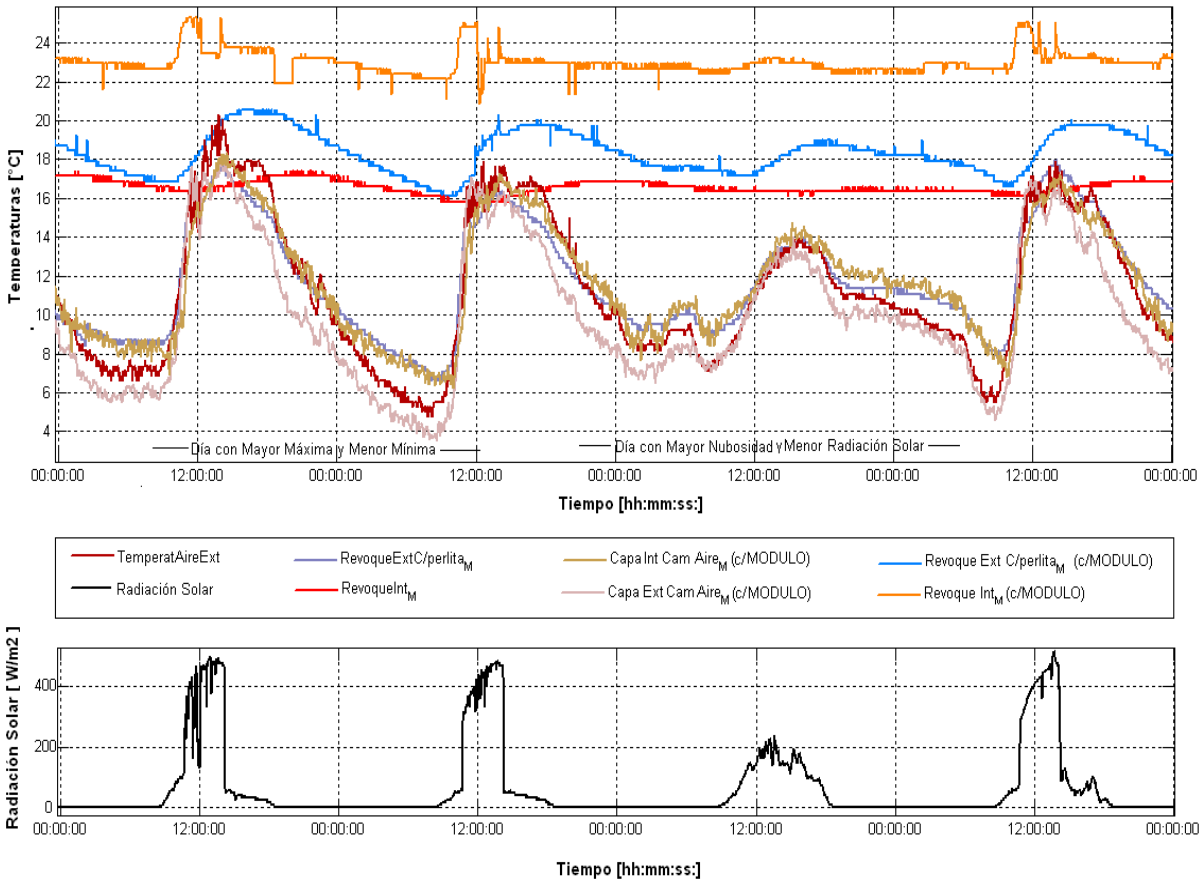


Figura 7: Comportamiento térmico del Muro Tradicional incluyendo el Revoque con Complejo Perlítico junto al Módulo experimental con Pomeca zarandeada y cámara de aire

Y un software desarrollado en MATLAB, en el Área de Energías Alternativas del IMA-FI-UNSJ, marca el ritmo de muestreo, ordena y recibe las mediciones (mediante los puertos serie RS232 mencionados), las procesa, muestra y almacena. El intervalo de muestreo definido para este trabajo es de 2 minutos.

Cada LM35 y cada LM73 fue fijado a la correspondiente superficie, utilizando grasa siliconada (escogida por su conductividad térmica, para asegurar que el encapsulado del sensor y la superficie permanezcan en equilibrio térmico, con un tiempo de respuesta limitado a unos pocos segundos) como material de relleno entre el muro y el sensor. Las mediciones de cada LM73 poseen un error máximo de ±1°C, en el rango de -10°C a 80°C, alimentado con 3,3V, según el fabricante.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo contribuye a aplicar principios de sustentabilidad, al encaminarse hacia la conservación de la energía, maximización, reutilización de los recursos naturales, y a una aproximación a la gestión del ciclo de vida, con énfasis en la etapa de uso y mantenimiento considerando reducciones de la energía a consumir en la calefacción y refrescamiento de las VSC**.** Los alentadores resultados térmicos obtenidos mediante al mejoramiento de las Fachadas en este trabajo piloto, demuestran que es posible lograr rehabilitar las VSC.
Así, a través de respuestas sustentables y concretas, fue posible dar cumplimiento a los Estándares Mínimos de Calidad, promovidos por la Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Nación y a la situación energético-económica que padecen las zonas áridas del país. Para ello fue esencial desarrollar estas etapas teórico-experimentales, considerando mejoras en tiempo real, junto a la aplicación de criterios de sostenibilidad. Esto implica realizar cambios importantes en la cultura propia del arte de la construcción local mediante la aplicación combinada de tecnologías constructivas tanto tradicionales como alternativas, con inclusión del Uso racional de Energía (URE), dado que en la actualidad y en relación a las tecnologías constructivas conocidas en los muros se observa que las VSC dejan las fachadas vistas o solo se aplican revoques comunes y solo se aplican materiales aislantes a modo de cubiertas de techos.
Por ello mediante los estudios comparativos realizados, se ha analizado y experimentado racionalmente y “en forma concreta”, tanto sobre la problemática constructiva tradicional junto a sistemas “en seco”, así como también de su comportamiento térmico a través de un sistema de medición “en tiempo real”. Los resultados obtenidos, son útiles para retroalimentar nuevas simulaciones en proceso de mejora, al permitir ajustar los parámetros que permiten mejorar el grado de su precisión y optimización, al poder atribuirle a los números, un grado mayor de validez, para así finalmente validar una simulación dinámica que permita visualizar correctamente, como estos números afectarían el comportamiento del sistema de acondicionamiento del aire de las VSC. Y también son útiles los resultados, debido a que responden a un sistema con diseño modular de mejoramiento abierto, incluyendo la combinación de aislamientos “en seco” sobre los húmedos, en distintas densidades o espesores, de manera que según las posibilidades de los usuarios con bajos recursos sea fácil su adaptación al lugar y adoptable en el tiempo bajo un concepto “evolutivo”.
Finalmente cabe destacar que estos cambios de mejoramiento térmico constructivo son muy importantes, debido a que tienen impacto directo en toda la región árido-sísmica del Nuevo Cuyo, en la que es necesario intervenir millones de metros cuadrados correspondiente a más de 400.000 viviendas y departamentos existentes deficitarios, o que no cumplen con las Normas Vigentes de Habitabilidad de millones de usuarios con bajos recursos de zonas áridas.

6. REFERENCIAS

ISBN: 978-987-1676-63-7

[1] IRAM 11601. *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de Cálculo*. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. Argentina, p.14- 20, 2002.
[2] IRAM 11603. *Acondicionamiento Térmico de Edificios.* Clasificación bioambiental de la Argentina, p.1- 47, 1996.
[3] IRAM 11605. *Acondicionamiento Térmico de Edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios.* Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos, 1-27,1996.
[4] IRAM 11930. *Construcción sostenible.* Principios Generales- Primera edición. Sostenibilidad en los edificios y otras obras de construcción 5-1 General, 2010.
[5] Norma ISO IRAM 21929 -1. *Construcción Sostenible: Indicadores de sostenibilidad.* Parte 1. Marco para el desarrollo de indicadores para edificios" pp15 y 22, 2014.
[6] ESQUEMA DE NORMA IRAM 21931-1. *Construcción sostenible: Marco de referencia para los métodos de evaluación del desempeño ambiental de las obras de construcción.* Parte 1. 2011.
[7] SSDUV. *Estándares Mínimos de Calidad para Viviendas de Interés Social* .Revisión 2006. Documento Técnico: Acondicionamiento Higrotérmico. Argentina, p.12- 27, 2006.
[8] Esteves A., Gelardi D. *Docencia en Arquitectura Sustentable: Programa de Optimización de Proyectos de Arquitectura basado en el Balance Térmico*. IEMA–DICYT-UM.– Mza, p. 10.31. 2003
[9] Volantino, V., Bilbao, P., Azqueta, P. E., Bittner, P., Englebert, A. Y Schopflocher, M. *Ahorro energético en el consumo de gas residencial mediante aislamiento térmico en la construcción*. INTI Construcciones. AVERMA, Vol.11, p.08.123 – 08.130, 2007.
[10] Mercado M. V., Esteves A., Filippín C. *Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina*. Ambiente Construído. V. 10, n. 2, p. 87-100. 2010.
[11] Editorial RN. *Aumentos en la electricidad*. El Pregón Energético, Super Usuario, 2016. www.editorialrn.com.ar/index.php?option=com_content.
[12] Cabot D. *Aumentos de Tarifas*. Diario La Nación, 2016. www.lanacion.com.ar.
[13] Zubiri Arqueta, E. *Arquitectura Bioclimática*. *Soluciones Enérgicamente Eficientes en la Edificación*. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. p. 25-48, 2010.
[14] IDR. *Caracterización Minera de la Provincia de Mendoza* - Instituto de Desarrollo Rural - Ministerio de Economía Gobierno de Mendoza, Argentina, p.123- 129, 1998.
[15] IVE. *Productos y Materiales. Propiedades de Aislantes Térmicos para Rehabilitación Energética*. Cuadernos de Rehabilitación. Instituto Valenciano de la Edificación. España.p3, 2011.
[16] Vecinolisto. *Rehabilitación y ahorro energético para comunidades de vecinos*. *Buscador de Empresas para Comunidades de Vecinos*. 4. Vecino listo.es.
[17] Salas G. IRAM K. *Software de Diseño Higrotérmico basado en Normas IRAM 11601, 11605, 11625 y 11630*. Revisado en la Universidad Nacional de Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
[18] Mitchell J., Acosta P. *Evaluación Comparativa de Tipologías de Viviendas Sociales en La Provincia de Mendoza.* AVERMA, Vol. 13 p.5.161-168*,* 2009.
[19] Esteves A., Gelardi D. *Cálculo de la Temperatura de Diseño de Invierno*. IEMA. Universidad de Mendoza. AVERMA Vol. 6, Nº 2. p. 08.85 – 08.89, 2002.
[20] Buigues Nollens A. *Aprovechamiento de la Pomeca Puzolánica en Envolventes . Desarrollo Experimental de un Panel Termoaislante para Viviendas de Zonas Áridas en Argentina*. Revista Hábitat Sustentable, Vol. 3 Nº1, p.62-71, 2013.
[21] Buigues Nollens A., Pogrebisnky L. *Desarrollo de un sistema electrónico piloto de mediciones climáticas bajo la visión del ecodiseño para la arquitectura sustentable*. Memorias ECODAL 2014, Chile, p.267-281,2014.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

TRATAMIENTO PIROLÍTICO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS ESTUDIO DE CASO Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD

Holote, César Christian [1], Cova, Walter J. D. [2]

Grupo Proyectos y Servicios – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Rioja
San Nicolás de Bari (O) 1100. CP(5300) La Rioja – Argentina.
[1] *christianholote@hotmail.com*
[2] *wcova.utn@gmail.com*

RESUMEN

En núcleos urbanos la recolección, concentración y disposición final de las fracciones sólida y líquida de los residuos urbanos domiciliarios plantea problemas tanto sociales como de sanidad y conservación ambiental, que deben ser atendidos con recursos económicos normalmente escasos.

En este trabajo se plantea el tratamiento pirolítico de los residuos sólidos urbanos, partiendo de su caracterización y analizando las condiciones sociales, económicas y ambientales para su implementación en la ciudad de La Rioja, con el objetivo de establecer los requerimientos para una gestión integral económicamente equilibrada, protegiendo el ecosistema y mejorando simultáneamente la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

La metodología adoptada ha sido la de realizar un análisis de caso y a partir de éste, determinar las condiciones económico-financieras resultantes que aseguren su viabilidad en un enfoque abarcativo de la sustentabilidad social y del entorno ambiental.

Palabras Clave: gestión de residuos sólidos urbanos, socioecosustentabilidad, viabilidad económica.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la legislación vigente en nuestro País (Ley 25916/04), la gestión de los residuos sólidos generados en los conglomerados urbanos (RSU), es responsabilidad de las respectivas administraciones municipales. La gestión de residuos urbanos posee inmediatas consecuencias y connotaciones sociales, ambientales y económicas. En el presente trabajo se propone la aplicación del tratamiento pirolítico para la disposición final de la basura, y se analizan los resultados alcanzables mediante esta técnica.

Organización: el presente trabajo se inicia con la caracterización cuanti y cualitativa de los RSU (Sección 2), analizándose comparativamente en la Sección 3 los diversos métodos de disposición final, destacándose las ventajas del procedimiento de pirólisis y su implementación (descripta en la Sección 4) para el caso en estudio (Municipalidad del Departamento Capital de La Rioja). Finalmente en la Sección 5 se exponen conclusiones y futuros desarrollos.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.1 Aspectos cuanti y cualitativos globales para América del Sur

La cantidad y calidad de residuos producidos por los conglomerados sociales humanos depende fundamentalmente de la cantidad y densidad de población, la cultura de consumo dominante y el nivel económico medio de sus integrantes. Así, en América del Sur, estudios conducidos por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) [1] han podido comprobar que, sobre una muestra de 16 ciudades de más de 2 millones de habitantes, el promedio de generación de RSU es de 0,97 kg/hab/día; en otros 16 conglomerados de 500.000 a 2 millones de habitantes ese promedio llega a 0,74; y en una muestra de 24 ciudades intermedias y pequeñas de menos de 500.000 habitantes el promedio es de 0,55 kg/hab/día. Por otra parte, a medida que crece la capacidad de consumo de la población, se incrementa la producción de RSU: según la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, los índices de generación eran (2006) en países de bajos ingresos de 0,4 a 0,6 kg/hab/día; en países de ingresos medios 0,5 - 0,9 kg/hab/día y en países de altos ingresos 0,7 - 1,8 kg/hab/día, registrándose un incremento anual de la generación de residuos de 1 a 3% ligado al aumento del ingreso per cápita.

Según datos del Banco Mundial [2], la población de América del Sur a finales de 2014, era de poco más de 400.000.000 de habitantes, y teniendo en cuenta la gran preponderancia de las áreas metropolitanas, si se toma como valor de referencia la generación promedio estimada de 0,92

kg/hab/día, se puede inferir que la población de esta región está produciendo algo más de 368.000 toneladas diarias de RSU (véanse [3–5]).

El contenido de humedad que varía de 35 a 55% y el mayor peso específico, que alcanza valores de 125 a 250 kg/m^3, diferencia los RSU de América del Sur en relación a los países desarrollados. De acuerdo a estimaciones de la OPS [6] el contenido de materia orgánica biodegradable de los RSU en América Latina y el Caribe supera ligeramente el 50%, con un 15 a 25% de contenido correspondiente a papel y cartón.

Por lo que respecta a su origen, la mayor proporción (hasta 70%) de los RSU proviene de la generación domiciliaria, originándose el resto en comercios, instituciones y pequeñas industrias radicadas en las áreas urbanas.

2.2 Los RSU en Argentina

Las cantidades de residuos sólidos generadas y recolectadas son de una importancia crítica para determinar el cumplimiento de los programas de gestión de residuos, para seleccionar equipamiento específico y para el diseño de los recorridos de recolección, instalaciones de clasificación y centros de disposición final. La Tabla 1 presenta la distribución de RSU por provincia, tomando como base las estimaciones 2005 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable perteneciente al Ministerio de Salud y Ambiente [7].

Tabla 1. *Argentina, distribución de RSU por provincia.*
Fuente: ENGIRSU 2005 – INDEC 2001 y proyecciones.

Provincias	**Generación [Tn/Año]**
Santa Cruz, Tierra del Fuego	<100.000
Catamarca, Chubut, Formosa, Jujuy, La Pampa, La Rioja, Misiones, Río Negro	100.000 a 200.000
Corrientes, Chaco, Entre Ríos, Neuquén, Salta, San Juan, San Luis, Santiago del Estero, Tucumán	200.000 a 500.000
Mendoza	500.000 a 1.000.000
Ciudad de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe	1.000.000 a 2.000.000
Pcia. de Buenos Aires	2.000.000 a 5.000.000
Total del país	**13.375.000**

Por lo que hace a su contenido, se calcula que en promedio en Argentina (a nivel 2011) la composición de los residuos está dada de la siguiente manera: la participación de residuos orgánicos cubre el 51% del total generado, y se pudo identificar un 5% de residuos de poda, como

ISBN: 978-987-1676-63-7

asimismo un 4% de residuos áridos. En conjunto, los materiales plásticos, papel, vidrio y metales alcanzan un 28% del total. Se observa finalmente en la composición un 13% de materiales varios. En base a esta composición de los RSU, se puede estimar el volumen de residuos reciclables (Tabla 2), proyectando en base a una población nacional de 40 millones de habitantes (2010) con una generación anual de 13,1 millones de toneladas de RSU.

Tabla 2. Generación de RSU Reciclable en Argentina. Fuente: Grupo Arrayanes, Proyecto Nacional para la Gestión Integral de RS Urbanos BIRF 7362AR, Julio 2011.

Material	RSU (millones de Ton/año)
Papel y Cartón	2.227
Plásticos	1.834
Vidrio	655
Metales	262
TOTAL	**4.978**

2.3 Los RSU en La Rioja, departamento Capital

Se expondrán a continuación las características del caso de estudio, correspondientes al municipio del departamento Capital, provincia de La Rioja, que incluye la ciudad de La Rioja. En números redondos, la ciudad a fines de 2014 contaba con 181.000 habitantes. Según estadísticas de la Secretaría de Servicios Públicos del Municipio de la Capital y de la Dirección de Estadística de la Provincia de La Rioja, se producen en la ciudad en promedio 160 toneladas diarias de RSU (0,88 kg/hab/día), el 82% de los cuales son generados por los 55.540 hogares que la constituyen y el 18% restante por los 6.819 comercios y fábricas del parque industrial.

Tabla 3. Composición RSU promedio (% en peso) Ciudad de La Rioja. Fuente: Elaboración propia.

Componente	%
Residuos Orgánicos	66.10
Metal/Hierros	7.70
Plásticos	13.50
Vidrio	2.40
Papel/Cartón	7.50
Aluminio	0.50
Otros	2.30

Plásticos	%
PET	13.33
P. Rígido	34.08
P. Flexible	52.59

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con respecto de la composición de los RSU, al no contar el municipio con los datos correspondientes, se llevó a cabo un trabajo de campo [8] durante 2014 en coordinación con el personal del predio de disposición final de residuos, para determinar mediante muestreo y pesaje, su composición promedio aproximada (valores de Tabla 3).

3. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS

Si bien los aspectos de separación en origen, recolección, transporte y concentración poseen una considerable importancia en la gestión integral de residuos sólidos, no serán tratados en el presente trabajo, concentrándose el enfoque en la disposición final de los mismos, puesto que constituye la etapa de mayor impacto sanitario, social, ambiental y económico.

3.1 Diversos métodos de disposición: análisis comparativo

De entre el conjunto de métodos de disposición final existentes la Figura 1, brinda una síntesis de los méritos relativos de cuatro alternativas posibles (vertedero, compostaje, incineración y pirólisis).

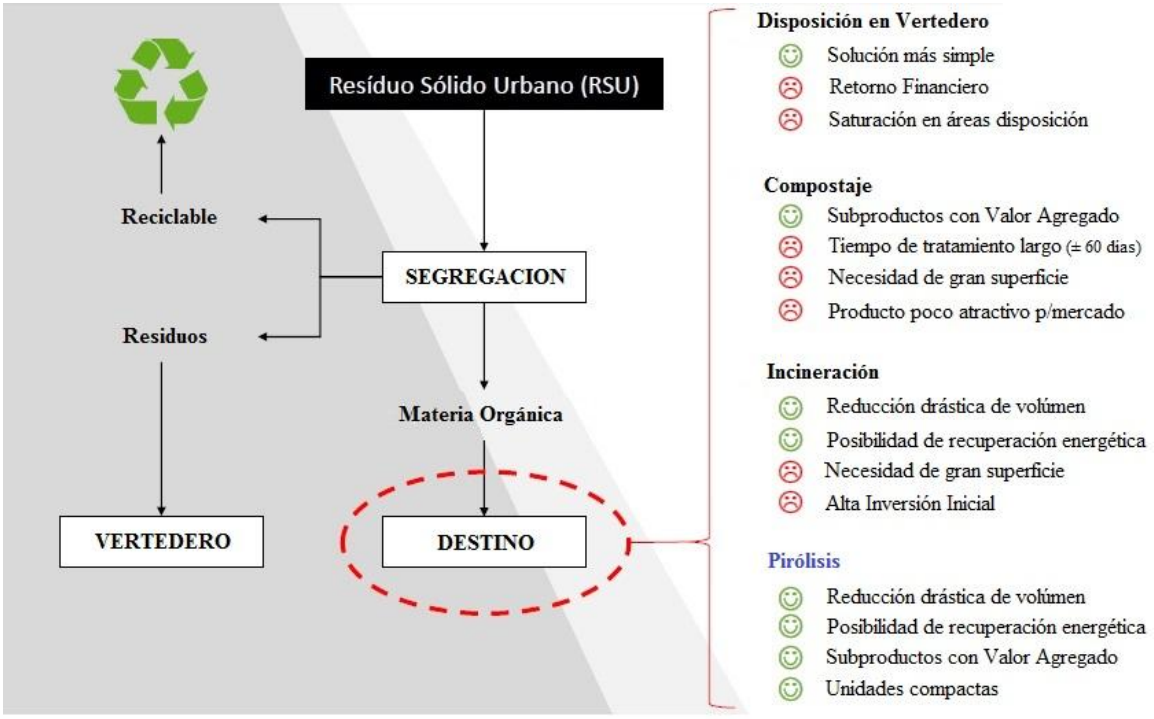


Figura 1. Ventajas y Desventajas de las alternativas de tratamiento de residuos orgánicos. Fuente: Natureza Limpa - IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE/NEGÓCIO – Año 2014

Debe observarse en la Figura 1 que todos los métodos presuponen una etapa previa de segregación (separación) de los materiales reciclables, lo que significa generación de puestos de

trabajo de buena condición sanitaria para grupos sociales marginados que, de lo contrario, dirigirían su accionar a basurales incontrolados.

La investigadora brasileña Ana Lucia Marchezetti [9], de la Universidad de Paraná, en su tesis de maestría evalúa la Pirólisis en tercer lugar, tras el método de Enterramiento Sanitario y el Compostaje, como procedimiento de disposición final de RSU, empleando una matriz que pondera costo de instalación, emisión de contaminantes, subproductos generados, temperatura requerida e impacto ambiental.

Tabla 4. Evaluación de las alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento de los RSU. Fuente: Marchezetti, 2009.

Tecnologías	Índice
Reciclado + Enterramiento Sanit.	3.488
Compostaje	1.859
Pirólisis	1.244
Plasma	1.179
Gasificación	1.105
Biodigestión	1.090
Incineración	0.904

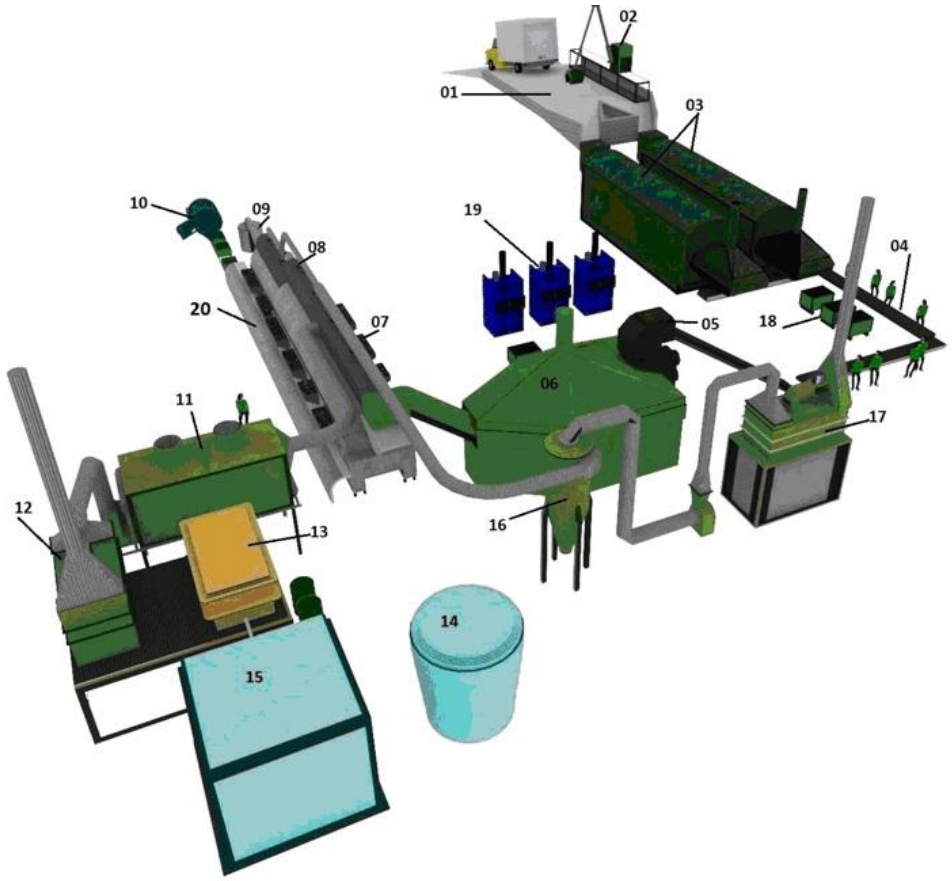
Si bien por su bajo costo de instalación la tecnología de reciclado y enterramiento sanitario de residuos aparece en el primer lugar de la Tabla 4; la misma investigadora destaca entre sus desventajas el bajo rendimiento de recuperación de materiales reciclables en comparación con otros métodos.

3.2 Proceso Pirolítico

El proceso de pirólisis es un tratamiento que consiste en la degradación térmica de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno con la formación de una fracción rica en carbón sólido y una fracción volátil compuesta de gases y vapores combustibles con valor calorífico. Los gases generados, comprenden principalmente H_2, CH_4, CO_2 y otros; líquidos: como alquitrán, acetona, ácido acético, metanol, hidrocarburos oxigenados complejos y sólidos, perteneciendo a este grupo el coque (carbono puro) y material inerte. La proporción de cada fracción varía con la temperatura de pirólisis, y aproximadamente se estima en 10 a 20 % de gases, 60 % de alquitrán y 20 a 30 % de carbón. La Figura 2 muestra sintéticamente el layout de una planta de tratamiento pirolítico para RSU.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los gases provenientes de la combustión del carbón (vapor seco) o de la carbonización de residuos sólidos (vapor húmedo) son llevados para tratamiento a un destilador instalado a la salida del horno para la segregación por aglomeración y colecta de aceite, lignina, alquitrán y agua ácida, reduciendo los efluentes atmosféricos a simple vapor de agua. Un sistema de tratamiento y purificación de aire, por otro lado, permite eliminar casi por completo los olores generados por la descomposición natural de los residuos orgánicos, mientras una caja de retención impermeable



01 - Recepción de residuos	06 - Tolva de RSU orgánicos	11 - Condensador	16 - Exhaustor de humos
02 - Brazo mecánico de suministro del túnel	07 - Horno de deshidratación	12 - Lavador de gases pirolíticos (scrubber)	17 - Lavador de gases del horno (scrubber)
03 - Túnel de secado	08 - Hornos de Carbonización	13 - Filtro / prensa	18 - Carros para transporte material reciclaje
04 - Cintas de reciclaje	09 - Sistema de tamizado	14 - Tanque de agua	19 - Prensa de reciclaje
05 - Cortador de restos orgánicos	10 - Briqueteadora	15 - Tratamiento de efluentes	20 - Túnel de secado

Figura 2. Layout proceso de Carbonización Pirolítica - Fuente: Projeto Natureza Limpa. http://naturezalimpa.com

ISBN: 978-987-1676-63-7

recibe los efluentes líquidos para posterior bombeado hasta una serpentina en el horno para evaporación, condensación y colecta por separación de líquidos y materiales grasos. Por lo tanto, no habría contacto del lixiviado con el suelo o mal olor en la estación y alrededores y no existirían ni siquiera residuos, porque el alquitrán, el vidrio, el hierro, las cenizas, la lignina o el agua ácida tienen un destino comercial en la construcción civil y otras ramas de la industria.

Por lo que hace a los aspectos climatológicos, el modelo de descomposición pirolítica contribuye doblemente para la reducción de los Gases de Efecto Invernadero y se califica en doble para la obtención de créditos de carbono instanciados por el Protocolo de Kioto, como a continuación se explicita:

> "*A través de la eliminación del relleno sanitario, elimina las emisiones de metano asociadas a la descomposición de la materia orgánica, atacando así una fuente importante de aumento de la temperatura atmosférica. Inclusive produce energía limpia por uso de combustible que nada añade al balance general del dióxido de carbono, ya que los volúmenes liberados en la quema resultarían iguales a las cantidades previamente removidas por fotosíntesis para la producción de la masa orgánica ahora carbonizada. El resultado es una clara disminución general de gas metano y hasta una reducción de los valores de dióxido de carbono al final del circuito, porque el proceso sustituye gas o petróleo, por una energía limpia generada a partir de un combustible climatológicamente neutro."* [10].

En base a los antecedentes disponibles, el modelo operaría con un consumo mínimo de agua y, en consecuencia, impacto hídrico virtualmente nulo. Cerrando las operaciones, las cenizas –con volumen de aproximadamente 3 % de la materia prima inicial– se aprovechan en la producción de agregados para cemento.

4. IMPLEMENTACIÓN PROPUESTA

La solución que se propone para el Municipio de La Rioja (Capital), consiste en la instalación de una planta con una capacidad de tratamiento de RSU brutos de 180 toneladas por día (7,5 tn/hora), en un proceso continuo con un uso mínimo de energía eléctrica, operando a baja temperatura (pirólisis suave), produciendo carbón con Poder Calorífico Inferior (PCI) = 4.500 Kcal/kg. El costo de la planta es de aproximadamente u$s 2.500.000, que incluye la maquinaria y el sector de reciclaje donde se segrega, comprimen, acondicionan y envasan los productos que no son sometidos a carbonización para su posterior venta. Se contempla una inversión adicional de u$s 150.000, para la inclusión de una estación de análisis de emisiones atmosféricas para la detección temprana de eventuales fallas en el funcionamiento de la planta de tratamiento pirolítico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La tecnología disponible permite someter a carbonización pirolítica a todos los elementos que componen los RSU, a excepción de vidrio y metales. Sin embargo, aplicando un criterio de ecosustentabilidad con desarrollo social que trasciende el análisis estrictamente económico, se propone [8] la carbonización sólo del componente orgánico y la comercialización de los subproductos reciclables.

A partir de las 160 toneladas diarias de RSU generados en la ciudad de La Rioja, la aplicación del proceso propuesto conduce a los siguientes resultados calculados:

Sector Segregación: en este sector se realizan de manera manual la separación de vidrios, materiales ferrosos y papel/cartón, obteniendo de manera aproximada:

Vidrio: 3,84 toneladas, que es triturado para su comercialización (2,4% de los RSU Brutos).

Materiales Ferrosos: 3,84 toneladas, reducidas y almacenadas para su posterior venta. Se pierde parte de material en el proceso, siendo el peso neto final 3,68 toneladas (2,4% de los RSU Brutos).

Papel y Cartón: 12,00 toneladas, prensadas en la misma planta para su posterior comercialización (7,5 % de los RSU Brutos).

Sector de Aprovechamiento: en este sector se realizan de manera manual la separación de PET, plásticos rígidos, plásticos flexibles y aluminio, obteniendo de manera aproximada:

Polietileno (PET): 2,88 toneladas que son trituradas obteniéndose flakes de PET para su comercialización (1,8 % de los RSU Brutos).

Plástico Rígido: 7,36 toneladas que son trituradas, obteniéndose flakes de plástico rígido para su comercialización (4,6 %).

Plástico Flexible: 11,36 toneladas que son procesadas obteniéndose plástico flexible extruido para su comercialización (7,1 %).

Aluminio: 0,80 toneladas que son fundidos obteniéndose lingotes para su comercialización (representa el 0,5 % de los RSU Brutos).

Sector de Pirólisis: en este sector se realizan el proceso de carbonización de los componentes orgánicos de los RSU. De este proceso se obtiene:

Carbón: 50,72 toneladas de carbón en polvo de los cuales 15 toneladas aproximadamente son utilizadas en el propio proceso. El carbón generado representa el 31,7 % de los RSU brutos y el 47.95% de los Orgánicos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Gases de Pirólisis: 6,40 toneladas de gases que son reconducidos al horno de secado de los RSU en bruto. Los mismos son tratados en su totalidad evitándose emisiones contaminantes a la atmósfera.

Extracto Líquido y Agua: 48,64 toneladas entre ambos líquidos. De su tratamiento se obtienen: 6,4 toneladas de líquido pirolítico con alto contenido graso y que es utilizado nuevamente en el proceso de pirolisis por su poder calorífico, como asimismo 42,42 toneladas de agua para uso interno y riego del predio.

Sector de Recuperación Energética: en este sector se prevee una unidad de generación de energía eléctrica mediante la utilización de calderas que utilizan parte del carbón generado en el proceso al igual que el horno pirolítico de tratamiento continuo. La usina generaría 1,5 MW que cubrirían la demanda eléctrica total de la planta.

Por lo que respecta al recupero de la inversión, los cálculos realizados establecen que en un plazo de 5 años se produce el recupero a valores actualizados. Paralelamente se calcula que la instalación de tratamiento pirolítico de RSU producirá la creación de 156 puestos de trabajo directos. El impacto desde lo social para la ciudad será muy significativo, ya que contribuirá a reducir la tasa de desempleo, no sólo por los puestos de trabajo generados de manera directa en el proceso, sino que, adicionalmente, por los emprendimientos o cooperativas que podrían crearse para el tratamiento y revalorización de los subproductos generados.

5. CONCLUSIONES

Se han expuesto las ventajas derivadas de la aplicación conjunta de segregación de reciclables y el tratamiento pirolítico de los restantes residuos, con un muy modesto impacto ambiental resultante. La Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) requiere de la toma de decisiones desde los gobiernos locales en el corto plazo, con un conocimiento cabal del estado de situación relativo a la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) para lo cual se necesita no solamente el análisis, diseño e implementación de los subsistemas de recolección, transporte y disposición final de los RSU, sino también la formulación de indicadores específicos que permitan evaluar y controlar la evolución temporal de la GIRSU, desde lo social, lo ambiental, lo económico y lo normativo.

Queda entonces pendiente para completar la propuesta, la identificación de los aspectos de la gestión que incidan sobre su socioecosustentabilidad y la formulación de los correspondientes indicadores, junto con las metodologías de medición asociadas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

REFERENCIAS

[1] SIMRU, 2006, '*Estudios sectoriales y del Sistema de Monitoreo de Residuos Urbanos*', OPS.

[2] BM,2014, '*Reporte Banco Mundial',* [Página web], Consultado el 04 de Febrero de 2015, http://datos.bancomundial.org/region/LAC

[3] Wertz K, 1976, *'Economic factors influencing household's production of Refuse'*, Journal of Environmental Economics and Management, vol. 2.

[4] Richardson R y Havlicek J, 1978, '*Economic analysis of the composition of household solid waste'*, Journal of Environmental Economics and Management, vol. 5.

[5] DRSUAL, 1997, '*Diagnóstico de la Situación del Manejo de los Residuos Sólidos en América Latina y el Caribe*', Publicación Conjunta entre BID y OPS.

[6] OPS, 2002. Organización Mundial de la Salud, Organización Panamericana de la Salud. Estudio "*Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos, 2002 – Argentina*". Comité Argentino para la Evaluación 2002.

[7] ENGIRSU, 2005, *'Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos'*, Ministerio de Salud y Ambiente, Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

[8] Holote L., Christian (2015). *Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos – Análisis de la Sustentabilidad de la Aplicación de la Tecnología de Carbonización Pirolítica. Análisis del Caso de la Municipalidad del Departamento Capital La Rioja – Argentina*. Tesis de Maestría en administración de negocios. UTN-Fac. Regional Mendoza 2015. Inédito.

[9] Marchezetti, Ana Lucia (2009). *Avaliação de Alternativas Tecnológicas para o Tratamento de Resíduos Sólidos Domiciliares pela Aplicação do Método AHP: Estudo de Caso da Região Metropolitana de Curitiba*. Tesis de Maestría Universidad de Paraná, Curitiba, R.F. de Brasil.

[10] Lambert, Jean M. (2012), '*Proposta natureza limpa tratamento final de resíduos sólidos urbanos/eliminação de aterro sanitário' UNAI* – Minas Gerais – Brasil – Consultado: 11 de Febrero de 2013, http://www.naturezalimpa.com/es/

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPLEMENTACIÓN DE LOS RECURSOS RENOVABLES PARA MAXIMIZAR LA ENERGIA RENOVABLE OBTENIDA EN LA UNCo

Carlos Labriola [1], **Isabel Ferraris**[2], **Ariel Marchegiani** [3], **Claudia Palese**[3], **Jorge Lässig** [3]

Departamentos de [1]Electrotecnia, [2]Física y [3]Mecánica – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina
correo-e: carloslabriola54@yahoo.com.ar.

RESUMEN

A partir del 2015 comenzó en el ámbito de la Facultad de Ingeniería en la UNCo la etapa de implementación de la Central Eléctrica Escuela, luego de proyectos de investigación, tesis de grado y postgrado que dimensionaron instalaciones y prototipos a ser instalados en el predio de la Universidad en la ciudad de Neuquén. Los aspectos no técnicos fueron los más problemáticos (gestión de espacios para instalación, gestión de RRHH, etc.) [1] , mientras que los técnicos a pesar de las restricciones de importación e inflación anual, se fueron resolviendo por cambio tecnológico y nuevos desarrollos. En el 2016 estamos en la etapa de implementación propiamente dicha en los espacios disponibles, medidas de seguridad contra vandalismo en instalaciones en marcha y disponibilidad de RRHH para ensayos, dimensionamiento de instalaciones civiles y mecánicas, procedimientos, proyectos de redes y carga dedicada como es los Servidores de la Facultad de Informática [2]. Este trabajo propone el plan de tareas a seguir los próximos dos años evaluando las dificultades que se podrían dar en la implementación. La base de la propuesta es la Metodología de Ciclo de Vida de equipamientos electromecánicos para lo cual ya se ha cumplido la primera etapa de idea, diseño conceptual, diseño técnico de prototipos, plan de despacho de potencia en función de la disponibilidad de generación, selección y gestión del lugar de emplazamiento, cálculo anual del CO2 evitado y formación de RRHH. A futuro nos queda el diseño civil de casa de máquinas para turbina eólica y para turbina microhidráulica, la reingeniería del sistema de frenos de la turbina eólica Darrieus-troposkien, tendidos de alimentación y petición de paso, actualización del cálculo del CO2 evitado según despacho complementario, procedimientos de ensayo de inicio de operación y de operación normal complementaria según disponibilidad del recurso eólico y el hidráulico donde este último tema es el tópico particular de este trabajo.

Palabras Claves: *Central, escuela, Darrieus, microhidráulica, generación.*

1. Introducción:

En el año 2000 se concibió la necesidad de disponer de Cogeneración en la FIUNCo, a raíz de tener varias donaciones de equipamiento de generación y transformación de energía. Paralelamente desde el 2000 se fue creando la necesidad de que es indispensable que en una Facultad de Ingeniería se tenga conciencia de la situación de la variabilidad climática y las formas de mitigar este flagelo producido por la actividad humana (Watson, 2004).
Desde el punto de vista del uso de la energía hay dos formas de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) son el Uso Racional de la Energía (URE) y la aplicación de Fuentes de Energía Renovable (FER) [3].
A partir del 2010 se plasma esta idea con el Proyecto de Investigación Aplicada FAIN 4/160: "Central Eléctrica Escuela a partir de Combustibles renovables combinados" [4]. En este proyecto se construyen una turbina microhidráulica Turgo (THT) a cargo del LAMHI (Laboratorio de Microcentrales Hidráulicas) y una Turbina de Eje Vertical Darrieus-Troposkien (TEVDT) a cargo del GES y GIV. Luego el Proyecto FAIN 4/199: "Central Eléctrica Escuela – Implementación" [5], se dedica a instrumentar la instalación del equipamiento desarrollado.
Dichas FER Eólica y Microhidráulica, generarán mediante un despacho de energía complementario, o sea cuando hay viento, eólica, y si no lo hay, microhidráulica. La potencia a desarrollar es entre 3 a 5 kW y alimentará a una Microred que tiene una carga preferencial que son las baterías de la UPS de los servidores de la Facultad de Informática y si hay excedente se entrega a la red la UNCo de BT.



Figura 1: Turbina Turgo (arriba) y Turbina Eólica de Eje Vertical Darrieus-Troposkien (derecha) [6].

2. Desarrollo de la Implementación:

Las tareas de la implementación consisten en lo siguiente:
1-Conseguir permiso para instalar el equipamiento en lugares especiales en la UNCo.
2-Protección de los lugares con Alambrado perimetral y cámaras de vigilancia.
3-Instalaciónes civiles de TEVDT y THT: casa de máquinas y accesorios.
4-Instalación del cable de la Microrred y sus tableros de conexión y protecciones.
5-Instalación electromecánica de THT y TEVDT.
6-Conversión CA/CC y CC/CA frecuencia fija.

ISBN: 978-987-1676-63-7

7-Sistema de medición y actuación inteligente.
8-Sistema de control y supervisión inalámbrico.
9-Tareas finales: Conexiones y ensayos de arranque y parada-Informes finales

Estas tareas las podemos detallar en un Cronograma trimestral:

Tarea	Año 1				Año 2				Año 3			
	Trim. 1	Trim. 2	Trim. 3	Trim. 4	Trim. 5	Trim. 6	Trim. 7	Trim. 8	Trim. 9	Trim. 10	Trim. 11	Trim. 12
1	****	****	****									
2				****	****	****						
3					****	****						
4						****	****					
5							****	****				
6								****				
7								****	****			
8								****	****	****		
9									****	****	****	****

2.1. Ubicación:

Dentro del Predio de edificaciones universitarias y según el Plan Maestro de la UNCo, ubicamos los lugares solicitados para la instalación de las THT y TEVDT, detallando las instalaciones adicionales a realizar/realizadas según las tareas:

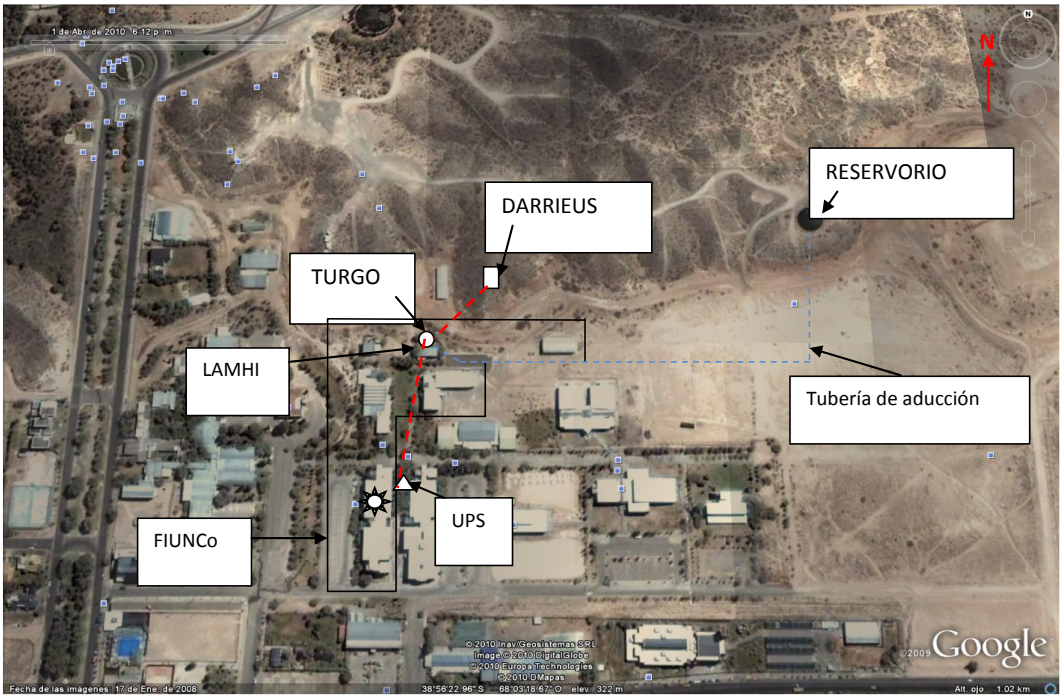


Figura 2: Ubicación en el predio de edificaciones de la UNCo

Cabe aclarar que:

1-El reservorio es existente, se usa para acumular agua para riego.

2-La tubería de aducción es existente, lo único que hay que hacer es la conexión a la THT.

3-La THT se instala al lado del LAMHI y tendrá instalaciones para uso en flujo libre y flujo confinado con sus instrumentos de medición.

4- ✲: Centro de control inalámbrico por FM, ubicado en oficina de la FIUNCo [7].

5- - - -Cable subterráneo de Corriente Continua.

2.2. Circuito y Carga prioritaria

Como se puede ver en Figura 2, se representa en línea punteada roja el tendido de la línea de distribución de energía eléctrica a la carga.

El proceso de conversión de energía sería el siguiente:

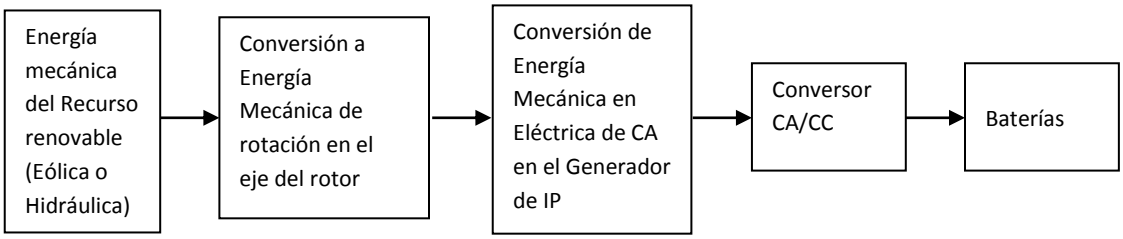


Figura 3. Diagrama en bloques del proceso de conversión de energía.

Cabe destacar que a la salida de cada generador van protección Termomagnética de Imáx.=25A. Esto es fundamentalmente para proteger los generadores ante fallas en el cable, al cable ante falla en los generadores o en la carga y a la carga ante fallas en cable o generadores.

Como indica la Figura 4 el cable de CC transmitirá la tensión nominal de las baterías entrando directamente al regulador de tensión de las mismas. Por lo tanto a la salida de los generadores habrá transformadores que elevarán a esa tensión para el ingreso de la energía a los cables.

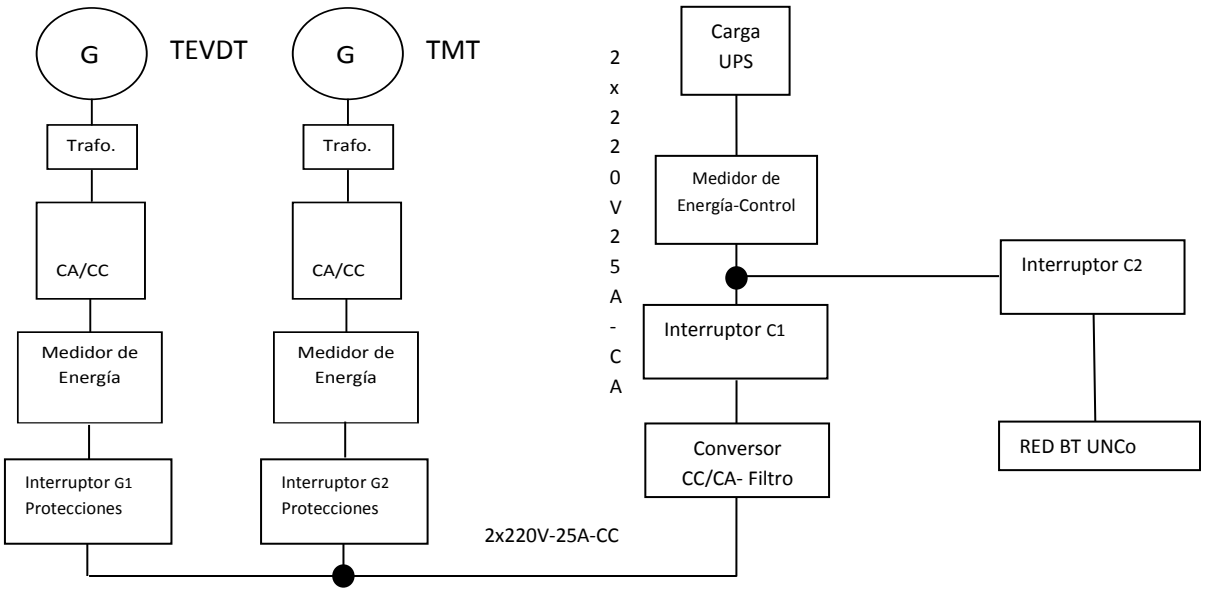


Figura 4. Circuito de generación, distribución y carga.

ISBN: 978-987-1676-63-7

También hay que notar que se ha conectado la carga a una posibilidad de conexión con la red de CA local por si hay problemas de disponibilidad de las FER.

Los medidores de Energía son inteligentes o sea que avisarán cuando hay generación en cada fuente y verán si la necesita la carga o de estar cargadas las baterías se la entregará a la red local de la UNCo. Se recuerda que las baterías están incluidas en la UPS (Figura 4).

3. Perspectivas a futuro

A futuro se prevé disponer de un lugar más amplio que involucrará generación térmica con biogás y biodiesel en BT, en módulos crecientes de 250kW hasta llegar a aproximadamente a 1,5MW [8], que es la demanda máxima actual de la UNCo. Si a futuro hace falta más generación se verá de suplirla con Módulos Térmoléctricos o tomar de la red. En ese lugar no solo habrá generación, sino también una subestación transformadora de MT/BT[9]. En MT habrá transformación a 13,2kV y 33kV que son las tensiones de uso en distribución urbana y semi-rural en Neuquén. También al lado de la Subestación de generación/transformación, habrá un campo de líneas de BT y MT para entrenamiento en instalación y mantenimiento de las mismas.

Los grupos electrógenos son del tipo polivalente en lo que se refiere a combustibles con motores DEUTZ que pueden usar gas, gasoil o nafta. Para ello tienen doble sistema de inyección de combustible. Estos usarán en nuestro caso Biogas proveniente de digestores con desechos orgánicos de la UNCo o Biodiesel producido de microalgas. En Figura 5 se muestra el proceso para el caso de las microalgas.

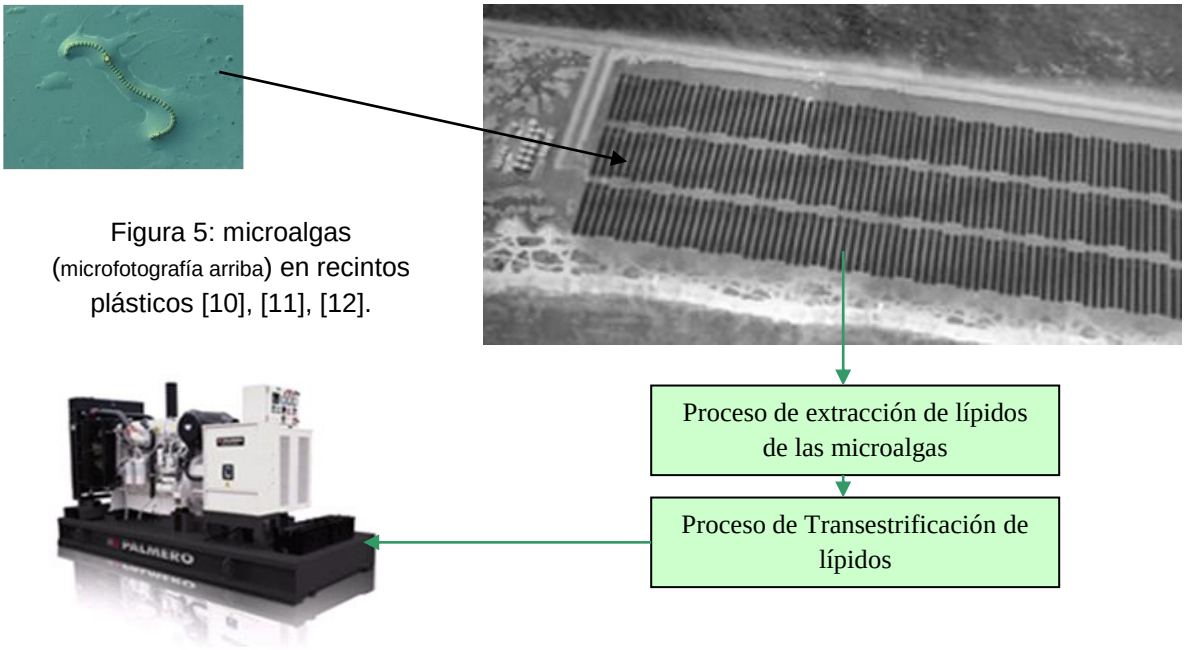


Figura 5: microalgas (microfotografía arriba) en recintos plásticos [10], [11], [12].

Respecto del ciclo de viva podemos dar los primeros años según la línea de vida en el esquema siguiente:

2000-2010	2010-2013	2014-2017	2018-2021	2022-2025
Maduración de la Idea y generación de RRHH	Diseño conceptual y Diseño y Construcción de turbinas	Implementación: Instalación de turbina eólica e Hidráulica en espacios solicitados. Desarrollo de procedimientos de instalación y Ensayos.	Operación: desarrollo de procedimientos de operación y mantenimiento	Implementación de generación Térmica. Overhaul de las turbinas.

Se detalla en negro lo que se ha realizado y se está realizando, mientras que esta en azul las tareas a futuro. Se estiman una duración de 5 años de las turbinas eólica y microhidráulica ya que son prototipos, para lo cual al salir de servicio debería estar implementándose por lo menos el primer módulo de generación termoeléctrica.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones:

Como se puede ver y a través de publicar los avances de este proyecto desde el año 2010 en el CAIM, se va realizando y a la vez se va simplificando por diferentes situaciones:

- Avance de la tecnología y mayor facilidad de conseguirla a pesar de los problemas de importación e inflación.
- Generación constante de RRHHs e incorporación de RRHHs atentos a los cambios tecnológicos en el proyecto.
- Ampliación de los factores No Técnicos (los de gestión del proyecto), por medio de las interrelaciones multidisciplinarias dentro de la UNCo.
- Motivación del alumnado que se incorpora a 3er año de las carreras de la FIUNCo no solo por la tecnología aplicada al proyecto, sino también a dejar algo de ellos en la UNCo.

Estamos en el inicio del ciclo de vida a pesar de que desde el nacimiento de la idea han pasado 16 años. Esto muestra el hecho de que los tiempos Académicos no son iguales a los tiempos de las empresas y el mercado. Esto es así porque la prioridad en la Universidad es enseñar, luego será investigar y hacer extensión universitaria.

4.2. Recomendaciones:

Este proyecto fundamentalmente consiste en generar instalaciones que permitan ser prototipos para la enseñanza electromecánica y además prestar un servicio a la UNCo, sin olvidar que la prioridad es la docencia y la investigación.

A pesar de las afirmaciones optimistas de las conclusiones cabe destacar que los problemas de gestión y cambio de tecnología han hecho que este proyecto tenga retrasos en su implementación. Por ello no hay que dejar que la burocracia instalada en nuestras universidades nos desmotive en proyectos que en definitiva beneficiarán a nuestros alumnos.

Se está llegando a un cambio generacional de los RRHH de los grupos de Investigación asociados al Proyecto (Grupo de Energía y Sustentabilidad del Depto. de Electrotecnia, Grupo de Ingeniería del Viento y LAMHI del Depto. de Mecánica), dado que en los próximos 5 años se jubilaran algunos de los mentores del proyecto. Por lo tanto lo más relevante en dicho período será el trasvasamiento generacional de la idea de este proyecto y la capacitación de los RRHHs existentes.

Hay que tener en cuenta que las ideas deben comenzarse a partir de lo mas simple y sencillo, y luego complejizarla en la medida de los éxitos en el funcionamiento en las etapas previas. No hay que implementar ideas complejas en el inicio porque un fracaso aunque sea parcial puede desmotivar a los RRHHs y acabarse la implementación de la idea.

REFERENCIAS

[1] Marcelo Ávila,Gustavo Ludueña, Daniel Colón, Isabel Ferraris, Carlos Labriola, *CENTRAL ELECTRICA ESCUELA – IMPLEMENTACIÓN, propuesta a futuro. Los autores son integrantes del Grupo de Energía y Sustentabilidad de la FIUNCo.* Trabajo editado en Anales del IV CAIM 2014, desarrollado en la Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco. Septiembre 2014.

[2] Carlos Labriola, Ariel Marchegiani, Marcelo Ávila, Gustavo Ludueña, Fernando Liozzi, *Cogeneración con Fuentes de Energía Renovable en Unidades Académicas en Argentina*. Los autores pertenecen al Centro de Estudios y Análisis de Aplicaciones de Fuentes de Energía Renovable de la FIUNCo. Trabajo editado en Anales del XI Congreso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica 2015, Código del trabajo B294, Universidade Estaudal Paulista (UNESP), Estado de San Pablo, Brasil. Noviembre 2015.

[3] ERyMA, 2001: Creación de la asignatura optativa "Energía Renovable y Medio Ambiente" en el ámbito de la FIUNCo, para todas las carreras de Ingeniería y para la Licenciatura en Saneamiento Ambiental de la UNco, marzo 2001.

[4] FAIN 4/160,2010: Proyecto de Investigación: "Central Eléctrica Escuela a partir de Combustibles renovables combinados", Director: MSC. Carlos Labriola, Co_Director: Ing. Rubén Pérez. Período 2010-2013, proyecto terminado e Informe Final aprobado por evaluación externa.

[5] FAIN 4/199, 2014: "Central Eléctrica Escuela – Implementación", Director: MSC. Carlos Labriola, Co_Director: Ing. Isabel Ferraris Período 2014-2017, proyecto en ejecución e Informe de Avance aprobado por evaluación externa.

[6] PICTO, 2010: "DIAGNÓSTICO DEL POTENCIAL ENERGÉTICO EN DOS MICRO REGIONES DE LA PATAGONIA, Y EVALUACIÓN DE TURBINAS EÓLICAS DESARROLLADAS POR UNIVERSIDADES NACIONALES EN AMBOS LUGARES ", Proyecto PICTO CIN II 2010 -0085, Director: Dr. Jorge Lassig, Co-Director: MSc. Ing. Carlos Labriola, 2010-2014.

[7] CIDEL 2014: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES Y CONTROL PARA CENTRAL ELECTRICA ESCUELA A PARTIR DE COMBUSTIBLES RENOVABLES COMBINADOS EN LA UNCo Autores: Ing. Daniel Colón, Msc. Ing. carlos Labriola, Congreso Iberoamericano de Distribución Eléctrica, Benos Aires, 22 al 24 de septiembre del 2014.

[8]CAIM 2014: "CENTRAL ELECTRICA ESCUELA – IMPLEMENTACIÓN"; Ing. Marcelo Ávila, Ing. Gustavo Ludueña, Ing. Daniel Colón, Ing. Isabel Ferraris, Msc. Carlos Labriola. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, 2 al 5 de septiembre del 2014.

[9] Wolham, C.: *Tesis de Grado: "Estación Transformadora didáctica de 13,2/0,400KV"*, Director: Ing. Rubén Pérez, presentada en agosto 2012, FIUNCo, Neuquén.

[10] Barón, 2010: "Desarrollo de planta experimental de biodiesel a partir de microalgas", *Convenio Universidad de Hawai-Universidad de Cuyo*, presentación del Dr. Barón, 2010.

[11] Bagnatto, Carolina, 2013: "UTILIZACIÓN DE EFLUENTES INDUSTRIALES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE MICROALGAS" Autores: Quiroga, D.,Montenegro L. S., Labriola C., Bagnato C. y Rosenbaum E.. *HYFUSEN*, 10 al 14 de Junio del 2013, Córdoba.

[12] Palmero, 2010: Equipamiento Electrógeno Multi-combustible para generación eléctrica, propuesta de convenio de comodato para generación térmica en la FIUNCo.

Área Temática: **Energía y Medio Ambiente**

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

VARIADOR DE VELOCIDAD CONTÍNUO PARA BICICLETAS.

Autor: Ing. Krom Diego.
Dirección: Luis Agote 165 – Neuquén (capital)

correo-e: dkrom@invapnqn.com.ar diegokrom@yahoo.com.ar
Estudios cursados en la Universidad Nacional del Comahue.

RESUMEN

Los ciclistas, demandan que los cambios de velocidades en las bicicletas sean lo más versátiles posible, tanto en la amplitud de relación de marcha como en su capacidad de regulación.

El cambiador de velocidad corriente posee dos características elementales: funciona de manera discreta; y la cantidad de piñones disponibles es limitada.

De aquí surge la solución de compromiso, de que, si se desea obtener una regulación fina se pierde amplitud de rango en la razón de marcha, y viceversa. Así mismo, para lograr la correcta combinación de plato y piñón, se requiere de una manipulación de palancas, pocas veces bien interpretada.

El cambio de velocidad continuo viene a dar respuesta a dicha limitación, con un solo comando cambiador y con infinitas (teóricamente) relaciones de marcha en un rango predeterminado.

Funcionalmente, el mecanismo parte del movimiento circular punzante de medio ciclo correspondiente a un pedaleo normal, transformándolo en un desplazamiento alternativo por medio de un mecanismo conocido como CRUZ DE MALTA. A dicho mecanismo se le puede variar el radio de la manivela punto a punto, consiguiendo así, infinitas relaciones de velocidades entre los radios máximo y mínimo adoptados.

Seguidamente, el movimiento alternativo se transforma nuevamente en rotacional mediante un sistema de piñones-crique y cremalleras dispuestos en espejo dentro de la corredera, con el fin de rectificar su movimiento negativo y aprovechar la vuelta completa del pedaleo.

Finalmente, para optimizar el movimiento y no perder tracción en los puntos muertos del pedaleo va emplazado un crique adicional solidario al plato motor de la transmisión.

Al día de hoy, el grado de avance del concepto, comprende un prototipo a escala real, en una bicicleta rodado 26.

Palabras Claves: *Variador. Continuo. Velocidad, Cambios, Bicicleta. (5).*

Área Temática: Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo formó parte de mi tesis de grado presentada a fines del año 2011 para la carrera de ingeniería mecánica de la Universidad Nacional del Comahue. El trabajo final constituyó un proyecto más ambicioso que, aparte de que la velocidad del vehículo variara en forma continua, también involucraba la automatización del mecanismo.

La idea base fue, directamente, desvincular la acción de los comandos de los cambios de transmisión, generando un nuevo dispositivo totalmente automatizando, independizando al ciclista del ajuste de la relación de marcha en la que debe funcionar su máquina.

La investigación colectó información de variadas fuentes, una de ellas consistió en indagar en el ciclismo de alta competencia, con entrevistas a personas especializadas en el rubro. Del cúmulo de información recabada, la necesidad que surgió con mayor vigor fue la de contar con relaciones de marcha intermedias a dos piñones consecutivos. Prácticamente, para la totalidad de los ciclistas éste requerimiento es imposible de sortear, puesto que el cambio de relaciones de marcha en las bicicletas convencionales se realiza de a saltos o sea, de manera discreta.

De aquí, se fijaron dos objetivos troncales: la primera fue la automatización de los cambios y, a su vez, que la relación de marcha varíe punto a punto, de forma continua.

Las dos nociones fueron avanzando a través del tiempo arribando a diferentes tipos de soluciones, aunque el desarrollo más acabado recayó sobre el Cambio de Velocidades Continuo. Por ésta razón es que se decidió presentar solamente este extracto, al presente congreso.

Entonces, para pasar en limpio, la necesidad técnica a cubrir, expuesta en la actual presentación, consta en desarrollar un sistema de cambios de velocidad continuo (o analógico), tal que el vehículo opere con la mejor relación de transmisión requerida para cada necesidad de terreno y de ésta forma optimice la fuerza ingresada al sistema, que para el caso en cuestión, es la del pedaleo del ciclista.

2. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.

Como es notorio, los mecanismos que aquí se proponen, no se han masificado en la plaza, aunque hace tiempo que existen dispositivos que vinieran a solucionar la hipótesis planteada pero resulta que son caros en su inversión inicial o en su mantenimiento o poseen pérdida de eficiencia a bajas revoluciones, debido a que trabajan esencialmente con fuerzas de fricción.

Hay diferentes tipos de variadores continuos de velocidad pero en éste caso se hace referencia específicamente a dos tipos, que fueron probados en bicicletas lanzadas al mercado: uno es el de polea variable con discos deslizables (transmisión a correa) y otro con discos de fricción vinculados

ISBN: 978-987-1676-63-7

entre sí mediante una pieza que permite variar los radios nominales de las relaciones de transmisión.

De aquí, es que se necesita hacer un replanteo sustancial del mecanismo y poner en claro algunas pautas de diseño, o hipótesis de funcionamiento, como punto de partida de un desarrollo futuro.

3. HIPÓTESIS DE FUNCIONAMIENTO.

A continuación se detallan diferentes descripciones y objetivos respecto a los elementos de entrada del sistema (parámetros establecidos por el medio) y las condiciones de contorno (requisitos impuestos por el diseñador)

- La transmisión a cadena: elemento sencillo, económico, confiable y de mayor eficiencia que las correas.
- Movimiento en tracción: Tipo pulsante, (2 pulsos por cada giro completo de corona)
- Baja velocidad de giro: un máximo de 250 rpm, marcha normal entre 60 y 80 rpm.
- Fuerza máxima sobre el pedal, igual a 200kg.
- La fuerza motora (la del ciclista) siempre se realiza en dirección vertical.
- Que posea movimiento contrapedal: para facilitar el reposicionamento de los pedales.
- Se adopta el torque motor nulo en el punto muerto superior e inferior de la pedalera, y máximo a 90º de dichos puntos.
- No utiliza dispositivos asociados a fuerzas no conservativas, como por ejemplo transmisión hidráulica, amortiguadores, ruedas de fricción, etc
- Suciedad a la que se expone el mecanismo: exposición a tierra, agua, barro, hollín, etc.
- Robustez: riesgo de choques y golpes por caídas u objetos contundentes (piedras alambres, etc.). También debe soportar aceleraciones inherentes al uso de la bicicleta.
- Escaso espacio disponible para el emplazamiento del dispositivo en la transmisión.
- Peso: Al ser tracción a sangre el peso del vehículo se torna sensible a la hora del diseño.
- Comodidad de manejo (o confort de marcha): Debe ser armónico y silencioso.
- Confiabilidad: Baja complejidad en el diseño.
- Mantenimiento: Debe ser económico y requerir de la menor frecuencia posible de servicio.
- Viabilidad: Que sea económicamente factible y de fácil producción.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. GENERACIÓN DE CONCEPTOS.

A continuación se explayan sucintamente las ideas propuestas más salientes, devenidas en orden cronológico, hasta llegar a la solución de la hipótesis planteada.

4.1. Concepto 1: Corona con brazos retráctiles.

Este modelo consta de una corona con brazos regulables, en los cuales se les aloja un resorte, y vinculado a él por sus extremos dos pequeñas coronas con trinquete, cuestión de que tomen carga en un sentido y que en sentido contrario gire libre. Esos detalles se ilustran, para una mejor comprensión, en la Figura 1.

Su principio de funcionamiento consta en variar el radio de cada una de las coronas de modo tal de cambiar la fuerza ejercida sobre la cadena.

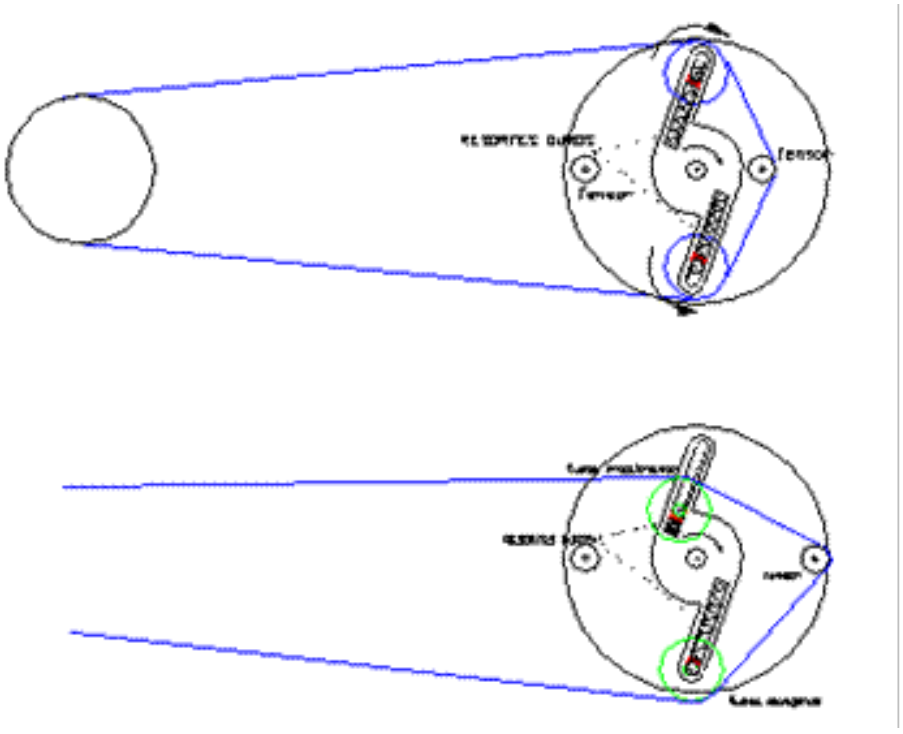


Figura 1 – Corona con brazos retráctiles.

Los inconvenientes fueron varios pero el más significativo se genera al momento de extender y contraer los radios nominales del eje impulsor, especialmente cuando cada corona deba sortear la solución de continuidad que existe en el pasaje del tramo laxo de cadena al tramo de cadena tenso. Para ello se necesita de un mecanismo complejo y de mucha precisión para que los dientes y los espacios entre los eslabones de la cadena coincidan perfectamente para que no resbale, se pierda tracción y el movimiento sea armónico y silencioso.

4.2. Concepto 2: Corona flotante.

La corona motora varía, punto a punto, su radio de giro relativo respecto del eje de la pedalera mediante un mecanismo compuesto por pasadores, solidarios a la corona, que permite “flotar” o deslizar sobre guías que guardan siempre la misma posición angular absoluta.

De esta forma puede variarse el radio de la corona sin tener que disociarla en dos pequeñas coronas independientes y solucionando así, los inconvenientes ya presentados. Detalles que pueden observarse en la Figura 2.

El dispositivo funciona predeciblemente para ciertos ángulos de la vuelta de pedal, pero en el análisis completo de la vuelta, la ventaja tomada en un rango angular es malograda en el complemento de la revolución. Este error fue difícil de advertir puesto que el movimiento en estudio es considerablemente complejo, y los análisis efectuados de manera fragmentada resultaban correctos, pero recién estudiando el movimiento en su totalidad, podría advertirse la deficiencia del mecanismo.

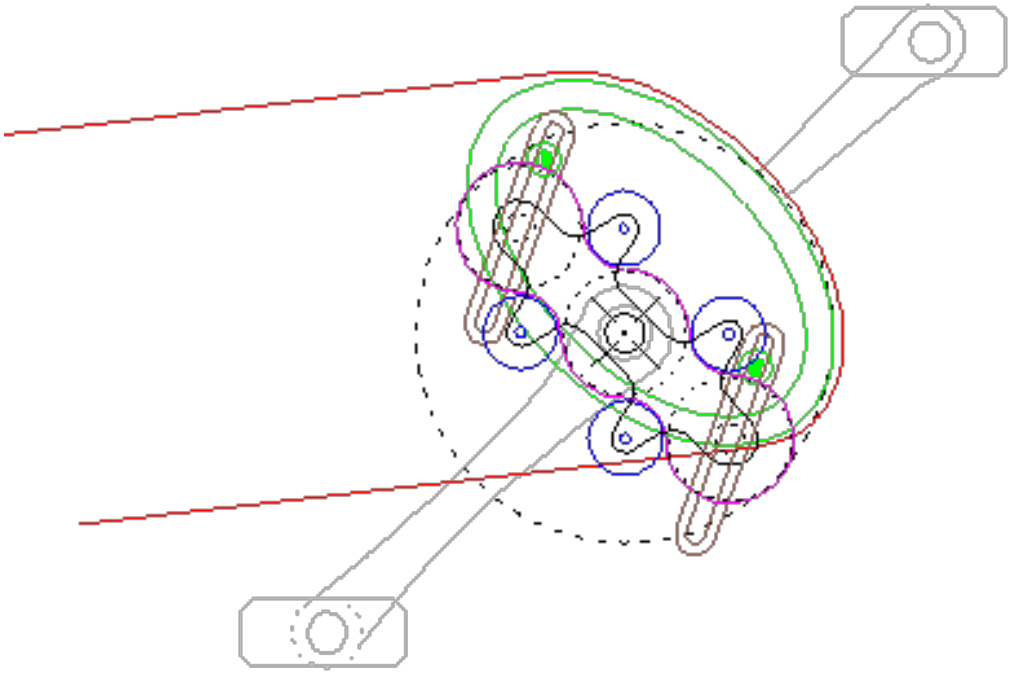


Figura 2 – Corona Flotante.

En síntesis, el eje instantáneo de rotación no se separa nunca del centro de la corona, condición indispensable para que exista cambio en la relación de transmisión, sin embargo, es confuso observar a primera vista porque el eje geométrico de la corona sí, se desplaza.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4.3. Concepto 3: Pedalera de movimiento alternativo

Funcionalmente, el mecanismo parte del movimiento circular punzante de medio ciclo correspondiente a un pedaleo normal, transformándolo en un desplazamiento alternativo por medio de un mecanismo conocido como CRUZ DE MALTA. A dicho mecanismo se le puede variar el radio de la manivela punto a punto, consiguiendo así, infinitas relaciones de velocidades entre los radios máximo y mínimo adoptados.

Seguidamente, el movimiento alternativo se transforma nuevamente en rotacional mediante un sistema de bieletas-crique dispuestos en espejo, con el fin de rectificar su movimiento negativo y aprovechar la vuelta completa del pedaleo.

A continuación, se muestra el dispositivo en la Figura 3, dejando en lo sucesivo una explicación pormenorizada de su funcionamiento.

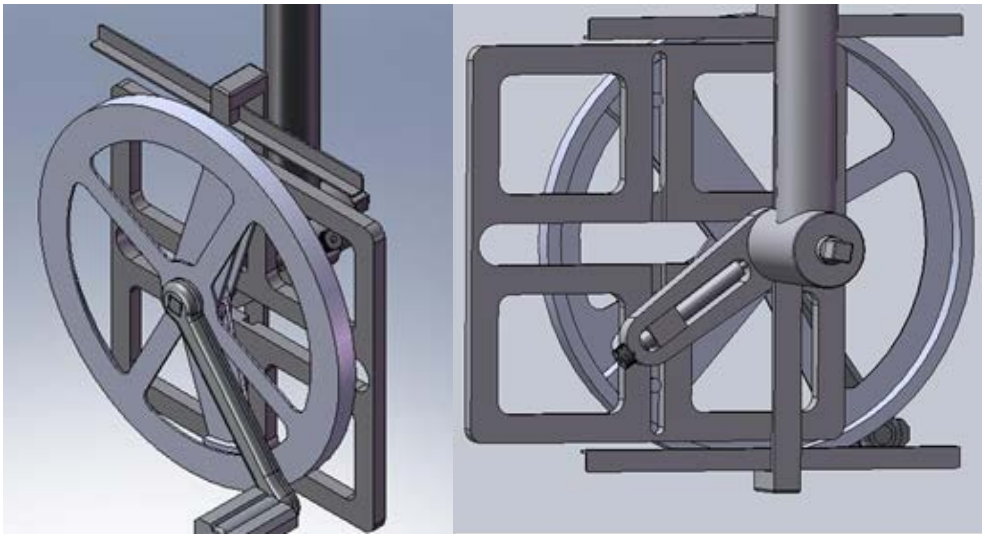


Figura 3 – Pedalera con Movimiento Alternativo (Vista anterior y posterior)

5. SELECCIÓN DEL CONCEPTO.

Evaluados cada uno de los tres conceptos desarrollados se escogió el diseño de pedalera con movimiento alternativo (Concepto Nº3) como concepto solución, por tener las mejores prestaciones de funcionamiento, especialmente por la versatilidad en la variación de la velocidad.

Aunque en ciertos aspectos el dispositivo se complejiza, debido al incremento de piezas en movimiento relativo entre sí y el escaso espacio disponible para emplazarlo en un prototipo, en otros aspectos se simplifica, ya que por ejemplo, el eje de la rueda trasera cuenta con un solo piñón, debido a que el cambio de las relaciones de marcha se efectúa en el eje de la pedalera, y por ende, la cadena no requiere que su longitud varíe, ahorrándose la complicación de montar un

ISBN: 978-987-1676-63-7

descarrilador y su respectivo tensor. Esto también redunda en una mayor vida útil de la cadena, puesto que no debe soportar fuerzas transversales en el momento de cambiar la relación de marcha, porque la misma se realiza antes de llegar a la corona motora.

Tomando como referencia la Figura 4, se describirán las piezas y sus vinculaciones sistémicas, comenzando por la pieza que recibe la fuerza de entrada al dispositivo, que por supuesto, es la que realiza el ciclista sobre el pedal (1).

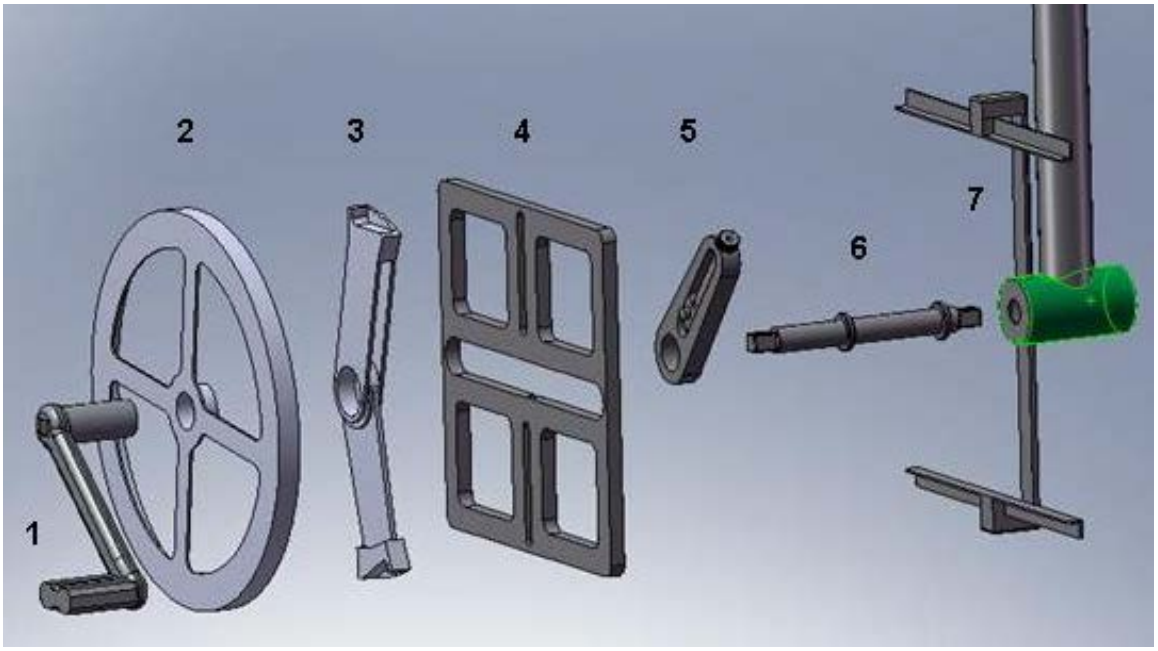


Figura 4: Vista explotada del mecanismo completo.

El pedal se vincula a la palanca, y solidariamente al eje (6) de la cubeta mediante su vínculo de forma estándar. Para no alterar la forma del eje de la cubeta, se dispone de una camisa soldada a la palanca del pedal, y así montar todos los componentes sobre ésta, dando como resultado una reforma prácticamente nula a las piezas de los rodados normalizadas de fábrica.

A 90º respecto de la palanca del pedal y en el extremo opuesto, se fija sobre la camisa, el brazo del pasador variable (5). Este brazo posee en su interior un pasador que se mueve de manera radial por medio de un tornillo helicoidal.

El pasador móvil se relaciona mediante un vínculo de forma con la corredera en cruz (4), cuestión que el único grado de libertad que le queda a la corredera es el de traslación horizontal.

La corredera en cruz (4), en su movimiento de vaivén, desplaza a las bieletas de fricción (3), también por medio del mismo vínculo de forma (vertical), pero con su cara opuesta al pasador móvil. A su vez las bieletas de fricción se ligan a la corona que transmite la potencia a la cadena,

ISBN: 978-987-1676-63-7

mediante un vínculo de fuerza (campana y rodillo de fricción). Por último, la cadena es la encargada de dar tracción a la rueda trasera desde su único y sencillo piñón.

Independientemente de lo señalado para la validación técnica del concepto se requiere hacer un análisis dinámico detallado que se presenta a continuación.

5.1. Estudio Dinámico del Mecanismo.

A continuación se procederá a deducir matemáticamente las fuerzas intervinientes en el mecanismo de cambio de marcha, teniendo como punto de partida a la fuerza de entrada, que ejerce el ciclista sobre el pedal. Dicha fuerza, por definición en las hipótesis se la toma siempre constante y vertical.

La fuerza de salida del mecanismo se obtendrá del radio nominal de la corona motora, vinculada a la cadena. Por ende, se tendrá particular atención en la obtención de la fuerza de salida en función del ángulo de la palanca del pedal y del radio variable del pasador móvil, ya que el resto de los variables dependen esencialmente de éstos dos parámetros.

Luego de hacer las deducciones correspondientes se mostrarán, en forma de gráficos, la variación de las variables en 180º de recorrido del pedal (desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior), ya que en una vuelta completa de pedal se repiten dos ciclos completos de recorrido semejante.

Para que se pueda comprender con mayor facilidad de dónde surge cada función, se detallan esquemas puntuales respecto a sus ecuaciones asociadas, con el propósito de identificar claramente la parte del dispositivo en la cual se está operando.

Para distinguir los componentes se los enumera, con la misma referencia de la Figura 4, y se les asocia un nombre, a saber.

1- Brazo de pedal.

2- Disco con campana de fricción.

3- Brazos de movimiento alternativo.

4- Corredera en cruz.

5- Brazo con pasador móvil.

6- Eje de la pedalera.

7- Cubeta, con parte del bastidor.

Comenzando con el análisis del movimiento y de fuerzas, se deduce primero el momento de entrada $\mathbf{M_E}$ mediante la fuerza de entrada $\mathbf{F_E}$, el brazo del pedal $\mathbf{B_P}$ y el Ángulo del pedal $\boldsymbol{\Theta}$. Se aclara que el cero de referencia del ángulo tita ($\boldsymbol{\Theta} = 0$) se encuentra en el punto muerto superior del pedal, respecto al eje de giro de la palanca.

$$M_E = F_E . B_p . sen\theta \quad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

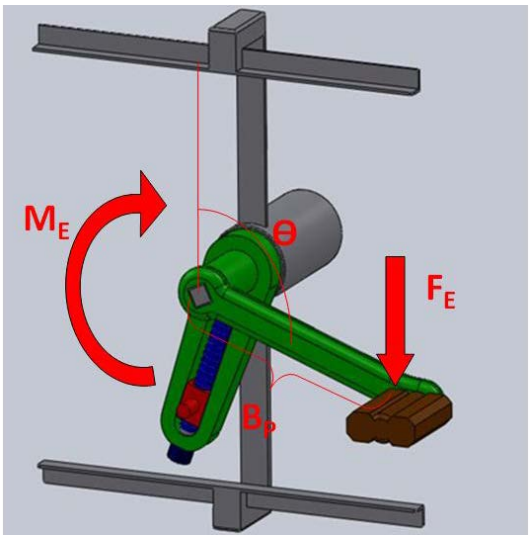


Figura 5: Fuerza y Momento de Entrada.

El momento de entrada $\mathbf{M_E}$ tomado por el eje de la pedalera (6) (ver Figura 5) conecta la fuerza al brazo con pasador móvil, que se encuentra solidario al brazo del pedal a 90º desfasados.

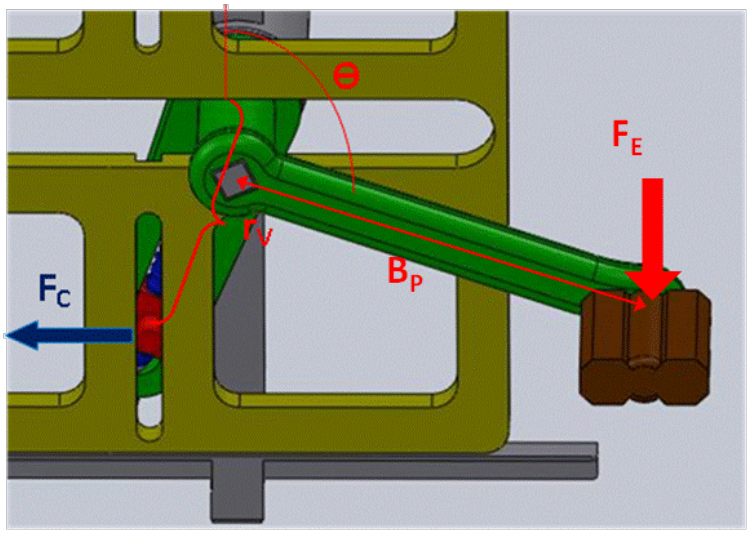


Figura 6: Fuerza transmitida a la corredera.

A continuación se halla la fuerza en la corredera en cruz $\mathbf{F_C}$ que le transmite el pasador móvil, dependiendo del radio en que se encuentre $\mathbf{r_V}$.

$$F_C = \frac{M_E}{r_V} . sen\,\theta \qquad (2)$$

Reemplazando $\mathbf{M_E}$ (ec. 1) en $\mathbf{F_C}$ (ec. 2) queda:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$F_C = \frac{(F_E.B_P.\text{sen}\,\theta)}{r_V}\,sen\,\theta = \frac{F_E.B_P.\text{sen}^2\,\theta}{r_V} \quad (3)$$

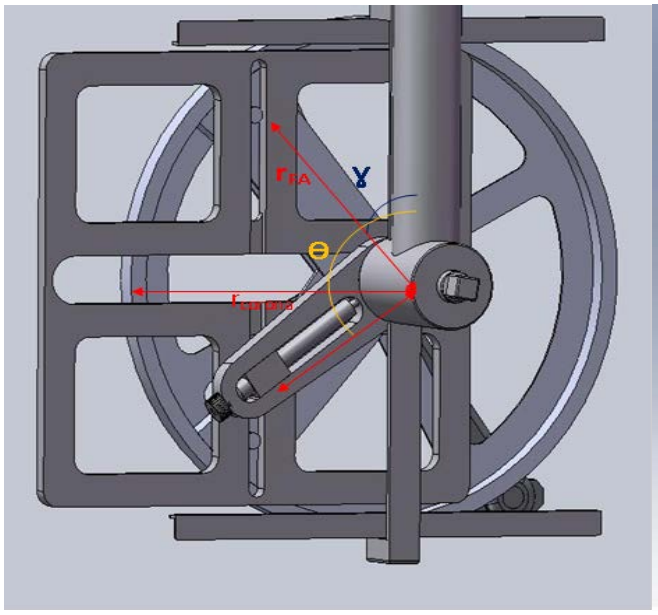


Figura 7: Radios y Ángulos.

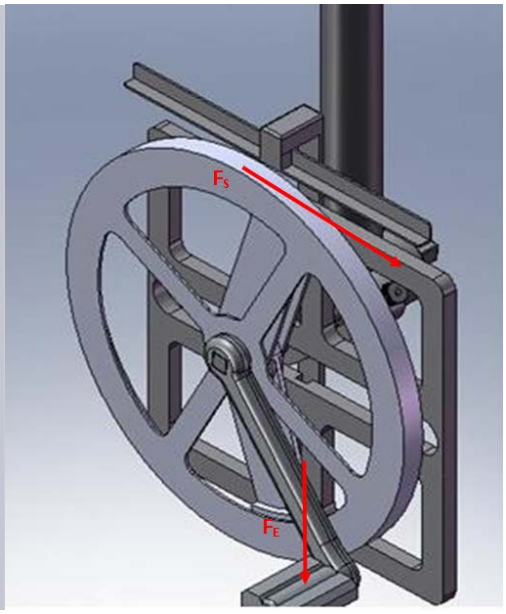


Figura 8: Fuerza de Entrada y de Salida.

La corredera en cruz le imprime movimiento a los brazos de movimiento alternativo a radio fijo, llamado $\mathbf{r_F}$, logrando en tales brazos un Momento llamado $\mathbf{M_B}$. Hay que tener en cuenta que el ángulo **ɣ** de los Brazos de movimiento Alternativo es diferente al ángulo **Θ** que barre el pedal.

$$M_B = F_C.r_F.\cos\gamma \quad (4)$$

La relación que guardan los ángulos **ɣ** y **Θ** se expresa a continuación:

$$r_V.cos\,\theta = r_F.sen\,\gamma \quad (5)$$

Entonces, aplicando la identidad trigonométrica: $sen^2\,\gamma + \cos^2\gamma = 1$

$$sen\,\gamma = \sqrt{1 - cos^2\gamma}$$

Luego, despejando cos ɣ de la Ecuación (5):

$$\left(\frac{r_V.cos\,\theta}{r_F}\right)^2 = 1 - \cos^2\gamma$$

Quedando:

$$\cos\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{r_V.cos\,\theta}{r_F}\right)^2} \quad (6)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Ahora bien, la fuerza de salida $\mathbf{F_S}$ no será otra que el cociente entre el momento del brazo de movimiento alternativo $\mathbf{M_{BA}}$ y el radio medio de la corona.

Entonces:

$$F_S = \frac{M_B}{\bar{r}_{corona}} = F_C . r_P . \sqrt{1 - \left(\frac{r_V}{r_P} . \cos\theta\right)^2}$$

Por último, reemplazando $\mathbf{F_C}$ en la Ecuación (3) y **cos ɣ** en la Ecuación (6) en el momento $\mathbf{M_B}$ de la Ecuación (4) se obtiene la expresión más general del movimiento en estudio.

$$F_S = \frac{B_P . F_E}{\bar{r}_{corona} . r_V} . \sqrt{{r_F}^2 - {r_V}^2 cos^2\theta} . sen^2\theta \qquad (7)$$

En la Ecuación (7) se observa que el movimiento es claramente sinusoidal tornándose nulo en los puntos muertos y siendo máximo cuando las palancas de la pedalera se ubican en posición horizontal. En la Figura 9 se comparan las fuerzas de la CORREDERA y la de SALIDA.

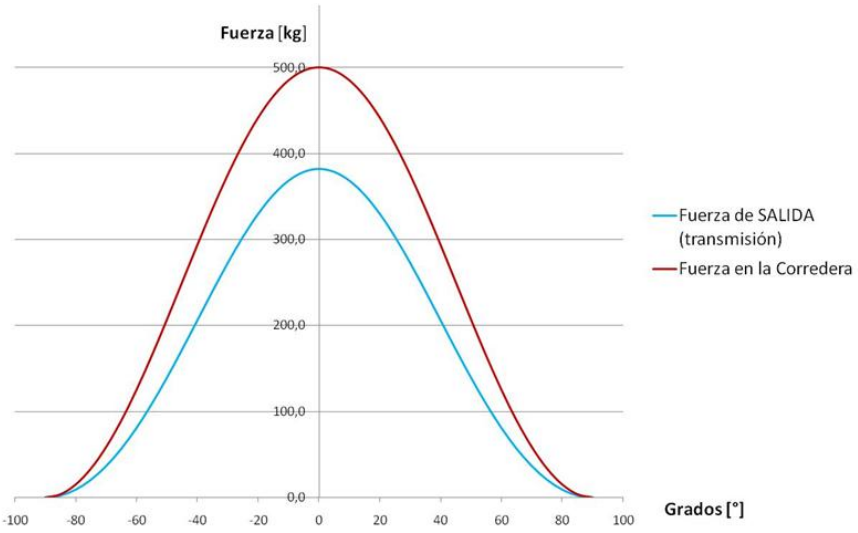


Figura 9: Comparación entre la fuerza de la Corredera y la fuerza de Salida.

6. EVOLUCIÓN DELCONCEPTO

El concepto fue verificado por medio de una simulación computacional tomando como plataforma al programa Solid Works. En ésta etapa se verificó que la cinemática del dispositivo funciona correctamente. Tal resultado condujo a la posibilidad de realizar un salto en el proceso de generación de un producto, validándolo por medio de un prototipo a escala real.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como parte de la evolución del diseño, se introdujo una corona con trinquete para mejorar la tracción en los puntos muertos y se reemplazaron las bieletas de fricción por piñones y cremalleras ubicados en el interior de la corredera, reduciendo así, la fricción y el tamaño del dispositivo

El prototipo fue llevado a la práctica con éxito y se pudo corroborar el funcionamiento del mismo, aunque el sistema de avance del pasador móvil quedó inconcluso.



7. CONCLUSIONES.

El proceso del diseño aquí expuesto me entrenó en la observación y desarrollo de mecanismos, y la primera conclusión es que dicho proceso no concluye nunca. Así mismo, considero que el trabajo, logrado hasta el momento, tiene la suficiente consistencia como para ser exhibido.

El diseño se comportó según lo calculado y por haber sido el primer prototipo cumplió con las expectativas, aunque también es plausible de mejoras. La mejora más relevante está asociada a optimizar las rampas de multiplicación de velocidad, con el fin de mejorar el confort de marcha del ciclista. También hay que terminar el mecanismo de avance y retroceso del pasador móvil

8. REFERENCIAS-

[1] Shigley - Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica, Mc Graw Hill, 1994.
[2] Shigley – Mischke, Elementos de Maquinaria - Mecanismos, Mc Graw Hill, 1995.
[3] David H. Myszka. Máquinas y mecanismos – 3ª edición, Pearson, 2005.
[4] Artur G. Erdman – George N. Sandor. Diseño de Mecanismos - 3ª Edición. Prince Hall. 1998.

9. AGRADECIMIENTOS.

A Carlos Pagliaro, gran colaborador del proyecto; a mi hermana Natalia, musa inspiradora de la idea; y a Mirta Arrébola quien fuera en vida mi madre, guía y protectora de todos mis pasos.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO DE DISPOSITIVO NEUMATICO DE LIBERACION DE CARGA PARA USO MULTIPROPOSITO

Matías Menghini[1], **Seleme Simon**[1]

[1] UIDT – GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería de La Plata
Calle 48 y 116 La Plata. CP 1900.
correo-e: matias.menghini@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo se presenta el diseño de un sistema neumático para liberación de carga para uso multipropósito hasta 1000 Kg. El diseño se plantea en base a la necesidad de realizar una liberación de carga, sin producir esfuerzos laterales y torsionales sobre la misma, para lo cual, partiendo del concepto de un sistema simple y de bajo costo, se empleó un acople hidráulico rápido como punto de partida para el mismo, se diseñó a partir de este, el dispositivo propuesto.

Mediante el uso de software CATIA se diseñó la incorporación de una cámara neumática que produzca la apertura y liberación de la carga retenida, se realizaron simulaciones numéricas para corroborar el estado tensional del dispositivo completo, para luego materializar su construcción y verificación de funcionamiento.

Palabras Claves: *Actuador, Neumática, liberación.*

Área Temática: Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del desarrollo del dispositivo neumático de liberación de carga, es la realización del ensayo LDT Limit Drop Test (HUL 725) para ensayar un tren de aterrizaje de helicóptero, mediante un ensayo de caída libre, desde una altura determinada, con el fin de determinar el factor de carga límite de inercia (FCLI) de acuerdo a lo estipulado. A su vez verificar las condiciones de los elementos elásticos del tren de aterrizaje, luego del LDT, con el fin de evaluar el estado de deformaciones de éstos a fin de cumplir con HUL. 501.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se infiere en la necesidad de un sistema o mecanismo de liberación de carga (Figura1), sin inducir sobre la carga a liberar, esfuerzos de cualquier tipo, principalmente laterales y torsionales, lo cuales modificarían los ángulos de caída, y en consecuencia un resultado erróneo del ensayo planteado.

Por lo expuesto anteriormente se diseñó en base a un sistema de acople rápido hidráulico, el dispositivo propuesto, partiendo del concepto de un sistema simple y de bajo costo.

Mediante el uso de software CATIA se diseñó la incorporación de una cámara neumática para producir la apertura y liberación de la carga retenida. Se realizaron simulaciones numéricas para corroborar el estado tensional del dispositivo completo, para luego materializar su construcción y verificación de funcionamiento.

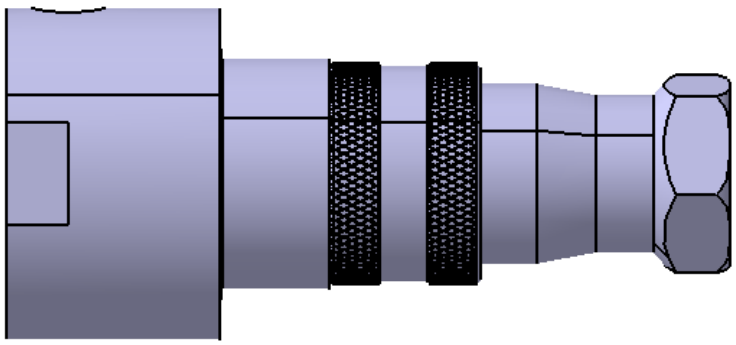


Figura 1: Dispositivo de liberación de carga.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1. Hipótesis de trabajo.

El diseño que se plantea, es una modificación de un acople rápido hidráulico comercial NPT ¼ utilizado en hidráulica, al mismo se le incorpora una cámara neumática, para producir la apertura, mediante la inyección de gas a alta presión, inicialmente se realizaron una serie de ensayos de tracción para verificar la carga máxima de trabajo del acople, para posteriormente rediseñar e incorporar una cámara neumática para poder producir la apertura del mismo.

2.2. Ensayo preliminar de verificación

Inicialmente se procedió a realizar una serie de ensayos de tracción sobre el acople rápido hidráulico comercial NPT ¼ (Figura 2) para verificar las cargas máximas que pude soportar el mismo, sin presentar deformaciones o roturas.
El ensayo se realizó mediante ensayos de tracción a velocidad de desplazamiento constante, en forma incremental, verificando para cada incremento el estado del mismo, hasta llevarlo a la rotura, obteniendo así la carga máxima que puede soportar



Figura 2. Acople Rapido Hidraulico ¼" NPT comercial.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Durante la realizacion del ensayo se observo que hasta los 10.000 N solo se eviedencia pequeñas entallas en la zona de apoyo de las bolillas de cierre, a medida que se incrementa la carga se va haciendo mas evidente las entallas, hasta que a los 17650 N, se rompe el mismo, en la zona de menor espesor, como se puede ver a continuacion en la figura 3.



Figura 3. Rotura de muestra a los 17650N.

2.3. Diseño y simulación

En base a los datos obtenidos en los ensayos, se infiere que el dispositivo se puede utilizar para lo propuesto, ya que para la carga que se lo va a utilizar, no se evidencian roturas, ni trabas en el mecanismo de bolillas, con lo cual se procede al diseño e incorporacion de la camara neumatica para poder procucir la apertura mediante la inyeccion de gas a alta presion (Figura 4).

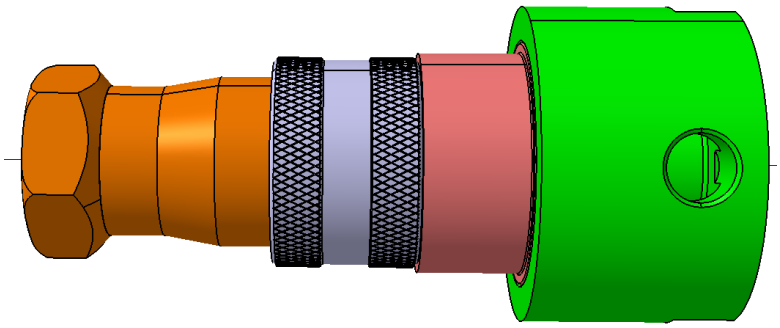


Figura 4. Diseño de la camara neumatica de accionamiento.

Una vez diseñado el dispositivo se procede a la simulación mediante el Software de elementos finitos ABAQUS [3].

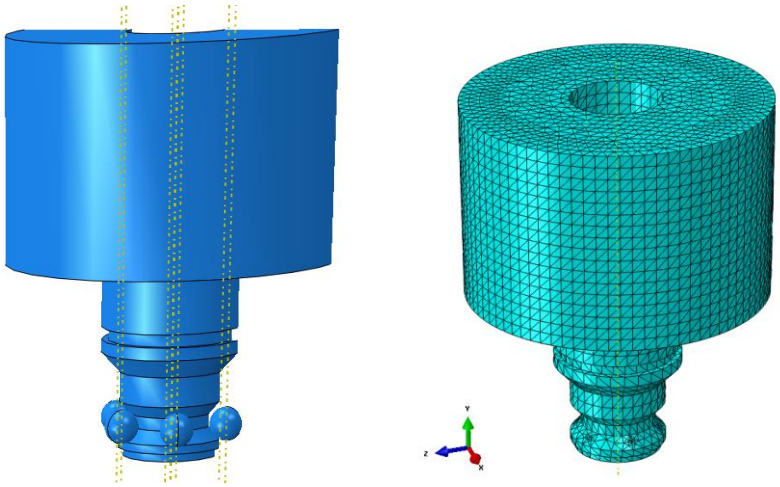


Figura 5. Modelo

Para la realizacion de las simulaciones, se selecciono un acero inoxidable martencitico endurecido por presipitacion, denominado como 17-4Ph del cual se presentan las propiedades :

γ = 7820 Kg/m^3

E = 197 Gpa

v = 0.272

σ_f = 869 Mpa

Al modelo se le aplico una carga de 9810 N en forma puntual, distrubuida en cinco puntos, en las zonas de contacto de las bolillas.

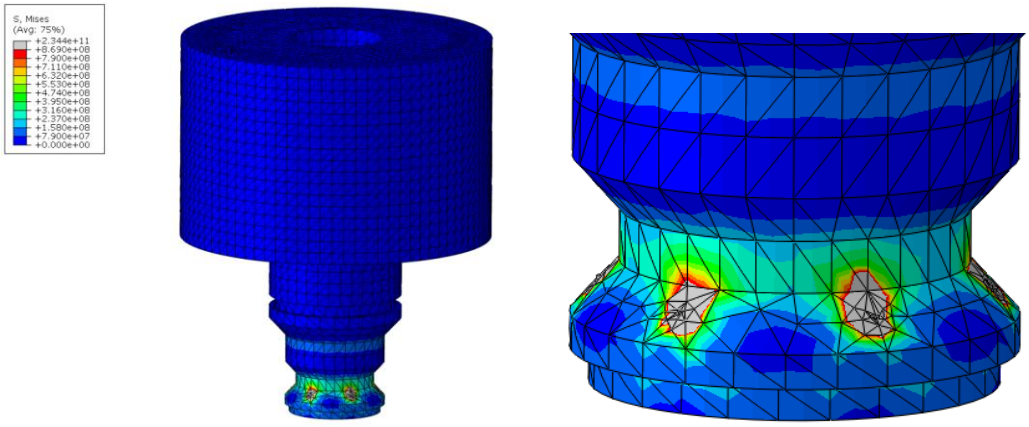


Figura 6. Estado tensional de dispositivo

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. ENSAYO DE PROTOTIPO

Una vez concluida la fabricación del prototipo, se realizaron una serie de ensayos de verificación. Los mismos consistieron en realizar sucesivos ensayos de tracción en forma gradual y verificar el correcto accionamiento y liberación, mediante la inyección de gas a alta presión, la carga máxima a la cual se ensayo fue de 9810 N.

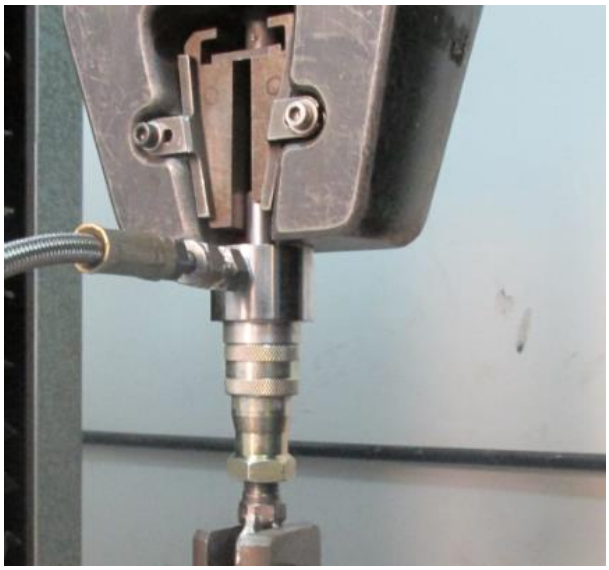


Figura 7. Dispositivo en maquina de ensayo INSTRON

5. CONCLUCIONES

El dispositivo diseñado, construido y ensayado cumple con lo propuesto satisfactoriamente, ya que permite liberar una carga de 1000 Kg, de manera remota, mediante la inyección de gas a alta presión, sin inducir sobre la misma esfuerzos de ningún tipo, durante su apertura.
El próximo paso, es la realización del ensayo LDT Limit Drop Test (HUL 725) sobre el tren de aterrizaje de helicóptero, que fue la finalidad del diseño propuesto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS

[1]. HUL.725–Limit Drop Test.

[2]. HUL.501 – Condiciones sobre las cargas en tierra: tren de aterrizaje con skid.

[3]. Abaqus/CAE user´s manual y Abaqus theory manual (versin 6.7), año 2007

[4]. “El método de los elementos finitos: Las bases” O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor = Editorial CIMNE, 5 Edición, 2004.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Y un amortiguamiento ..(5.2.

BOGIES DE VAGONES DE CARGA DE GRAN PORTE. ANÁLISIS Y DISEÑO.

E. Alvarez[1,2], J. Baeza[2], L.Barutta[2], I. De Paz[2], G. González[1],
G. Lampón[2], C. Rosito[1,3], L. Stefani[2], A. Venditti[2]
[1] CITEDEF, Juan Bautista de Lasalle 4397 Villa Martelli B1603ALO Pcia. Bs. As.
crosito@citedef.gob.ar ealvarez@citedef.gob.ar
[2] Departamento de Ingeniería Mecánica – Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires.
Paseo Colon 850 – CABA. mecanica@fi.uba.ar
[3] Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Km. 2, Ruta 4, Gran Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
Teléfono:011 4282-1471. crosito@citedef.gob.ar

Índice

1. Resumen.
2. Introducción.
3. Par montado
4. Sistema de frenos.
5. Suspensión
6. Estabilizador Lateral (Side bearer)
7. Viga Transversal (Bolster).
8. Viga Lateral
9. Ensayos
10. Conclusiones
11. Referencias y agradecimientos
12. Imágenes
13. Glosario

1. Resumen

Se presenta el diseño de un bogie para vagón de carga de trocha 1676 mm con capacidad portante de 25t/eje y capaz de operar hasta 96 Km/h. Estas prestaciones, no alcanzadas anteriormente en Argentina lo ubican a nivel internacional como un bogie de servicio pesado o "Heavy Haul".
El diseño responde a la configuración "bogie de tres piezas" y se basa en las Normas Argentinas NEFA [1]. Sin embargo, por ser la carga por eje requerida superior a las 22.5 t/eje de estas normas, hemos debido recurrir complementariamente a las normas AAR (Association of American Railroads) [2]. Dado que estas últimas son para 1435 mm de trocha fue necesario un trabajo de adaptación. Se utilizaron además normas Indias y Australianas.
La construcción es de chapa soldada F 26, con distancia entre ejes de 2016 mm. Las ruedas son tipo AAR CP33, que admiten múltiples retorneadas y los conjuntos de rodamientos son de 6"x11".
La suspensión consta de dos conjuntos de resortes AAR D4 que se intercalan entre las vigas laterales y la viga transversal. La amortiguación es del tipo de presión constante y está provista por cuñas de fricción de acero fundido, que rozan contra placas de fricción de acero al manganeso soldadas a los parantes verticales de los laterales del bogie.
En la viga transversal hay un plato de Φ 320 mm en el que apoya el cuerpo del vagón. Los estabilizadores laterales son de contacto permanente [3], con una precarga de 1800 Kg.
Se ha realizado el estudio estructural utilizando el programa NX CAD CAE, lo que permitió analizar los esfuerzos locales y deformaciones, de tal modo que a priori en el aspecto virtual el diseño esta dentro de la normativa impuesta. Se ha construido en Fabrica Militar Rio Tercero un prototipo en proceso de evaluación.

Palabras Claves: *Side Bearer, Bogie, Truck, Freight Car, Heavy Haul.*

REFERENCIAS

[1]. NEFA. *Planos Nefa CNRT http://www.cnrt.gob.ar/planos-nefa*
[2]. AAR. *Manual of Standards and Rec. Practices Section D - Trucks and Truck Details (2010)*
[3]. Darrell I. *Understanding the Benefits of Long Travel Constant Contact Side Bearings*
Proceedings of JRC2006 Joint Rail Conference April 4-6, 2006, Atlanta, GA, USA JRC2006-94050

Área Temática: Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas.

2. Introducción

Este trabajo se origina a partir del requerimiento que efectúa F M (Fabricaciones Militares) a CITEDEF (Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa), para el desarrollo de un Bogie de tres piezas para vagones de carga. Los programas de producción originales han cambiado y al momento se producen algunos vagones que no usan el diseño de bogie de chapa soldada. Por otra parte faltaban al momento de la interrupción del proyecto los ensayos y una revisión de diversos aspectos dimensionales.
Especificaciones Basicas:

- Carga por eje : 25 toneladas.
- Velocidad Máxima: 80 Km/h +20%.
- Tipo constructivo: Bogie de tres piezas de chapa soldada.
- Trocha: ancha argentina (1676 mm).

La construcción de chapa soldada se justifica porque es la tecnología disponible en la fábrica de vagones de FMRT.
La configuración básica del bogie de tres piezas, surgió en Estados Unidos hace más de cien años, y desde entonces ha seguido en constante evolución.
Su nombre se debe a que está formado por tres piezas principales dos laterales que y una viga transversal llamada “mesa” o “Bolster. Los laterales se vinculan con los pares montados (eje y ruedas)”. El Bolster se apoya en los laterales por medio de conjuntos de resortes que constituyen la suspensión principal
Las ventajas principales de este tipo de bogie son: robustez, bajo costo inicial, facilidad de mantenimiento por personal de limitada preparación técnica y posibilidad de utilización en vías en pobre estado de conservación

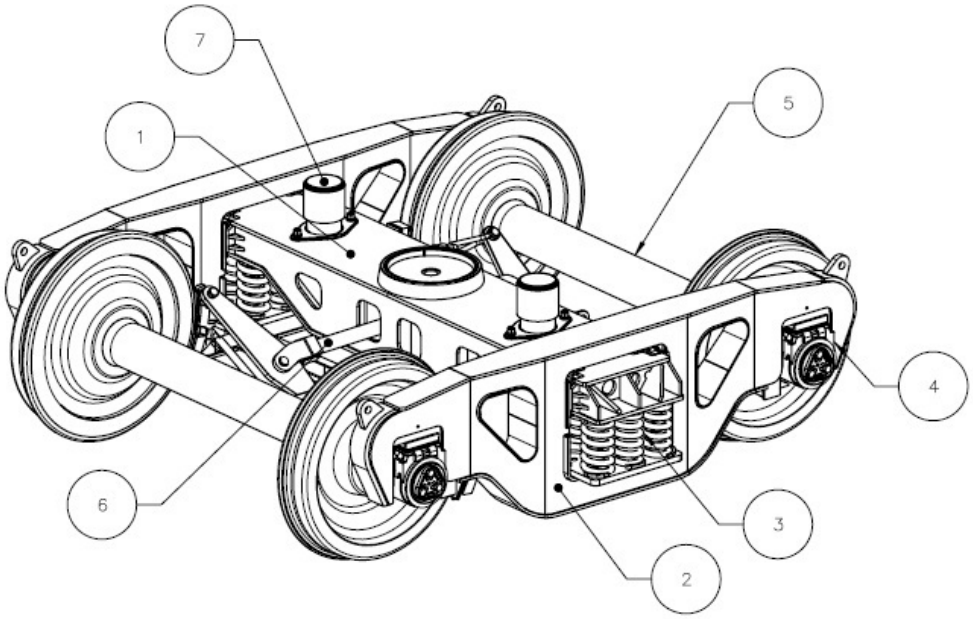


Figura 1: Vista de un bogie de tres piezas.

Para que se destaque lo nuevo del diseño diremos que entra entre los denominados de carga pesada (Heavy Houl). Y que las cargas correspondientes a lo especificado (100 toneladas sobre rieles) solo existen en pocos países y menos aún para carga general.
Por último en esta introducción indicamos la desventaja de los bogies de 3 piezas: La falta de suspensión primaria produce fuertes cargas dinámicas. Como consecuencia el bajo costo inicial puede resultar en alto costo operativo en relación con el mantenimiento de vía y aparatos de cambio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. **Par montado** Se denomina par montado al conjunto compuesto por un eje, dos rodamientos y dos ruedas. El diseño del mismo se encuentra estrictamente normalizado, por lo que nuestra labor principal fue considerar todos los requerimientos del Bogie y aplicarlos a lo establecido en las normas, seleccionando los componentes. Cabe aclarar que todos los elementos del par montado del presente bogie, en la actualidad, son de fabricación extranjera.

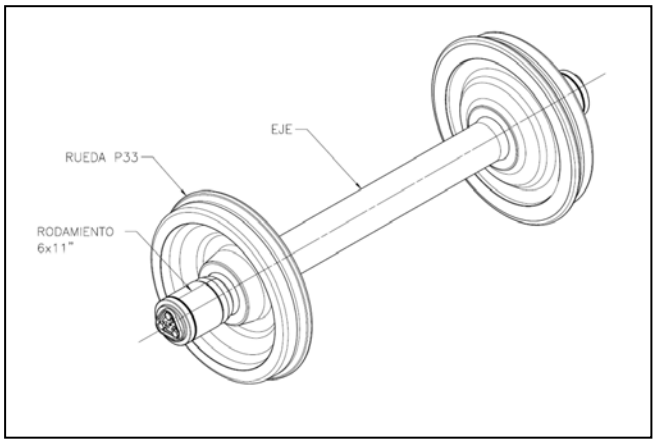


Figura 2 Conjunto Par Montado

El eje se diseñó según el plano NEFA 915 y la norma FAT V700-86 para trocha ancha en grado E, mientras que su resistencia, prestaciones y material de fabricación se verificaron con la norma EN 13103:2009+A2.
Las ruedas son del tipo monoblock de 33'' de diámetro de acuerdo a la norma AAR S-300 para rodamientos de 6 x 11", y cumplen con las especificaciones dadas por la norma AAR M-107 / M-208, de acuerdo a la cual serán del tipo P33. Se utiliza normativa estadounidense pues en estos puntos la argentina no contempla la carga tratada para estos elementos.
El perfil de rodadura corresponde al plano NEFA 706, con posibles modificaciones para adecuarlo al presente bogie, pues se han hallado inconsistencias geométricas en dicho plano.

4. **Sistema de frenos.**

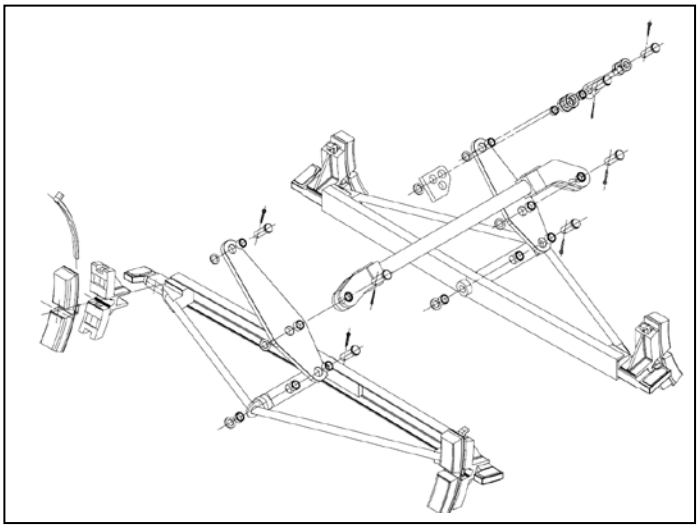


Figura 3.-Timonerìa de frenos en bogie

ISBN: 978-987-1676-63-7

En bogies de tres piezas para vagones de carga, el accionamiento del mecanismo de freno se realiza gracias a un cilindro neumático que mueve un conjunto de barras vinculadas entre sí. Estas últimas forman una cadena cinemática tal que la fuerza saliente del vástago del cilindro se traslada hacia las zapatas de fricción que ejercen una presión sobre el perfil de las ruedas y provocan la acción de frenado.
El diseño del sistema de frenado se llevó a cabo siguiendo la normativa argentina. Las normas utilizadas se presentan a continuación.
La timonería de freno se diseñó según las disposiciones de la especificación FAT V1400-74.
Las zapatas de freno se construirán de acuerdo a la norma IRAM_FA L 13 480 a 492.
El travesaño de freno se diseñó según las disposiciones de la especificación FAT V1300-79.
Los porta zapatas se diseñaron según las disposiciones de la especificación FAT V1415-78.
Los pernos de unión se diseñaron según las disposiciones de la especificación FAT V2012-85.
Las palancas de freno se diseñaron según lo dispuesto por la especificación FAT V2013-79.
Los eslabones de ajuste se diseñaron según las disposiciones de la norma FAT V2021-86.
Las dimensiones de la clavija retenedora se tomaron del plano NEFA 574.
La barra de empuje no respondió a ninguna norma en particular, pues dada la fuerza de frenado aplicada por el cilindro fue necesario hacer un diseño propio, por cuestiones resistenciales.

5. Suspensión

La suspensión de este tipo de bogies consiste de un sistema elástico.(5.1.) y un amortiguamiento ..(5.2). El sistema elástico se compone de dos conjuntos de resortes en los que se apoya en ambos extremos la viga transversal. Los resortes a su vez apoyan sobre las laterales. El amortiguamiento (5.2) se logra mediante rozamiento seco, mediante cuñas que proveen superficies rozantes cargadas en este caso como la parte “b” de la figura 4

5.1 Sistema Elástico

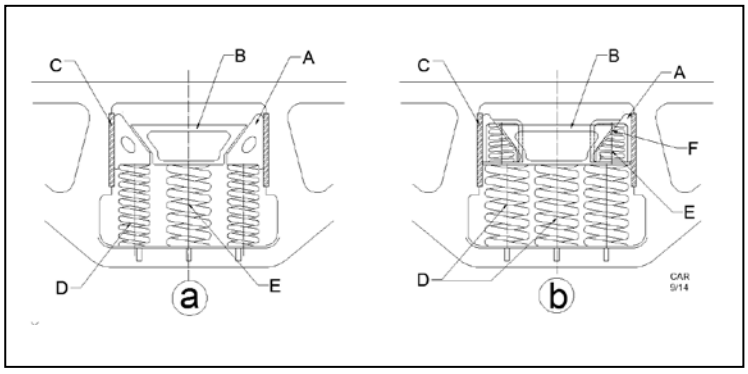


Figura 4: Esquemas de suspensión de bogie de tres piezas.

a) Amortiguador a presión progresiva. A: cuña de fricción. B: Mesa o “bolster”. C: Placa de fricción. D: Resorte de cuña. Aplica una fuerza que se descompone en una fuerza que ayuda a sustentar el bolster y otra horizontal que presiona la cuña contra la placa de fricción y provee el amortiguamiento. La fuerza de fricción depende del estado de carga, dado que depende de la posición del bolster.
E: Resorte de suspensión elástica.
.

b) Amortiguador de presión constante:
A: cuña. B: mesa o “bolster”. C: placa de fricción. D: resortes principales. E: resorte alojado en la cuña. Se apoya en una placa del “bolster” y no contribuye a la sustentación. F: superficies inclinadas de apoyo de la cuña por delante y por detrás del resorte E disponen de una placa de fricción.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La suspensión en este Bogie es se denomina de tipo secundaria. Los resortes del sistema elástico se dimensionan y disponen en función de la capacidad de carga total sobre rieles y del sistema de amortiguación, todo lo cual está contemplado por la normativa. Dado que la capacidad de carga de este bogie no está cubierta en la normativa argentina, debió utilizarse la estadounidense para seleccionar los resortes y su agrupación. Entonces se definió que la suspensión a utilizar constaría de resortes del tipo D4 dimensionados según la norma AAR S-334, dispuestos según la norma AAR S-340 para resortes del tipo D4 y rodamientos 6 x 11''. Cabe aclarar que, tanto los resortes de la suspensión como los del sistema de amortiguamiento, serán de acero SAE 9254, en cumplimiento con las normas AAR M-114, ASTM A-125-96, ASTM A-689 y ASTM A-322.

5.2. Amortiguamiento

Para evitar oscilaciones verticales continuadas y de amplitudes pronunciadas y demás movimientos que pudieren provocar descarrilamiento u operación incorrecta de la formación, estos bogies cuentan con un mecanismo de amortiguación de rozamiento seco, utilizado casi en la totalidad de los bogies de carga del mundo. Básicamente consiste en la disipación de la energía mecánica del movimiento de las masas suspendidas en forma de calor, producido por el trabajo de una fuerza de rozamiento, entre un componente asociado a las masas suspendidas y otro no suspendido.
Como se ve en la figura,4 este sistema consta de una cuña de fricción incluida dentro de una cavidad de la viga transversal y es presionada por un resorte para que roce contra una placa fijada a la viga lateral. La fuerza normal es provista por un resorte interno a la cuña que se halla comprimido y que no cambia su longitud durante la marcha. Las ventajas principales de este tipo de amortiguación radican en la robustez y la simplicidad del mecanismo, características necesarias debido a las cargas y las dimensiones del caso. Como desventaja, el sistema es ruidoso y poco confortable, aunque esto es poco relevante dado que estos bogies son para vagones de cargas como mineral o cereales.
Las cuñas de fricción (figura 5) del sistema de control de marcha cumplen con la dureza especificada por la norma FAT V2024-80, mientras que su diseño se hizo de acuerdo a los requerimientos del presente bogie, no siguiendo ninguna norma en particular.

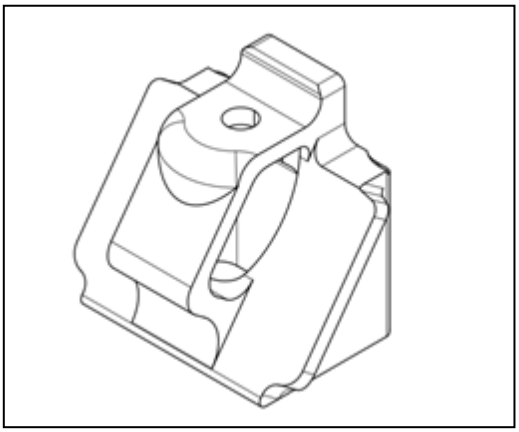


Figura 5 Cuña

En el diseño del resorte de la cuña de fricción se tomó el plano NEFA 517 como referencia para la fuerza y la geometría, pero se hicieron algunas modificaciones, como la utilización de un solo resorte en vez de dos concéntricos y otras de tipo geométrico. Las consideraciones para el diseño fueron:
Cálculo estático no se consideró la fatiga (en funcionamiento varía su carga en valores despreciables). Altura nominal de trabajo = 141,9 mm. Alojado en un agujero de Ø = 68 mm.
Fuerza de aproximadamente 8000 N.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La placa de desgaste, sobre la que roza la cuña y que es solidaria a la viga lateral, es de acero autenítico al manganeso (aceros hadfield) y cumple con lo especificado por la norma FATV1302-84.
Cabe aclarar que se planeó volver sobre el diseño del sistema de amortiguamiento en un futuro, pues se planea hacer modelos matemáticos más complejos y ensayos.

6-Estabilizador Lateral (Side Bearer)

Los estabilizadores laterales, o también llamados Side Bearers, son componentes que se ubican sobre la viga Bolster simétricamente respecto del perno central de la misma, a una distancia normalizada según el plano NEFA 505. En este bogie los estabilizadores son de contacto constante, es decir que siempre están en contacto con el vagón independientemente de la carga. Constan básicamente de un caño con una base de chapa que permite abulonarlo al bolster dentro del cual se hallan dos resortes concéntricos comprimidos, los cuales presionan una tapa de acero para fricción (Hadfield) contra el vagón. Esto representa una innovación puesto que la normativa argentina no contempla este tipo de dispositivos, sino que en ella los estabilizadores son de contacto no permanente. Es por esta razón que para su diseño se debió recurrir a la norma estadounidense M-948, si bien sólo se tomaron algunas de sus recomendaciones, ya que el diseño fue mayormente propio y se adecuó a las necesidades de este bogie.
La función principal de los estabilizadores laterales es transferir cargas verticales provenientes del vagón al Bogie al mismo tiempo que limitar el movimiento de rolido del mismo. Además, mediante la fricción generan momentos restitutivos que reducen las oscilaciones que se producen a alta velocidad, contribuyendo de esta forma a evitar el “hunting”. El hecho de que sean de contacto permanente asegura que las fuerzas y momentos se hallen presentes aun sin carga, lo cual aumenta la seguridad de la marcha.

7- Viga Transversal (Bolster)

La viga transversal, también llamada ‘mesa’ o sólo bolster, es una de las tres piezas principales del Bogie de tres piezas. Estructuralmente hablando, se trata de una viga de apoyada en sus extremos con una carga aplicada fundamentalmente en el centro.
Si bien la geometría del bolster ha sido optimizada a lo largo del tiempo y no difiere mucho de un modelo de bogie a otro, algo novedoso en este proyecto es su construcción de chapa soldada (IRAM F-26), ya que la mayoría de los casos en el mundo son de acero fundido.

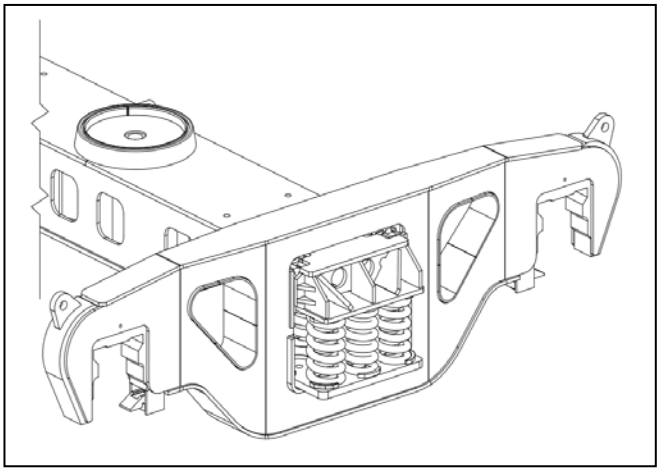


Figura 6 Bolster apoyado sobre resortes sobre lateral

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como se muestra en la figura 6 , el bolster se inserta en sus extremos en las ventanas de los laterales del Bogie y se vincula a estos de dos formas: a través de los resortes de suspensión y a través de las cuñas de fricción.
Las medidas generales de la viga bolster y sus tolerancias cumplen con el plano NEFA 505, a la vez que se toman algunas medidas del plano NEFA 509. Su resistencia y prestaciones están de acuerdo con lo especificado por la norma AAR M-202, pues la normativa argentina se ve excedida.
En el centro de la viga, donde se transfiere la mayor parte de la carga, se hallan estructuras diseñadas para recibir y soportar esta carga. Estas son el plato central, que responde a la norma AAR S-308, y un anillo y un disco de desgaste que cumplen con las normas AAR S-306 y AAR S-307, respectivamente. También en el bolster se ubican los patines laterales de fricción (side bearers), de los que se hablará más adelante.
En los lugares donde apoya el bolster se halla el nido de resortes, que contiene y sujeta a los resortes de la suspensión por su parte superior.

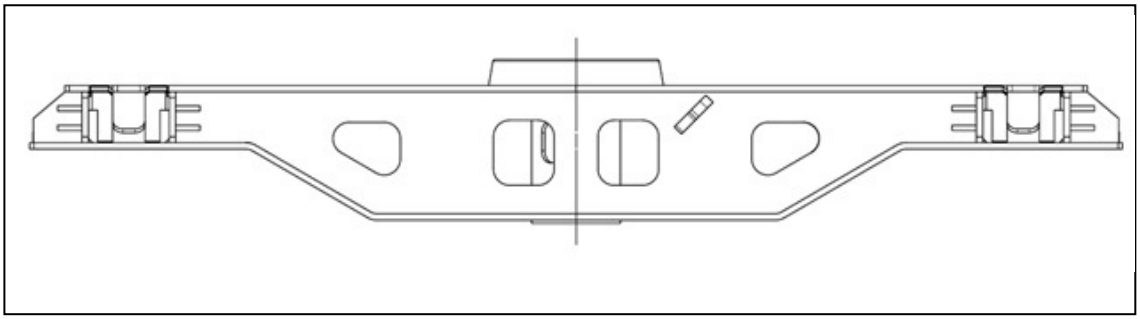


Figura 6 Viga Tranasversal o Bolster

8. Viga Lateral

Cada bogie contiene dos vigas laterales, a las que se les inserta a través de las ventanas el bolster, como se vio anteriormente, las mismas van apoyadas en sus extremos sobre los porta rodamientos correspondientes a los parea montados. La Viga Lateral, o lateral simplemente, se diseñó prácticamente en su totalidad de chapa soldada, con excepción del porta Resbaladera (acero fundido) y la placa anti-desgaste (acero al Mn). Esta viga también suele ser de acero fundido en otros modelos de bogies.

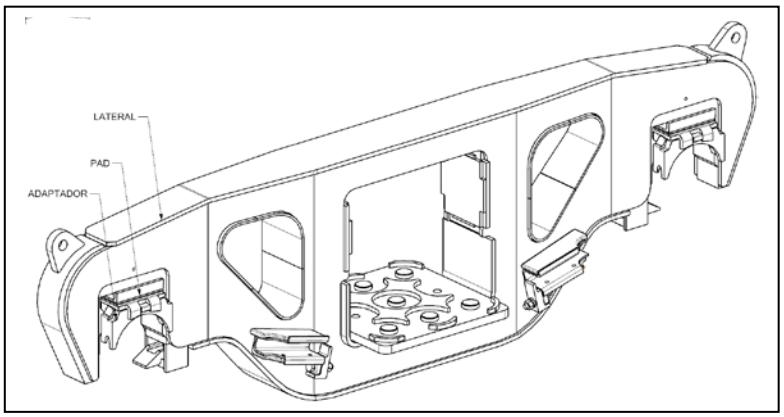


Figura 7 Viga Lateral con Pads, porta rodamientos, guía de resbaladeras y cama de resortes

Las medidas generales de la viga lateral y sus tolerancias cumplen con el plano NEFA 505, aunque también se tomaron algunas medidas del plano NEFA 508. Las resbaladeras se diseñaron según la norma FAT V1419-79 (plano NEFA 353), mientras que para las guías de resbaladera fue necesario recurrir a la norma AAR S-366 por falta de información en la normativa argentina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La resistencia y prestaciones de la viga lateral cumple con lo especificado por la norma AAR M-203, pues la normativa argentina se ve excedida. Las medidas del pedestal no cumplen con ninguna norma en particular, si bien éstas serán tales que se asegurará la concordancia con las del adaptador de los rodamientos, estando este último diseñado de acuerdo a la norma AAR M-924. Cabe aclarar que entre el pedestal y el adaptador se interpone un amortiguador de impactos que a su vez hace de junta que permite pequeños movimientos angulares del eje del par montado.
Este amortiguador es denominado pad o sándwich, está regulado por la misma norma, y contiene dos capas de elastómero entre tres chapas.
Además, para la sujeción de los resortes de suspensión se coloca en el lateral la base de resortes, que contiene al nido de resortes, donde apoyan éstos y son sujetados y contenidos en su parte inferior.

9. Ensayos

9.1. Normativa

Tanto la normativa argentina como la estadounidense indican realizar distintos ensayos sobre los componentes del bogie para asegurar su correcto desempeño en el servicio. Dado que nuestro caso de carga no está contemplado por la normativa argentina, se utilizó la estadounidense en su totalidad para diagramar estos ensayos, tomando de la argentina algunas sugerencias de dispositivos para los mismos. En primer lugar la normativa estadounidense prescribe ensayos estáticos sobre las vigas bolster y lateral. Son en total siete ensayos para la viga bolster y seis para la viga lateral, de los cuales se simularon por elementos finitos los elásticos (tres ensayos de la viga bolster y dos de la viga lateral), siendo el resto de deformación plástica y de rotura, que no se simularon.
Como lugar de ensayo se había elegido el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (LAME-FIUBA). Para llevar a cabo todos los casos de carga se diseñaron todos los dispositivos y estructuras necesarias, que serían trasladados junto con las vigas a ensayar desde la fábrica de Río Tercero (cuatro vigas bolster y tres vigas laterales). La carga máxima a aplicar en estos ensayos es de 284 toneladas.

Tipo de ensayo	Carga Máxima (ton)	Frecuencia Máxima (CPM)
Estático	284	-
Cíclico (fatiga)	109	300

Tabla 1: valores máximos de carga y ciclos para ensayos estáticos y de fatiga.

Por otro lado, la normativa prescribe ensayos cíclicos de fatiga sobre ambas vigas. Estos ensayos requieren equipo de mayor complejidad que los anteriores, pues se debe aplicar cargas de considerable magnitud (hasta 109 ton) a frecuencias que también son altas (300 veces por minuto). En principio no se encontró un lugar en el país capaz de realizar estos ensayos por lo que, de no hallárselo, debería evaluarse la posibilidad de realizarlos en el exterior.

9.2. Modelado y Simulación Mediante Elementos Finitos de ensayos

Tanto el modelado de la viga bolster y la viga lateral como su simulación por medio de los elementos finitos se realizaron con el software NX 8.5. En esta sección no se entrará en los detalles de la simulación, sino que sólo se expondrán las premisas de partida y los resultados.
Lo que se simuló por elementos finitos fueron los ensayos que prescribe la normativa sobre las vigas, con el fin de corroborar que cumplieran con lo estipulado por ella. Es decir, el diseño estructural de las vigas se realizó de forma tal que se cumpliera con las deflexiones admisibles dadas por las normas, y para verificar esto se realizaron las simulaciones por elementos finitos. Mediante estas simulaciones, se optimizó progresivamente la geometría de las vigas para lograr dicho objetivo, además de mejorar los diseños en todo lo que fuera posible.
En todos los casos los resultados fueron satisfactorios, y se muestran a continuación. Cabe aclarar qué solo se simularon los ensayos elásticos de las vigas, pues fueron los que se utilizaron para el diseño estructural de las mismas. Además, también se observaron las tensiones resultantes de las simulaciones, pues si bien no se exige por norma, es importante tenerlas en cuenta para un buen

ISBN: 978-987-1676-63-7

diseño, sobre todo por el hecho de que el bogie estará sometido a cargas dinámicas y a fatiga en su servicio.

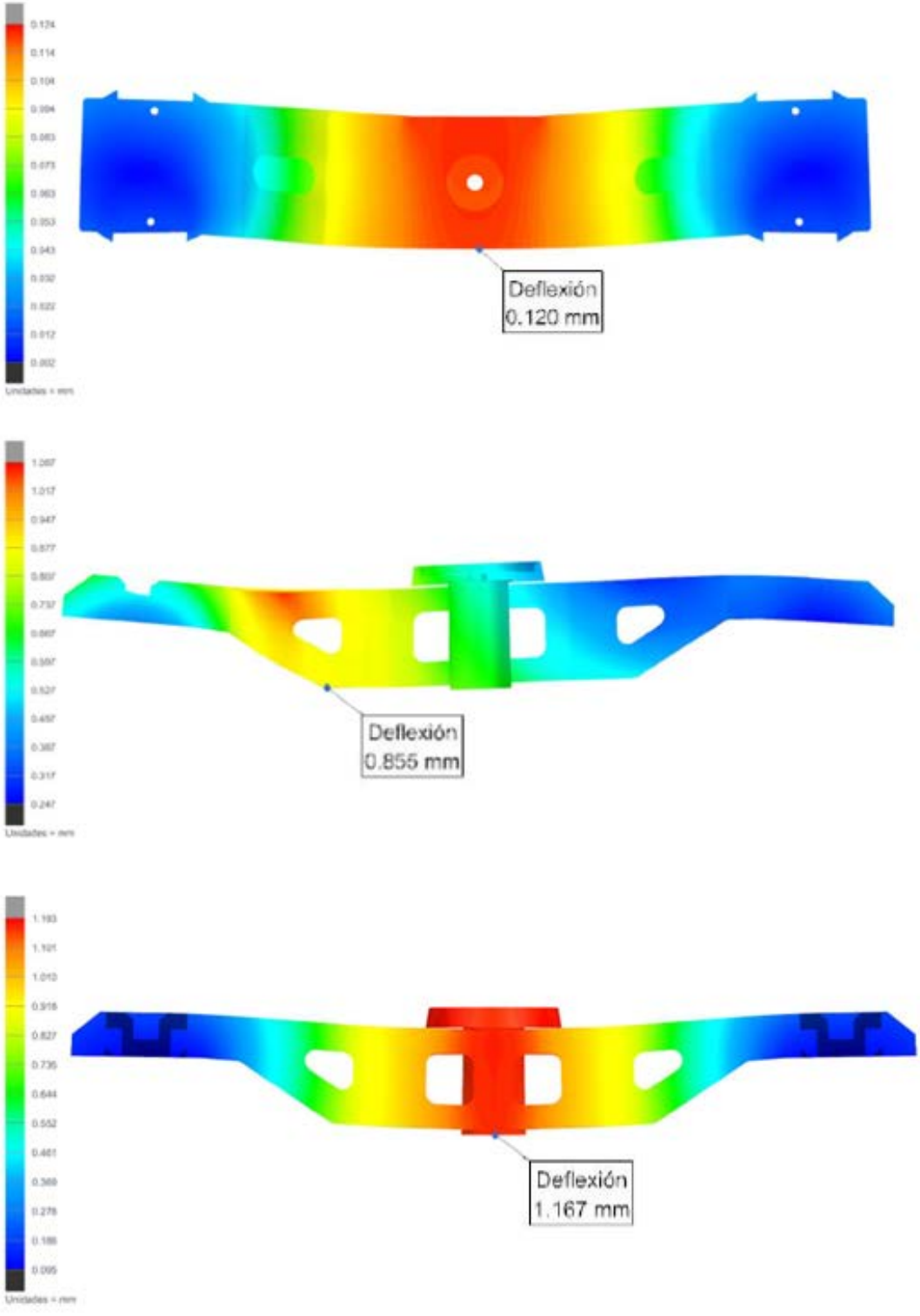


Figura 8 Análisis de deformaciones Viga Bolster. 1 carga lateral. 2 y 3 vertical lateral y centrada

ISBN: 978-987-1676-63-7

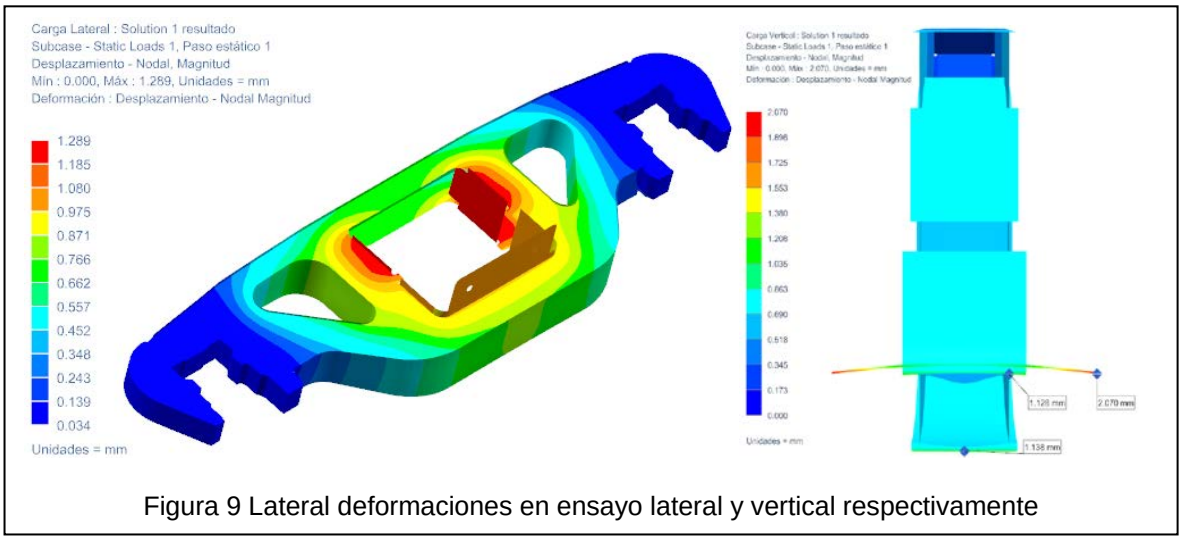


Figura 9 Lateral deformaciones en ensayo lateral y vertical respectivamente

10. Conclusiones :

Analizadas brevemente las necesidades de nuestro país respecto del de transporte de carga ferroviario es clarísima la importancia de invertir en la mejora de la vía y la compra y construcción de vagones de todo tipo.
Queda claro de la experiencia que con una decisión política al respecto se puede volver a fabricar material ferroviario en el país aumentando la ocupación genuina.
La capacidad instalada en la Fábrica Militar de Rio Tercero es un ejemplo de ello.
En aspectos más específicos es necesario volver a tener normativa ferroviaria nacional aun cuando se haya comprado material rodante importado.
Es necesario el desarrollo de proveedores locales de los repuestos consumibles de todo tipo de formaciones.
Se apreció la disponibilidad de una capacidad instalada notoria frente a la decisión de volver a invertir desde el estado en la reconstrucción ferroviaria.
En cuanto al diseño se apreciaron las ventajas de los programas de FEA actuales que permitieron definir en forma precisa la forma de las vigas antes de desarrollar los ensayos reales.

11. Referencias y Agradecimientos

REFERENCIAS

[1]. NEFA. *Planos Nefa CNRT http://www.cnrt.gob.ar/planos-nefa*
[2]. AAR. *Manual of Standards and Rec. Practices Section D - Trucks and Truck Details (2010)*
[3]. Darrell I. *Understanding the Benefits of Long Travel Constant Contact Side Bearings*
Proceedings of JRC2006 Joint Rail Conference April 4-6, 2006, Atlanta, GA, USA JRC2006-94050
Se agradece la participación en calidad de aporte desinteresado de ingenieros de la FIUBA Y DE FM tanto central como FMRT.
Se agradece la colaboración prestada por todas las instancias de CITEDEF al grupo de tesistas de FIUBA para que pudieran lograr un efectivo éxito en el diseño del Bogie FM.

12. Glosario

Bolster **:**	*Viga transversal en Bogie de 3 Piezas*
Pad:	*Apoyo de los porta rodamientos tal que permite leves ángulos laterales y cierta elasticidad Vertical, en general si tiene elastómero aislante debe tener una conexión de descarga eléctrica.*
Freight Truck	*Vagón de carga.*
Pedestal :	*Parte del bogie que soporta los rodamientos a traves del adaptador.*
FEA	*Análisis por el Método de los elementos Finitos*

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN AMORTIGUADOR DE FRICCION EMPLEANDO UN MODELO DE ORDEN REDUCIDO

Walter B. Castelló [1] **y Miguel E. Ruiz** [1]

[1] Departamento de Estructuras. Facultad de C. E. F y N. Universidad Nacional de Córdoba
Tel.: 0351-4334145, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.
e-mail: walter.castello@unc.edu.ar

RESUMEN

En los últimos años el transporte ferroviario se ha visto en la necesidad de emplear formaciones más largas, con más peso y en algunos casos con mayor velocidad. Bajo estas condiciones es necesario conocer adecuadamente el comportamiento de los paragolpes de fricción de los vagones, como uno de los elementos fundamentales en la seguridad de las formaciones. Modelar y predecir el comportamiento de estos dispositivos permite además entender otros aspectos ligados a su utilización como la dinámica longitudinal del tren y la fatiga de algunos componentes del material rodante. En este sentido, se destaca que las normas ferroviarias nacionales (FAT) son bastante estrictas en cuanto a las relaciones fuerza-desplazamiento admisibles, y a los niveles de energía que debe disipar el amortiguador en un ciclo de carga-descarga.

En este trabajo se presenta un modelo de orden reducido que describe el comportamiento de un amortiguador de fricción. Obtener un modelo matemático preciso para estos dispositivos resulta bastante difícil, en especial debido a la pobre previsibilidad, la repetitividad y la discontinuidad que presenta la fricción en el amortiguador. El modelo propuesto ha sido sintonizado empleando mediciones de ensayos de laboratorio, los cuales fueron realizados en un prototipo de amortiguador de fricción en condiciones de carga cuasi-estáticas.

Se ha observado que los resultados obtenidos a partir del modelo matemático concuerdan con los experimentales, en particular cuando se considera una ley de fricción exponencial. A partir de los resultados obtenidos con este modelo se han propuesto modificaciones al prototipo de amortiguador de fricción con el objeto de satisfacer los requerimientos reglamentarios de las normas FAT que aplican a estos casos.

Palabras Claves: *vehículos ferroviarios, amortiguador de fricción, modelo de orden reducido*

1. INTRODUCCIÓN

Los amortiguadores y paragolpes más usados en los vehículos ferroviarios están asociados a sistemas con cuñas de fricción. Un amortiguador de fricción es un conjunto de resortes, cuñas y placas que trabajan dentro de una caja. Estos elementos cumplen dos roles: como parte de la vinculación entre vagones transmiten fuerzas longitudinales, y como amortiguadores disminuyen las cargas longitudinales del tren [1]. Las combinaciones de cuña-resorte se emplean también en el sistema de control de marcha en bogies con distintos fines, como por ejemplo mejorar la estabilidad dinámica lateral del vehículo [2].

Modelar y predecir el comportamiento de estos amortiguadores permite además entender otros aspectos ligados a su utilización, como la dinámica longitudinal del tren [3] y [4], o bien el análisis de fatiga de algunos componentes del material rodante [5]. Una revisión de los modelos analíticos empleados en el estudio de los acoples y paragolpes de fricción puede encontrarse en [6]. Las normas ferroviarias argentinas [7] son bastante estrictas en cuanto a las relaciones fuerza-desplazamiento admisibles, y a los niveles de energía que debe disipar el amortiguador en un ciclo de carga-descarga, por lo que el conocimiento de los mecanismos resistentes involucrados en el funcionamiento de estos elementos es de gran importancia en su diseño y análisis.

En este trabajo se presenta un modelo de orden reducido que permite predecir el comportamiento de un amortiguador de fricción siguiendo los lineamientos de [8]. Obtener un modelo matemático preciso para estos dispositivos resulta bastante difícil, en especial debido a la pobre previsibilidad, la repetitividad y la discontinuidad que presenta la fricción en el amortiguador. Los parámetros de ajuste más relevantes en el modelo de análisis que se ha implementado resultan ser: la rigidez de los resortes, el ángulo de las cuñas, y el rozamiento entre las piezas. Este modelo se ha sintonizado a partir de una serie de ensayos experimentales en amortiguadores de fricción en condiciones de carga cuasi-estáticas.

El contenido de este trabajo se resume a continuación. En la Sección 2 se presentan dos modelos de orden reducido, uno puramente elástico y otro considerando el sistema completo resorte-cuña de fricción. La Sección 3 muestra los resultados obtenidos con los modelos analíticos propuestos, y se los compara con los resultados experimentales. Además una vez ajustado el modelo analítico con los datos experimentales, se proponen las modificaciones necesarias para que el amortiguador cumpla con los requisitos normativos. Por último en la Sección 4 se presenta un compendio de las conclusiones de este trabajo.

2. MODELO DE ORDEN REDUCIDO

La Figura 1 presenta un corte esquemático del amortiguador de fricción estudiado en este trabajo. El amortiguador está formado por una caja o cuerpo cilíndrico que aloja un conjunto de

ISBN: 978-987-1676-63-7

resortes y un grupo de piezas en forma de cuña, estos elementos son que desarrollan fricción entre sí cuando el plato de carga hace contacto con otro vehículo. En la Figura 1 se observan tres resortes: (a) resorte exterior, (b) resorte interior, y (c) resorte antagónico; el resorte exterior y el interior dominan el comportamiento elástico del amortiguador. Por otra parte el resorte antagónico regula la rigidez de todo el conjunto, aumentado la rigidez del amortiguador cuando la guía de resortes se desplaza y hace tope en la cuña central.

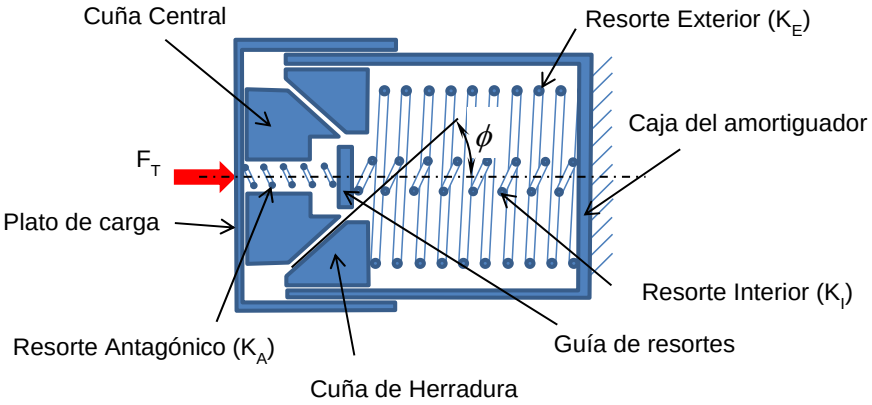


Figura 1: Corte esquemático de un amortiguador de fricción

Los elementos de fricción, según se observan en la Figura 1, son: (a) la cuña central y (b) las cuñas principales o de herradura. La cuña central es habitualmente un cuerpo troncocónico con seis o más facetas planas, que forman un ángulo ϕ con el eje longitudinal del amortiguador y están igualmente distribuidas circunferencialmente. La cuña principal o de herradura es un cuerpo segmentado con un alojamiento troncocónico construida en tres o más partes (igualmente distribuidas en la dirección circunferencial), y cada una de estas partes tiene dos facetas que hacen contacto con la cuña central. Durante el funcionamiento del amortiguador, la cuña de herradura evidencia fricción con la cuña central, y dado que es una pieza segmentada se abre generando fricción también con la caja del amortiguador.

En la Figura 2 se muestran los esquemas de análisis y los diagramas de cuerpo libre en las cuñas de fricción con las cargas provenientes de los resortes. En primer lugar se estudiará el comportamiento de los resortes actuando solos, y posteriormente se introducirán las ecuaciones para un sistema cuña-resorte siguiendo el esquema de análisis propuesto en la referencia [8].

2.1. Modelo elástico sin fricción

En primer lugar se estudia el comportamiento de los resortes actuando solos, bajo la hipótesis que las cuñas están adheridas y no pueden desarrollar fricción entre sí. En este caso y bajo las condiciones mencionadas el amortiguador presenta un comportamiento puramente elástico. Es decir que en principio las ecuaciones del modelo reológico elástico corresponden sistema de resortes combinado serie-paralelo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

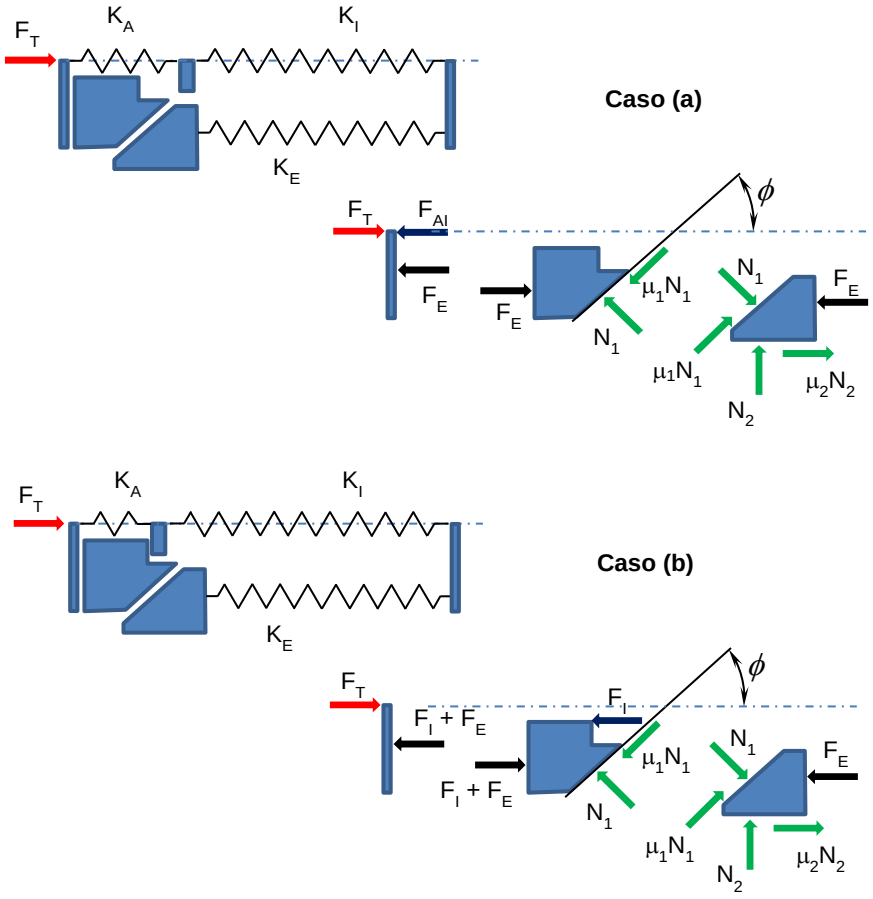


Figura 2: Esquemas de análisis y diagramas de cuerpo libre

La Figura 2 muestra que el resorte antagónico (K_A) y el interior (K_I) trabajan en serie, y a la vez ambos trabajan en paralelo con el resorte exterior (K_E). Entonces mientras la guía de resortes no alcance el tope de la cuña central – Caso (a) – la Ecuación (1) representará el comportamiento elástico del amortiguador.

$$F_T^1 = F_E + F_{AI} = K_E \cdot u + K_{AI} \cdot u = \left(K_E + \frac{K_I \cdot K_A}{K_I + K_A} \right) \cdot u \qquad (1)$$

Cuando la guía de resortes desarrolla su máxima carrera y alcanza la cuña central ($F^1_{AI_{limite}}$), el comportamiento elástico del amortiguador queda definido por los resortes exterior e interior que trabajan en paralelo – Caso (b) –. Es decir que la Ecuación (2) gobernará el comportamiento elástico del amortiguador.

$$F_T^2 = F^1_{AI_{limite}} + \left(F_E + F_I \right) = F^1_{AI_{limite}} + \left(K_E \cdot u + K_I \cdot u \right) = F^1_{AI_{limite}} + \left(K_E + K_I \right) \cdot u \qquad (2)$$

En las Ecuaciones (1) y (2) los parámetros K_E, K_I y K_A son las rigideces de los resortes exterior, interior y antagónico, respectivamente. En este sistema además de la carrera del amortiguador,

ISBN: 978-987-1676-63-7

es necesario establecer la distancia entre la guía de resortes y el asiento en la cuña central para poder predecir el cambio de comportamiento elástico.

2.2. Modelo de un sistema cuña-resorte

En la referencia [8] se estudia un sistema de cuña-resorte simple (ambos elementos en serie), y a partir del equilibrio de fuerzas de ese sistema se llega a la Ecuación (3).

$$F_T = \frac{F_S\left(\mu_1 \cos\phi + \sin\phi\right)}{\left[\left(\mu_1 - \mu_2\right)\cos\phi + \left(1 + \mu_1\mu_2\right)\sin\phi\right]} \tag{3}$$

Los parámetros que definen la carga desarrollada por el amortiguador (F_T), en la Ecuación (3), son: la fuerza proveniente del resorte (F_S), el ángulo de la cuña (ϕ) y la fricción entre cuñas y la pared de la caja (μ_1 y μ_2).

Considerando que el rozamiento entre las partes del amortiguador es el mismo (μ_1=μ_2= μ) y que el desplazamiento del amortiguador es tal que la fricción se encuentra completamente desarrollada o saturada, la Ecuación (3) se puede reescribir de forma más simple como se observa en la Ecuación (4).

$$F_T = \frac{F_S \tan\phi}{\left[\tan\phi + \text{sign}(\mu)\right]} \tag{4}$$

La expresión sign(μ) en la Ecuación (4) hace referencia al signo de la fricción, según sea en proceso de carga del amortiguador (negativo) o de descarga del amortiguador (positivo).

La Ecuación (4) describe de forma simplificada el comportamiento de un amortiguador de fricción, y permite establecer de manera clara la interacción de los parámetros de diseño en el comportamiento del amortiguador como se discute a partir de la Figura 3.

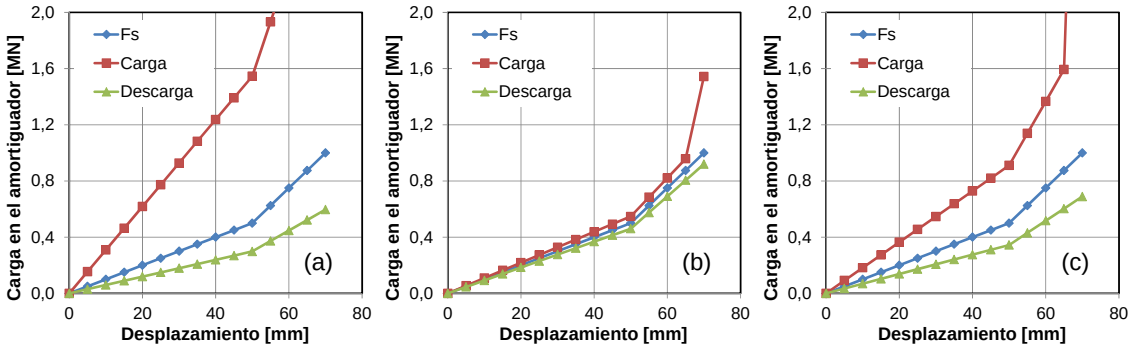


Figura 3: Respuesta de un amortiguador de fricción. (a) Condiciones normales. (b) Incremento del ángulo ϕ. (c) Disminución de la fricción entre cuñas μ.

La Figura 3-a muestra el comportamiento típico de carga y descarga de un sistema cuña-resorte simple. En todas estas figuras F_S representa la carga del resorte sobre la cuña de fricción. La

Figura 3-b y Figura 3-c presentan la incidencia del ángulo de la cuña ϕ y del rozamiento μ entre las cuñas y paredes de la caja, respectivamente. Un incremento en el ángulo de la cuña, produce una disminución de la amplitud entre las curvas de carga y descarga. Por ende el ángulo de la cuña puede manipularse para aumentar o disminuir el ciclo de histéresis. Además, disminuir el coeficiente de rozamiento conlleva disminuir la curva de carga, y por lo tanto el rozamiento permite modificar la trayectoria de la curva de carga para ajustar el modelo a los datos experimentales.

A partir de la Ecuación (4), considerando el equilibrio de fuerzas en los componentes del amortiguador (Figura 2) y el comportamiento del sistema de resortes de la Sección 3.1, se pueden obtener las expresiones que definen la evolución de la carga en el amortiguador de fricción que se estudia en este trabajo. La Ecuación (5) es la expresión que describe el proceso de carga del amortiguador, mientras que la Ecuación (6) representa el comportamiento de descarga del amortiguador.

$$F_T = \frac{F_E \tan\phi}{[\tan\phi - \mu]} + F_C \tag{5}$$

$$F_T = \frac{F_E \tan\phi}{[\tan\phi + \mu]} + F_C \tag{6}$$

En las Ecuaciones (5) y (6), la carga sobre la cuña de fricción está dada por la fuerza del resorte exterior $F_E = K_E\, u$, y por otra parte la carga elástica F_C se calcula como: (a) $F_C = F_{AI} = K_{AI}\, u$, en el caso de que la guía de resortes no haya alcanzado la cuña central (ver Ecuación (1)), y (b) $F_C = F_{AI}^{lim} + F_I = F_{AI}^{lim} + K_I\, u$, en el caso que la guía de resortes este haciendo tope sobre la cuña central (F_{AI}^{lim} es la fuerza en el resorte antagónico cuando la guía hace tope en la cuña central). Teniendo en cuenta todo esto, el rango completo de funcionamiento del amortiguador muestra cuatro zonas bien diferenciadas: carga y descarga, y dentro de cada una de estas: con y sin tope de la guía de los resortes antagónico-interno.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos: (a) para el modelo elástico sin fricción propuesto en la Sección 2.1, y (b) para el modelo elástico con fricción introducido en la Sección 2.2. Los resultados obtenidos se comparan con ensayos experimentales llevados a cabo en el Laboratorio de Estructuras (UNC) realizados sobre amortiguadores de fricción con una prensa AMSLER de 500t. Por último se proponen algunas modificaciones a los parámetros del amortiguador a fin de enmarcar el comportamiento del mismo dentro de lo solicitado en [7].

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1. Modelo elástico

La Tabla 1 muestra las rigideces medidas por el fabricante de los resortes, y que se han empleado en este trabajo para el modelo de amortiguador puramente elástico definido por las Ecuaciones (1) y (2). El modelo de resortes ha sido analizado para dos casos particulares: 1) con precarga nula en el conjunto de resortes, y 2) con una precarga en los resortes que está asociada al ensamble de la caja y el plato de carga del amortiguador.

Tabla 1: Rigidez de los resortes en el amortiguador

RESORTE	RIGIDEZ [kN/m]
Exterior (K_E)	71.12
Interior (K_I)	1107.55
Antagónico (K_A)	66.71

La Figura 4 muestra que los resultados obtenidos con el modelo elástico, brindan muy buena correlación con los resultados experimentales sobre un amortiguador al que se le reemplazaron las cuñas de fricción por un bloque rígido.

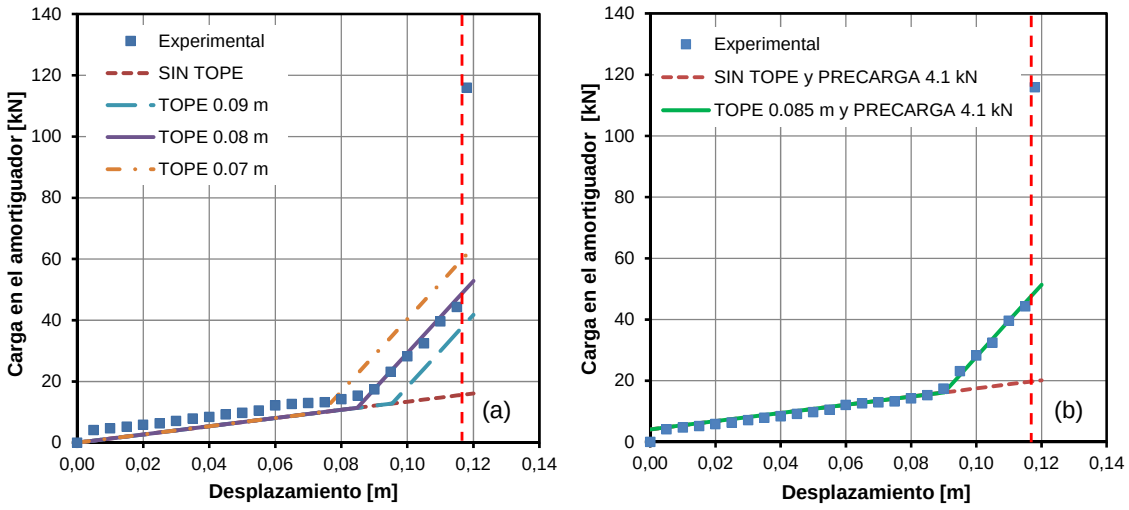


Figura 4: Resultados del modelo de resortes y comparación con resultados experimentales

Los resultados de la Figura 4-a no consideran la precarga sobre los resortes, y se han analizado diferentes carreras de la guía de resortes hasta que la misma alcanza la cuña central. Se observa que el tope de carrera de la guía de resortes tiene influencia sobre la carga máxima que se puede obtener del amortiguador. La línea roja de trazos vertical representa la carrera total del amortiguador (límite físico), cuando la caja alcanza la pared interior del plato de carga (115 mm aproximadamente). Por este motivo el último punto del ensayo de carga muestra un incremento de 44 kN a 120 kN.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por otra parte, la Figura 4-b muestra que cuando se considera la precarga de cierre en el ensamble y una carrera para la guía de resortes de 85 mm, el modelo puramente elástico desarrollado en este trabajo se comporta de forma similar al amortiguador ensayado.

3.2. Modelo con la cuña de fricción

A partir de los resultados satisfactorios del modelo puramente elástico mostrados en el apartado anterior, se procedió a estudiar el modelo analítico del sistema cuña-resorte completo. La Figura 5-a muestra los resultados experimentales sobre un amortiguador de fricción, y se los compara con los resultados del modelo analítico (para un ángulo de cuña $\phi = 35°$) en dos condiciones: (a) fricción constante, y (b) fricción variable. Se observa gráficamente que el esquema de fricción variable permite ajustar adecuadamente los resultados experimentales.

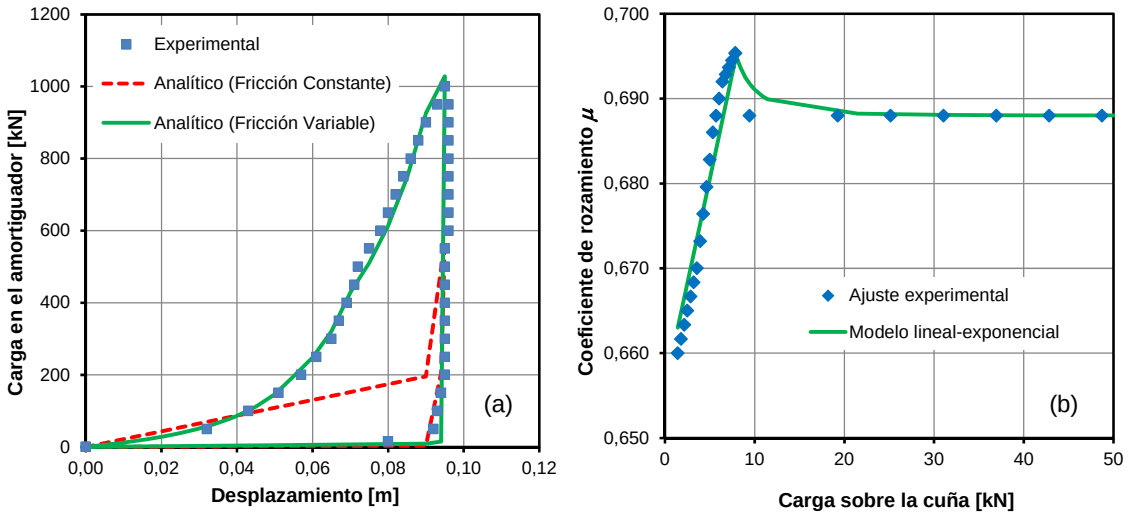


Figura 5: Ensayo sobre el amortiguador de fricción, resultados del modelo analítico y comportamiento del coeficiente de fricción en función de la carga en la cuña.

Se observa sin embargo que las cargas medidas experimentalmente a 40 mm y 60 mm de desplazamiento del amortiguador son superiores a lo que solicita la norma (según la norma [7] deberían estar comprendidas en 86 kN y 248 kN, respectivamente). Este inconveniente se debe a que la cuña recibe demasiada carga durante este periodo de desplazamiento, y básicamente está asociado a dos aspectos: 1) los resortes (en especial el exterior) presentan una rigidez superior a la necesaria, y 2) el ángulo de fricción en las cuñas es menor al necesario.

Como ya se ha mencionado la fricción es el parámetro más difícil de controlar, sobre todo es bastante difícil lograr repetitividad en el comportamiento friccional de estos amortiguadores. Por lo tanto en este trabajo el análisis de la fricción entre cuñas se hizo en función de: (a) la variación en el desplazamiento mostrado por el amortiguador, y (b) el cambio de la carga sobre la cuña. Estos datos se obtuvieron del modelo matemático ajustado experimentalmente (ver Figura 5-a). Luego, para lograr una independencia en general de aquellos casos donde cambie

significativamente la carrera del amortiguador, se eligió emplear la variación de la fricción en función de la carga sobre la cuña. La Figura 5-b muestra cómo cambia el coeficiente de rozamiento con la carga. Este esquema de variación lineal-exponencial es uno de los más empleados de en la mecánica de fricción de acuerdo a la referencia [6]. Es decir se observa que hay un crecimiento desde un mínimo (0.663) hasta alcanzar un máximo estático (0.695), y posteriormente decae y se hace asintótico a un valor dinámico (0.688) cuando hay deslizamiento entre los cuerpos.

3.3. Modificaciones al amortiguador de fricción

En función de los resultados del modelo analítico propuesto, se observa que es necesario realizar algunas modificaciones a los parámetros del amortiguador de fricción (para enmarcarlo dentro de la norma FAT). Los cambios pueden agruparse en modificaciones : (a) la configuración geométrica, (b) la rigidez de los resortes, y (c) en el ángulo de las cuñas.

3.3.1. Configuración geométrica

En principio resulta necesario incrementar la carrera máxima del amortiguador, esto implica modificar la construcción interna del conjunto sin alterar las carreras actuales de los resortes (ej.: suplementar la base de la cuña central 15 mm, y quitar esa distancia de la caja del amortiguador). Y además modificar el punto donde cambia el comportamiento de los resortes, lo cual resulta de disminuir la carrera de la guía de resortes (ej.: la carrera de la guía debe ser de 62-67 mm).

3.3.2. Rigidez de los resortes

Es necesario modificar la rigidez de los resortes, ver Tabla 2, pero teniéndose especial cuidado de mantener las longitudes y la carrera máxima que los mismos tienen actualmente.

Tabla 2: Modificaciones a las rigideces de los resortes en el amortiguador

RESORTE	RIGIDEZ ORIGINAL [kN/m]	RIGIDEZ MODIFICADA [kN/m]
Exterior (K_E)	71.12	58.86
Interior (K_I)	1107.55	1422.45
Antagónico (K_A)	66.71	49.05

3.3.3. Ángulos de cuñas

El ángulo entre la cuña de herradura y la cuña central debe incrementarse, con el objetivo de alcanzar 37.7° (en el amortiguador de fricción ensayado este ángulo es de 35°). Este parámetro usualmente es un promedio de los ángulos de las cuñas de herradura, dado que a veces suelen

ISBN: 978-987-1676-63-7

emplearse cuñas con distintos ángulos para tener una participación progresiva de las cuñas a lo largo de la carrera del amortiguador de fricción.

3.4. Comportamiento del amortiguador con parámetros modificados

A partir de las modificaciones propuestas en los subapartados anteriores y empleando un coeficiente de rozamiento constante de μ = 0.681 (promedio del observado en la Figura 5-b), se ha evaluado el modelo analítico obteniendo la respuesta que se presenta en la Figura 6.

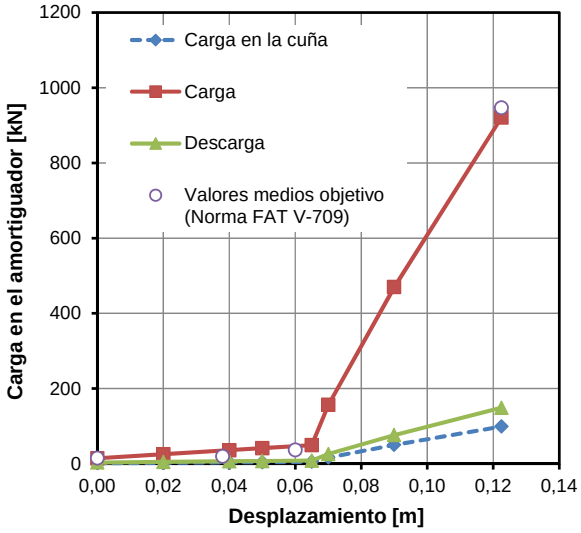


Figura 6: Predicción del modelo analítico a partir de los cambios propuestos

Siendo uno de los objetivos cumplir con las exigencias de la norma, en la Figura 6 se presentan los valores medios solicitados en [7]. Adoptar valores medios para evaluar la respuesta del modelo analítico, brinda un margen para contemplar las diferencias que existirán respecto de los resultados experimentales. Además con estas modificaciones el trabajo entregado al amortiguador es We = 34.5 kN m (aproximadamente 3200 kgf m > 1700 kgf m, requerido por la norma [7]) y la capacidad Wc = 26.3 kN m (aproximadamente2680 kgf m y mayor a 0.5 We, como lo solicita la norma [7]). Como se observa, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, y por ende las modificaciones propuestas resultan adecuadas al menos desde el punto de vista analítico.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un modelo de orden reducido para estudiar amortiguadores de fricción de aplicación ferroviaria. El modelo de estudio propuesto brinda resultados muy adecuados cuando se emplea junto a un esquema de fricción variable del tipo lineal-exponencial. Sin embargo en la predicción de las modificaciones del amortiguador se adoptó

ISBN: 978-987-1676-63-7

fricción constante (empleando los datos disponibles), puesto que no es posible predecir el comportamiento de la fricción en función de la carga sin ensayos adicionales.

Se observa a partir de las modificaciones, que la respuesta del amortiguador se ajusta al requerimiento de la norma tanto en relación a los requisitos de carga-desplazamiento como en relación a la capacidad de carga y el trabajo desarrollado por el amortiguador.

Respecto de la precarga, para cumplir la norma es necesario aumentar la longitud inicial de los resortes. Los resultados aquí expuestos deberán confirmarse y, eventualmente, ajustarse a partir de un ensayo sobre un prototipo que incorpore las modificaciones indicadas.

5. REFERENCIAS

[1] Wu, Q., Spiryagin, M. y Cole, C. *A dynamic model of friction draft gear*. Proceedings of the ASME 2014 Int. Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference, Buffalo (New York, USA). August 17-20, 2014.

[2] Wu, Q., Cole, C., Spiryagin, M. y Sun Y.Q. A review of dynamics modelling of friction wedge suspensions. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 52, 11, 1389-1415, 2014.

[3] Kaufhold, H., Jarvis, D. y Steffen, J. *The effects of free and controlled slack, car weight, length, articulated joints, and preload draft gear on longitudinal train forces*. Rail Transportation: Winter Meeting of the American Society of Mechanical Engineers; Atlanta (GA): American Society of Mechanical Engineers, pg.11-20, December 1-6 1991.

[4] Kovalev, R., Sakalo, A., Yazykov, V., Shamdani, A., Bowey, R. y Wakeling, C. *Simulation of longitudinal dynamics of a freight train operating through a car dumper*. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 54, 6, 707-722, 2016.

[5] Cole, C. y Sun, Y.Q. *Simulated comparisons of wagon coupler systems in heavy haul trains*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 220, 3, 247-256, 2006.

[6] Wu, Q., Cole, C., Luo, S. y Spiryagin, M. *A review of dynamics modelling of friction draft gear*. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 52, 6, 733-758, 2014.

[7] FAT- V709. *Paragolpes normalizados a fricción trochas 1676 y 1435 mm, características técnicas, utilización en vagones*. C.N.R.T. Septiembre 1990.

[8] Iwnicki, S. (Ed.). *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (Florida, USA), 2006.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS INFORMATICAS PARA EL DISEÑO DE MAQUINA TRASPLANTADORA HORTÍCOLA PARA MÚLTIPLES ESPECIES

Alejandro Fabbro, Walter Soto, Héctor Martín, Iván Snaider, Federico Lorenzón Cian, Onofre Pereson, Nicolas Martin Gutbrod y Mauricio Cian.

GRUDIM - Facultad Regional Reconquista de la UTN. Calle 44 nº 1000, (3560) Reconquista, Santa Fe, Argentina.
correo-e: afabbro_487@hotmail.com, waltersoto2007@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo resulta ser una continuación de lo presentado en el CAIM 2014 [1], en el cual se había diseñado una máquina de ensayos para la pinza de trasplante. Se describe aquí el proceso de diseño del dispositivo mecánico completo destinado a realizar la tarea del trasplante en el contexto de la producción hortícola en mediana escala. La principal característica de diseño del dispositivo es su adaptabilidad a varios plantines de diferentes especies.
Como herramientas de asistencia al diseño se hace un fuerte hincapié en el uso del Software de CAD/CAE paramétrico “Autodesk Inventor” y software de cálculo como “Excel” y “Wólfram Mathematica”.
Lo novedoso es la forma en que se han podido enlazar estos programas de manera que, a nivel informático, el diseño y cálculo resultan estar completamente vinculados.
Otra contribución interesante del trabajo es mostrar las simulaciones numéricas orientadas al estudio de la cinemática y la dinámica de las cadenas de cuerpo rígidos que conforman el mecanismo.
Como resultado de esta combinación de estudios analíticos, modelado 3D y simulaciones numéricas se logró el desarrollo de un prototipo virtual de la máquina trasplantadora, el que permite realizar múltiples verificaciones de la máquina antes de construirla.

Palabras Claves: *Diseño, Trasplantadora Hortícola, Modelado 3D, Simulación Dinámica, Software de CAD/CAE.*

1. INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo se describe el proceso de diseño y desarrollo de un modelo único e innovador de una máquina destinada a realizar la tarea del trasplante en la producción hortícola. Esta máquina presenta un alto grado de innovación en lo que respecta a la versatilidad o adaptabilidad de este tipo de implementos a varias especies de plantas hortícolas.

Se muestran aquí los resultados de tareas de investigación y desarrollo iniciado en el año 2012 como proyecto PID homologado por el rectorado de la Universidad Tecnológica Nacional y llevado adelante por el grupo de investigación GRUDIM de la Facultad Regional Reconquista.

Una característica muy particular de este proyecto es que las condiciones de contexto productivo, social y económico donde estará inmerso el implemento a diseñar, afectan y varían las condiciones mecánicas tanto constructivas como funcionales del sistema mecánico.

Además del diseño del dispositivo mecánico en sí, se pretende también mostrar la potencialidad y del uso de diferentes software informáticos para la asistencia en el diseño de dispositivos mecánicos. En este proyecto se utilizaron los programas Autodesk Inventor, Wolfram Mathematica y Microsoft Excel.

Se puede ver en la Figura 1, algunas vistas generales del diseño del dispositivo planteado.

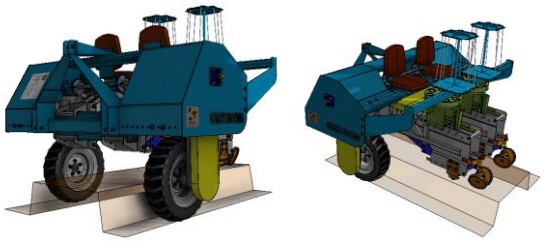


Figura 1: Vistas Generales del Dispositivo Diseñado

2. MARCO CONTEXTUAL

El contexto general en el que estará inmersa la máquina diseñada es la agricultura y dentro del cúmulo de producciones agropecuarias que existen, esta máquina estará inmersa en la producción hortícola. Este contexto posee muchas particularidades tanto en sus aspectos agronómicos como en su aspecto socio-económico.

2.1. Características generales de la horticultura

La producción hortícola es en sí un contexto productivo y socio-económico muy distinto a las otras producciones agropecuarias. La primera diferencia que se debe tener en cuenta es en las

extensiones o áreas de terreno que se manejan, en este sentido se clasifican a las producciones hortícolas de la siguiente manera: Pequeña escala o familiares: menos de ½ hectárea, Mediana escala: entre ½ hectárea y 5 hectáreas y Gran escala o extensivas.

Además, la producción hortícola no está mecanizada en el grado en el que lo está la agricultura. Es por esto que actualmente se requiere mucha mano de obra para realizar las labores necesarias. Se puede decir que actualmente para producir 3 a 4 hectáreas de horticultura se necesitan entre 5 y 8 personas para las labores.

2.2. Necesidad de mecanización de la tarea del trasplante

Se debe tener en cuenta que es muy variable el personal requerido en una huerta para poder realizar las actividades en el tiempo necesario para que no se afecte la productividad. Así, por ejemplo, al realizar la labor del trasplante el productor necesita mucha cantidad de mano de obra, pero en un corto lapso de tiempo, ya que se deben trasplantar los plantines lo antes posible para que no se afecte la productividad.

Estos picos de demanda de mano de obra de la horticultura (sobre todo para las actividades de trasplante y cosecha), hacen que sea imposible que un productor mantenga su rentabilidad empleando a todo el personal durante todo el año. Es por esto que este tipo de contextos productivos exigen una mecanización de sus tareas.

3. DESCRIPCION GENERAL DEL DISPOSITIVO DISEÑADO

Se describe, en forma conceptual, el sistema mecánico de trasplante diseñado. El dispositivo constará de pinzas de trasplante que interaccionan con el suelo imitando la técnica manual de plantado. Un conjunto de mecanismos es el encargado de darle movimiento a estas pinzas para permitir así que se realice el trasplante en forma cíclica, manteniendo el avance continuo de la máquina en la dirección de la línea de plantación.

3.1. Imitación de la técnica manual del trasplante mediante pinzas

La técnica manual del trasplante se compone de 5 pasos básicos.

- Paso1: el operario introduce su mano en el terreno labrado con una leve inclinación con respecto a la vertical.
- Paso 2: el operario inclina la mano introducida en el terreno hacia el otro lado con respecto a la vertical.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Paso 3: Los dos movimientos anteriores dejan un hoyo en el suelo labrado donde se introduce el plantín.
- Paso 4: se procede a acercar la tierra con los dedos al lugar donde se encuentra el plantín.
- Paso 5: se compacta la tierra circundante al plantín.



Figura 2: Pasos del proceso de trasplante manual.

El dispositivo mecánico diseñado imita la técnica manual del trasplante mediante el uso de pinzas de trasplante como se ve en la Figura 3.

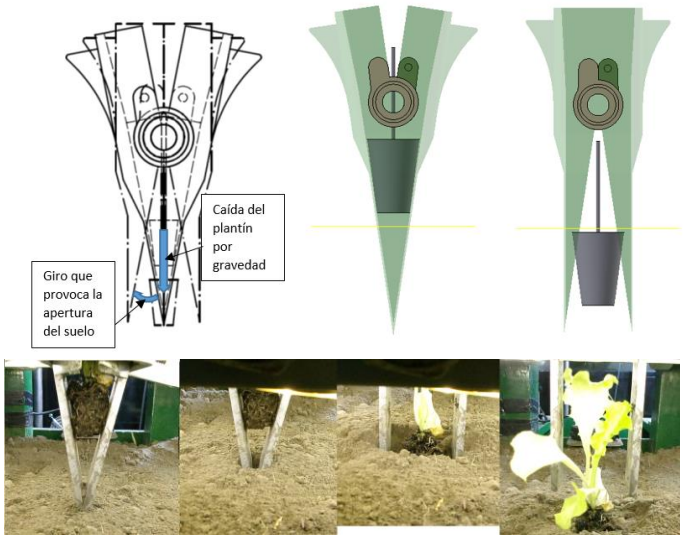


Figura 3: Proceso de trasplante mecánico

El diseño de estas pinzas de trasplante es el resultado de un proceso de ensayos experimentales que permitieron determinar su geometría, véase [1].

3.2. El cuerpo de trasplante

El cuerpo de trasplante es la parte del sistema que se encarga de darle el movimiento necesario a la pinza para que ésta trasplante en forma adecuada y la máquina avance continuamente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

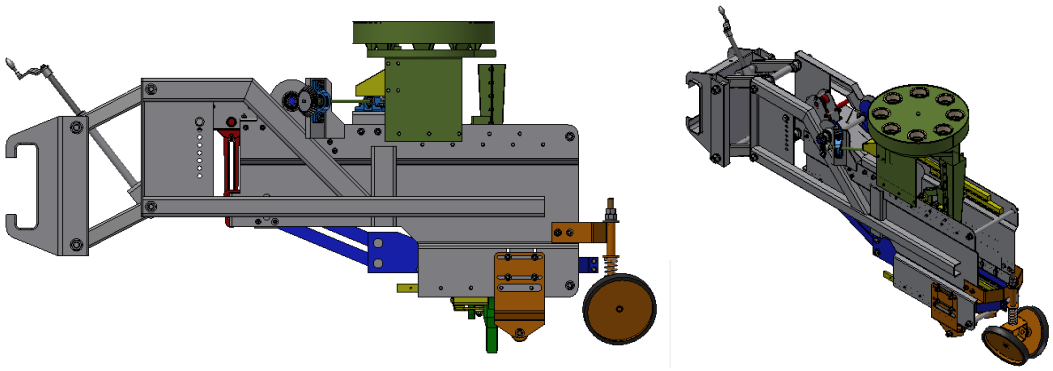


Figura 4: Vista general del cuerpo de trasplante

Este cuerpo de trasplante (Figura 4) es la parte central de la maquina trasplantadora. Se compone de 3 mecanismos básicos. Por un lado, el mecanismo de traslación horizontal de pinza (Figura 5), por otra parte, el mecanismo de traslación vertical de pinza (Figura 6) y por último el mecanismo de apertura de pinza una vez que la pinza ha ingresado en el suelo (Figura 7).

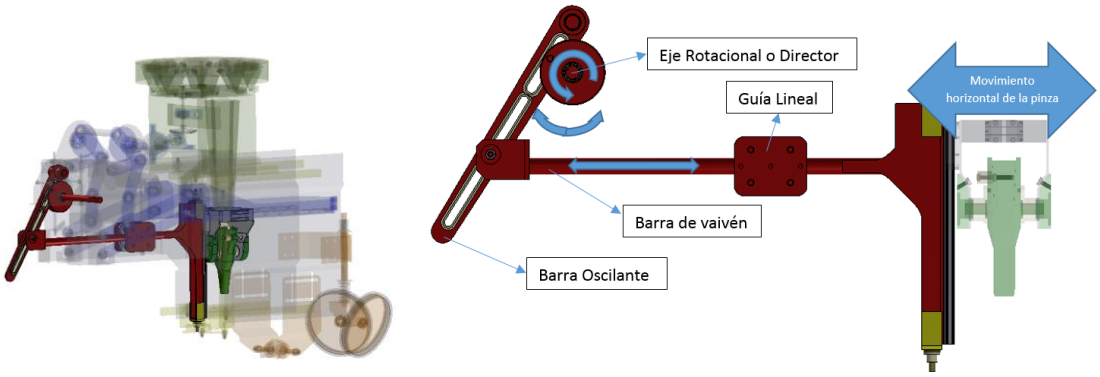


Figura 5: Mecanismo de traslación horizontal de pinza.

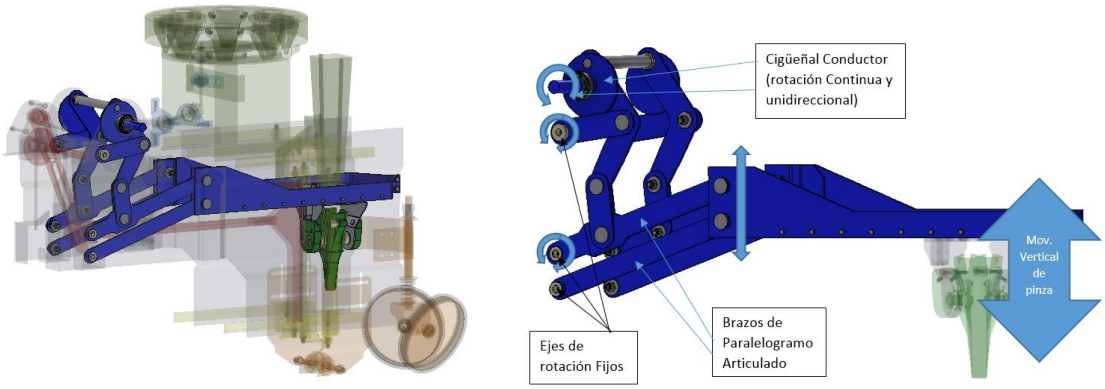


Figura 6: Mecanismo de traslación vertical de pinza

ISBN: 978-987-1676-63-7

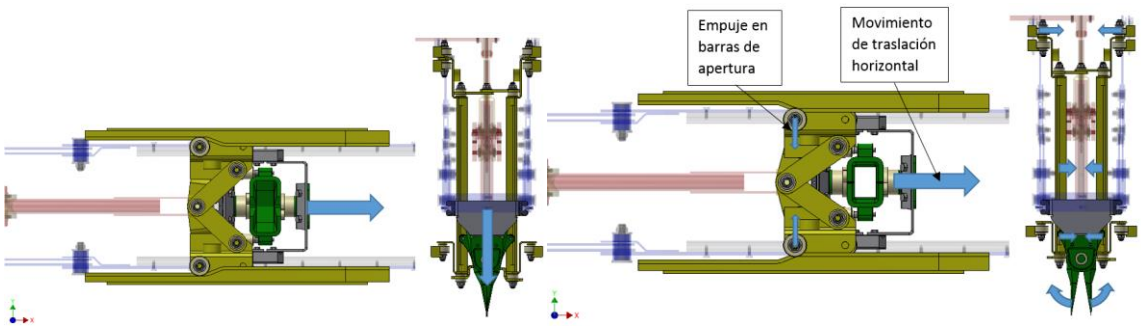


Figura 7: Mecanismo de apertura de pinza

4. ANALISIS DE LOS MECANISMOS

En el diseño de esta máquina se usaron los software mencionados para el análisis cinemático y dinámico de los mecanismos. Debido a la limitada extensión del trabajo se presenta aquí en detalle la simulación de la cinemática del mecanismo de traslación horizontal, comentando en forma sintética las demás simulaciones y análisis realizados.

4.1. Análisis cinemático del mecanismo de traslación horizontal de pinza

Si se observa la Figura 8, se puede ver que el movimiento de vaivén de la pinza en la dirección del eje x del sistema de referencia debe lograr que, mientras que la pinza entra y sale del suelo, no exista deslizamiento relativo entre la pinza y el suelo.

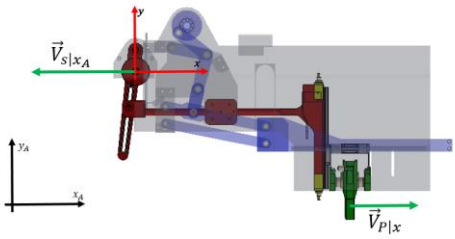


Figura 8: Movimientos relativos en cuerpo de trasplante

Si se analiza la cinemática del proceso de trasplante desde esta perspectiva (centrando la atención en el movimiento horizontal). Para que no exista un deslizamiento relativo entre la pinza y el suelo cuando ésta está entrando y saliendo de él, se debe cumplir que lo siguiente:

$$|\vec{V}_{s|x_A}| = |\vec{V}_{P|x}| = V_s \ (con\ las\ direcciones\ mostradas\ en\ el\ grafico) \quad (1)$$

Para analizar este mecanismo y diseñarlo de tal manera que se cumpla la restricción anterior, primero se hizo una abstracción dimensional del mismo considerando sus dimensiones geométricas principales. Esto puede verse en la Figura 9.

ISBN: 978-987-1676-63-7

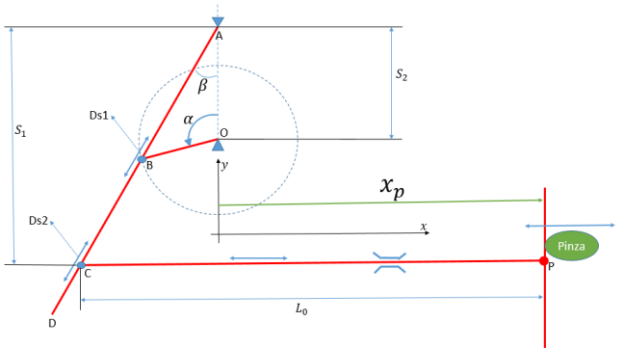


Figura 9: Abstracción dimensional del mecanismo de traslación horizontal

En base a estas dimensiones se puede deducir que la ecuacion de posicion de la pinza (Punto P) en función al tiempo será:

$$x_p(t) = L_0 - \frac{S_1 * R * Sen(\frac{2\pi * V_s}{D_p} * t)}{S_2 - R * Cos(\frac{2\pi * V_s}{D_p} * t)} \quad (2)$$

Luego, si derivamos esta ecuación con respecto del tiempo obtenemos la velocidad de la pinza en función al tiempo.

$$V_{p|x}(t) = -\frac{S_1 * R * \frac{2\pi * V_s}{D_p} * Cos\left(\frac{2\pi * V_s}{D_p} * t\right)}{S_2 - R * Cos\left(\frac{2\pi * V_s}{D_p} * t\right)} + \frac{S_1 * R^2 * \frac{2\pi * V_s}{D_p} * \left(Sin\left(\frac{2\pi * V_s}{D_p} * t\right)\right)^2}{\left(S_2 - R * Cos\left(\frac{2\pi * V_s}{D_p} * t\right)\right)^2} \quad (3)$$

Para obtener esta velocidad y sus gráficos se usó el software Wólfram Mathemática. Luego de obtenida esta ecuación se graficó la misma para valores arbitrarios de los parámetros geométricos. Obteniendo lo que se ve en la Figura 10.

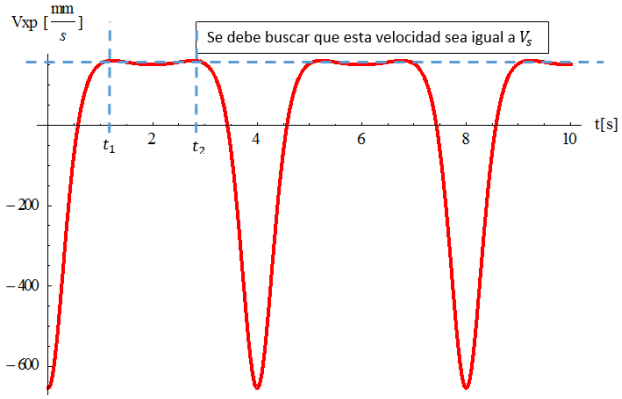


Figura 10: Velocidad horizontal de la pinza en función al tiempo

En base a la grafica se puede ver que hay un lapso de tiempo en el que la velocidad de la pinza es practicamente constante. Lo que se realizo con el software wolfram matehematica, al ver esto, es

restringir a las ecuaciones de velocidad-tiempo para que la velocidad de la pinza sea igual a la del piso en este lapso. De esta manera se determinó, con estas ecuaciones de restriccion, las dimensiones de las barras del mecanismo. Luego las dimensiones se exportaron como parametros numericos a un archivo de Excel y desde allí se utilizaron para modelar el mecanismo en forma paramétrica en Autodesk Inventor. Luego se realizó una simulación numérica de la cinematica del mecanismo. Logrando los mismos resultados que se habían obtenido analíticamente para las velocidades. Se puede ver en la Figura 11 la simulacion numerica de la cinematica del mecanismo.

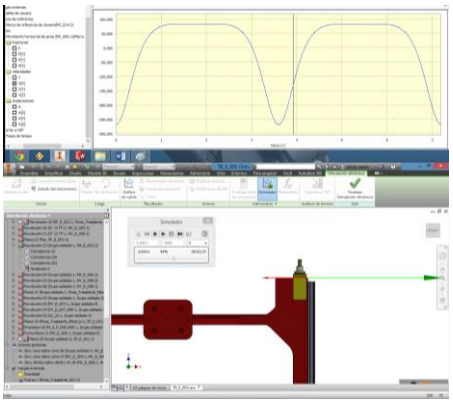


Figura 11: Simulación Cinemática del mecanismo de traslación horizontal

4.2. Análisis de mecanismo de Traslación Vertical

Para analizar este mecanismo, se lo modelo en Autodesk inventror y se obtuvo, mediante una simulacion numerica de su cinematica, la funcion de la altura y_p de la pinza en función al tiempo (ver Figura 12).

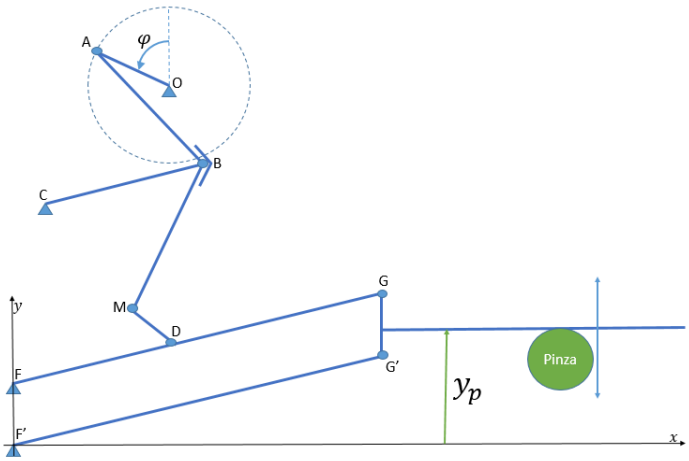


Figura 12: Abstracción dimensional del mecanismo de traslación vertical de pinza

Esta simulación arrojó como resultado la siguiente grafica de movimiento.

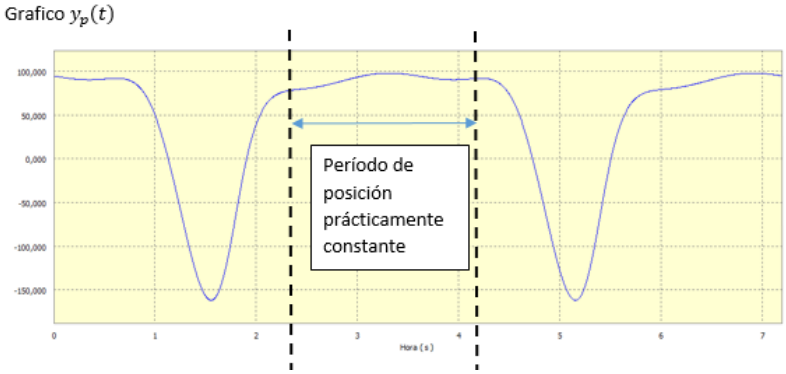


Figura 13: Movimiento vertical de la pinza.

Lo que nos dice que este es un movimiento intermitente, donde la pinza baja y sube y luego permanece quieta en su posición en el eje y. Por cuestiones de extensión admitida en el informe no se detalla en mayor grado el análisis de este mecanismo.

4.3. Sincronización de los mecanismos

Luego mediante el uso de simulaciones simultaneas de los dos mecanismos, se sincronizó el giro de los mismos de tal manera que la pinza suba y baje (entrando y saliendo del suelo), cuando su movimiento en la horizontal está en el periodo de velocidad constante. Se pueden ver los gráficos en la Figura 14. Donde el ángulo de desfasaje esta medido en el giro de los ejes directores los mecanismos.

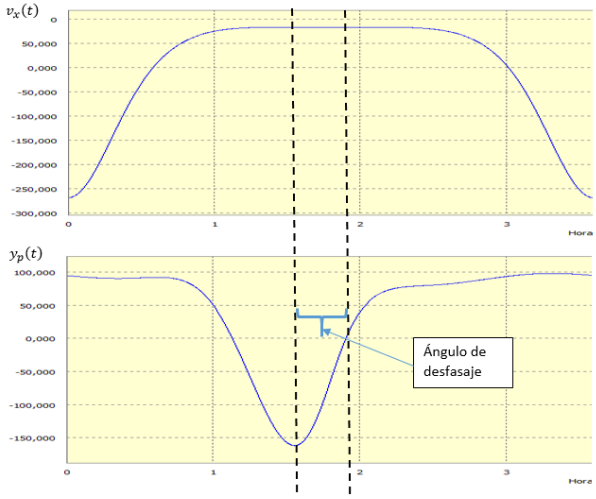


Figura 14: Sincronización de movimiento horizontal con movimiento vertical.

Una vez sincronizados los movimientos, mediante simulaciones cinemáticas simultaneas de los dos mecanismos, se pudo determinar la trayectoria del movimiento de traslación de la pinza.

ISBN: 978-987-1676-63-7

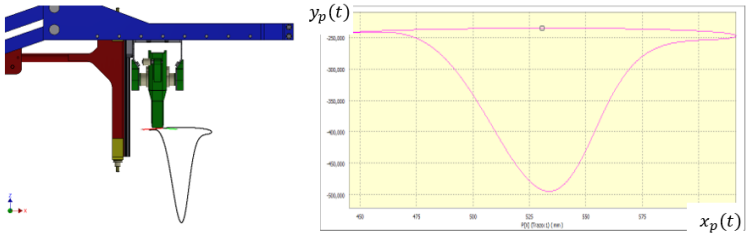


Figura 15: Trayectoria de movimiento de traslación de pinza.

4.4. Análisis dinámico de los mecanismos para obtención de solicitaciones en sus elementos

También se realizaron simulaciones dinámicas de los mecanismos. Estas simulaciones permitieron obtener, entre otras cosas, las curvas de par (M_1 y M_2) en función al tiempo en los ejes directores de los mecanismos. Las masas y las matrices de inercia de cada una de las partes móviles del mecanismo se determinaron directamente por software cargando los materiales de cada una de sus piezas.

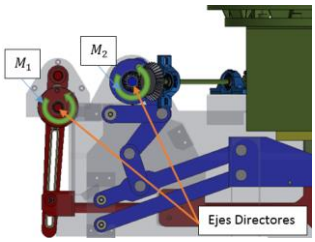


Figura 16: Par en los ejes directores de los mecanismos.

Los resultados del par en función al tiempo se utilizaron como base para el dimensionamiento de los ejes directores de los mecanismos teniendo en cuenta efectos de fatiga en dichos componentes.

Debido a la extensión máxima admitida para el informe no se puede detallar en mayor grado el dimensionamiento de los ejes directores de los mecanismos.

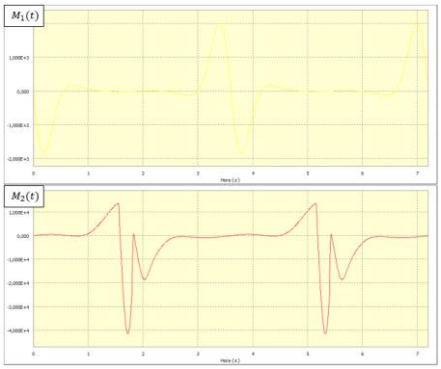


Figura 17: Resultados obtenidos para el par en función al tiempo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. CONCLUSIONES

En este proceso de investigación se logró el diseño de un dispositivo mecánico que tendrá un alto impacto en el contexto socio-económico donde cumplirá su función. Esta máquina permitirá solucionar una necesidad concreta y real que hasta ahora no fue abordada por fabricantes nacionales de maquinarias agrícolas. Este hecho hace que los productores de la región tengan que recurrir a maquinas importadas de alto costo y que no se adaptan concretamente a las necesidades locales.

También se demuestra que las herramientas computacionales de diseño mecánico ya no son más simples herramientas de dibujo, sino que pasaron a ser verdaderas herramientas de prototipado virtual. Éstas pueden ser puestas al servicio de los diseñadores de maquinaria para solucionar problemas reales de la sociedad. Con estas herramientas se pueden simular condiciones de funcionamiento y validar mecanismos antes de construirlos, disminuyendo así los costos de desarrollo de sistemas mecánicos.

Este proyecto de investigación y desarrollo fue llevado adelante por un grupo de estudiantes de la carrera ingeniería electromecánica de la Facultad Regional Reconquista, todos ellos nucleados en el grupo de investigación GRUDIM y motivados por la intención de mejorar la calidad de vida de los productores hortícolas y de las personas que realizan esta actividad. Además de los aspectos técnicos, en el marco de este proyecto se desarrolló un verdadero trabajo en equipo donde hubo una mutua colaboración de todos sus integrantes.

6. REFERENCIAS

[1] Fabbro A. et al, DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO PARA PINZA DE UNA TRASPLANTADORA HORTICOLA PARA MÚLTIPLES ESPECIES, IV CAIM 2014, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, 2014.

[2] S. N. Kozhevnikov, Mecanismos, Editorial Gustavo Gili SA, Barcelona, 1975.

[3] Wolfram Mathematica, Wolfram Resarch Inc., Version 9.

[4] Autodesk Inventor 2015, Autodesk.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad Regional Reconquista por el espacio de trabajo y por la oportunidad de trabajar en nombre de esta institución. También, a todas aquellas personas que colaboraron de alguna u otra manera con este proyecto.

Banco de rodadura en escala para ensayo dinámico de bogies ferroviarios

E. Heidenreich[1], F.Prieri[1], C.A. Moscariello[1], C.A. Rosito[1,2] y E. Tamburini[1]

[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Ruta 4 (ex Camino de Cintura), Km 2, (1832) Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina, email: elvioh@gmail.com
[2] CITEDEF, San J. B. de La Salle 4397 (1603), V. Martelli, Buenos Aires, Argentina, email: crosito@citedef.gob.ar

Resumen

El bogie ferroviario moderno, operando a altas velocidades y elevadas cargas por eje requiere un diseño elaborado. Aparecen fuertes cargas dinámicas debido imperfecciones en la vía, fuerzas de inercia, resonancias y oscilaciones propias inherentes al modo de guiado del vehículo ferroviario ("hunting"). Con 20/40 grados de libertad y fuertes no linealidades, la modelización matemática es una tarea de envergadura, por lo que se la complementa con ensayos en bancos de rodadura. Estos constan de grandes ruedas con eje horizontal dispuestas una debajo de cada rueda del bogie con un perfil similar al del riel, con adecuados accionamientos que permiten simular diferentes condiciones de operación. El costo de estos bancos es extremadamente alto, por lo que se han desarrollado bancos de ensayo en escala reducida, que mediante las teorías de semejanza permiten la validación experimental de las modelizaciones.

Se presentan aquí los cálculos teóricos, el diseño mecánico y las etapas iniciales de la construcción de un banco de rodadura en escala reducida. Se ha elegido la escala 1:5 para la longitud y 1:1 para el tiempo y la densidad. El equipo permite variar (los valores se refieren a la escala 1:1) la distancia entre ejes de 1.600 a 3.000mm, la trocha 1.000 a 1.676 mm, la velocidad del bogie hasta 200Km/h, someterlo a cargas variables de diversas orientaciones y aplicar a las ruedas perturbaciones que simulan variaciones de ancho, variación transversal del eje, nivel medio y alabeo de la vía, así como defectos aislados del riel. Adicionalmente, se puede imprimir a las ruedas de ambos lados del banco un pequeño diferencial de velocidad lo que permite simular el tránsito en curvas. Se ha prestado especial atención a la simulación de las importantes tensiones de contacto rueda-riel, problema aún abierto en la literatura.

***Palabras Claves**: Roller rig. Mechatronic modeling, Wheel-rail contact.*

1. INTRODUCCIÓN

El bogie de ferrocarril, sea para material remolcado de carga o de pasajeros, está sometido a fuertes cargas dinámicas, crecientes con la velocidad, debido imperfecciones en la vía, aparatos de vía, fuerzas de inercia, resonancias y eventuales oscilaciones propias, inherentes al modo de guiado del vehículo ferroviario (vivoreo o “hunting”).

Las fuerzas internas y externas en el bogie deben ser calculadas a efectos de dimensionar los diferentes elementos, asegurar que las fuerzas de contacto rueda-riel no superen los límites admisibles, verificar que no se excedan las cargas máximas propias de la vía y su infraestructura, limitar las fuerzas transversales en el contacto rueda-riel, así como estudiar y validar los sistemas de frenado y las solicitaciones térmicas y mecánicas asociadas. En el caso de coches de pasajeros, se debe verificar adicionalmente que las aceleraciones vibratorias (en particular las transversales) no comprometan el confort del pasajero, lo que requiere no superar el llamado “índice de confort” establecido en las normas.

Si bien hasta fines del siglo pasado se recurría a métodos de cálculo semiempíricos para la resolución de estos problemas, actualmente, debido a la tendencia creciente tanto en las cargas por eje como en las velocidades de operación, se recurre a la resolución, de las ecuaciones diferenciales de movimiento [1,2]. Esto es una tarea de envergadura, dado que un bogie puede tener típicamente del orden de 20/30 grados de libertad, muchos acoplamientos son no lineales, y en muchos casos su caracterización matemática es imprecisa. El diseño debe realizarse, además, buscando peso reducido, costo aceptable y alta seguridad. Por este motivo resulta imprescindible realizar una validación experimental de cada nuevo prototipo, es decir, realizar un ensayo dinámico del bogie en funcionamiento, convenientemente instrumentado, con distintas cargas y velocidades de servicio.

Históricamente se trabajaba sobre prototipos, corrigiendo y optimizando paulatinamente los diseños. Estos ensayos son largos y costosos y dieron origen a numerosos accidentes. Por este motivo, comenzaron a usarse bancos de ensayo de rodadura que suelen denominarse “roller rigs”.[3,4] Se trata de importantes instalaciones que constan de grandes ruedas con eje horizontal dispuestas una debajo de cada rueda del bogie, con un perfil en la periferia similar al del riel, accionadas a la misma velocidad de rotación, de manera de hacer girar las ruedas del bogie y simular la marcha del mismo sin desplazar el vehículo.. Se pueden aplicar independientemente a las ruedas pequeñas perturbaciones que permiten simular defectos de la vía (variaciones de trocha, variaciones de nivel medio de la vía, alabeo, etc.) o el tránsito a través de aparatos de vía. Debido al alto costo de estas instalaciones ha surgido la modalidad de realizar ensayos con modelos en escala y bancos de rodadura en escala reducida, y luego por cálculo, utilizando leyes de semejanza, obtener los parámetros correspondientes a la

escala natural [5]. Estos bancos de prueba reciben el nombre de “scaled roller rig”[6 -13]. En este trabajo se presenta el diseño, y las fases iniciales de la construcción un banco de ensayos dinámicos de modelos de bogies en escala 1:5

2. PARÁMETROS BÁSICOS DEL BANCO DE RODADURA.

2.1. Trocha y distancia entre ejes

El banco de ensayos permitirá ensayar en laboratorio modelos en escala 1:5 de bogies tanto de vagones de carga como de coches de pasajeros. La Tabla 1 muestra los parámetros básicos de diseño.

Tabla 1. Parámetros básicos de diseño del banco

	Escala 1:1	Escala 1:5	Unidades	Observaciones
Distancia entre ejes máxima	3000	60	mm	
Distancia entre ejes mínima	1600	360	mm	
Trocha máxima	1676	336	mm	Trocha Ancha
Trocha mínima	1000	200	mm	Trocha Angosta
Diámetro de las ruedas	-------	359	mm	
Ancho de la cabeza del riel	70	14	mm	Riel UIC/54 EN
Peso máx. nominal por eje	26	0.208	toneladas	Ver tabla 3

Tanto la distancia entre ejes como la trocha son continuamente variables entre los límites máximo y mínimo. La separación de las ruedas del banco puede variarse desde 185 mm a 350 mm. Esto abarca las trochas de 1000 mm (angosta), 1435 mm (internacional) y 1676 mm (ancha) en uso en nuestro país, y además trochas en uso en otros países (1067 mm Sudáfrica, 1528 mm Rusia y CIS, 1600 mm Brasil, 1668 mm España).

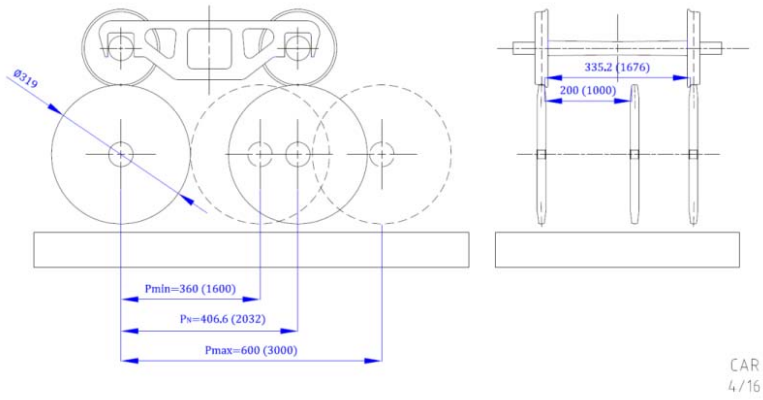


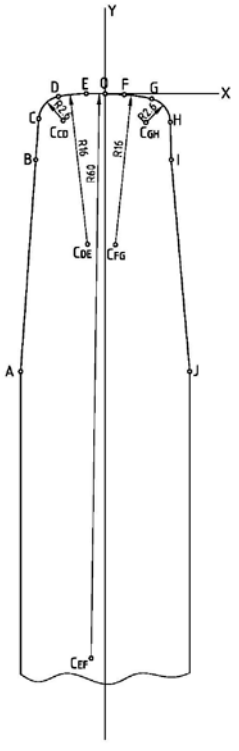
Figura 1. Dimensiones básicas del banco de rodadura

ISBN: 978-987-1676-63-7

La separación de los ejes de las ruedas podrá variarse de 360 a 600mm de manera de poder acomodar modelos de bogies correspondientes a distancia entre ejes desde1600mm hasta 3000mm.

2.2. Geometría de las Ruedas

Las ruedas del banco tienen un diámetro de 360 mm. Sobre la circunferencia exterior de las ruedas se torneará el perfil similar al de la cabeza del riel reducido en escala 1:5. Inicialmente se utilizará el contorno del riel UIC/EN-54, actualmente utilizado en la Argentina para nuevos trazados ferroviarios. El ancho del "hongo" es de 70 mm lo que nos lleva 14 mm de espesor en la periferia de la rueda. De acuerdo a las normas argentinas los rieles se montan en la vía con una inclinación de 1:40 (1.43^{o}) hacia adentro. Para simular esta inclinación se ha diseñado la rueda contorneada en la periferia como se muestra en la figura 2. Otros perfiles, sea respondiendo a otra norma o que simulen el "hongo" con diversos grados de desgaste requerirán cambiar las cuatro ruedas del banco por otras en que se haya torneado el perfil deseado.



PUNTOS DE EMPALME		
PUNTO	X	Y
A	-9,00	-29,50
B	-7,40	-7,01
C	-7,07	-2,64
D	-4,98	-0,29
E	-2,02	0,02
F	2,02	-0,08
G	4,,96	-0,53
H	6,93	-2,29
I	7,03	-7,01
J	9,00	-29.5
O	0,00	0,00

CENTROS		
PUNTO	X	Y
C_{CD}	-4,48	-2,84
C_{DE}	-1,88	-15,98
C_{EF}	-1,50	-59,98
C_{FG}	1,08	-16,06
C_{GH}	4,33	-3,06

NOTA: LAS COORDENADAS DE CENTROS SON INDICATIVAS

Figura 2.Perfil de trabajo de las ruedas del banco.

2.3. Velocidad de rotación de las ruedas del banco

El material de las ruedas es acero SAE 1045, templado y revenido con una dureza 52-55 RC.

La velocidad de rotación máxima del las ruedas se elige de manera de poder simular velocidades de tránsito en escala 1:1 de hasta 200 km/h. Un cálculo elemental considerando

ISBN: 978-987-1676-63-7

escala 1:5 y radio de la rueda de 180 mm da una velocidad de giro de 590 rpm. Para simular tránsito en vía recta las cuatro ruedas girarán a la misma velocidad, independientemente de los movimientos transversales que simulen desviaciones de los rieles respecto de sus valores nominales.

La simulación del tránsito en vía curva se hará en una segunda etapa, aunque en el montaje de las ruedas se ha previsto la posibilidad de pequeños giros (estáticos) de las mismas alrededor de un eje vertical de manera de disponer los planos que contienen a la circunferencia de rodadura tangente a la curva que se desea simular (ver figura 4). El par de ruedas de un lateral deberá variar su velocidad angular en relación con el otro. Este diferencial de velocidad deberá controlarse con extrema precisión. Para simular una curva de 1000 m de radio de curvatura en trocha de 1676 mm, por ejemplo, la variación porcentual de velocidad angular entre ambos pares de ruedas debe ser de 0,1674%, y esta diferencia de velocidades debe a su vez controlarse con una precisión mejor que el 1%, por lo que la diferencia de velocidades angulares debe controlarse con una precisión del orden de 0.0016%, o 16 partes por millón. La implementación de estos accionamientos se llevará a cabo por medio de sistemas de engranajes diferenciales. El accionamiento será por un motor eléctrico de velocidad variable controlado por computadora. Los ejes de las ruedas estarán vinculados a sus soportes por rodamientos de bolas de contacto angular para absorber altas cargas radiales y transversales.

3. SIMULACIÓN DE IMPERFECCIONES DE LA VÍA.

3.1. Especificaciones de movimientos lineales de las ruedas de la mesa de rodadura

Las ruedas del banco estarán montadas sobre soportes independientes. Sus ejes de giro podrán ser accionados verticalmente, transversalmente y angularmente (girando alrededor de un eje vertical), de manera independiente o coordinados entre sí, a efectos de poder simular todo tipo de perturbaciones en la vía (variación de trocha, variación de nivel, alabeo, perturbaciones concentradas como juntas de riel, etc.). Para definir estos movimientos, debemos conocer las variaciones que se producen en la posición de los rieles en vías reales en relación con sus valores nominales. Estos apartamientos reducidos a la escala 1:5 nos darán las carreras necesarias de los movimientos transversales y de altura de las ruedas.

3.1. Desplazamiento de los rieles en sentido horizontal

Los mismos se caracterizan por dos parámetros: las variaciones de trocha y las desviaciones en sentido horizontal del eje de la vía respecto del eje nominal. De la figura 3 (izquierda) obtenemos para la variación de de la trocha:

$$\Delta t = t - t_0 = (y_D - y_I) - (y_{0D} - y_{0I}) = (y_D - y_{0D}) - (y_I - y_{0I}) = \Delta y_D - \Delta y_I \qquad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Y para la variación de alineación horizontal del eje de la vía:

$$\Delta y_E = y_E - y_{E0} = \frac{1}{2}(y_D + y_I) - \frac{1}{2}(y_{0D} + y_{0I}) = \frac{1}{2}(\Delta y_D + \Delta y_I) \tag{2}$$

De (1) y (2) obtenemos el apartamiento máximo hacia la derecha del riel derecho:

$$\Delta y_D = \Delta y_E + \frac{1}{2}\Delta t \tag{3}$$

Vemos que el desplazamiento transversal máximo del riel derecho corresponde al máximo desplazamiento transversal del eje de la vía más la mitad de la variación máxima de la trocha. Obviamente vale lo mismo para el riel izquierdo. Los valores máximos de los desplazamientos que figuran en el segundo miembro se especifican en normas según la calidad de la vía.

3.2. Desplazamiento de los rieles en sentido vertical.

También en este caso se definen dos parámetros: el alabeo, que es la diferencia de niveles entre el riel derecho y el izquierdo:

$$\Delta z_A = z_D - z_I \tag{4}$$

y la variación de nivel del eje de la vía en relación con su nivel nominal:

$$\Delta z_E = \frac{1}{2}(z_D + z_I) \tag{5}$$

Consideraciones análogas a las realizadas para obtener la ecuación 3 nos llevan a:

$$\Delta z_D = \Delta z_E + \frac{1}{2}\,\Delta z_A \tag{6}$$

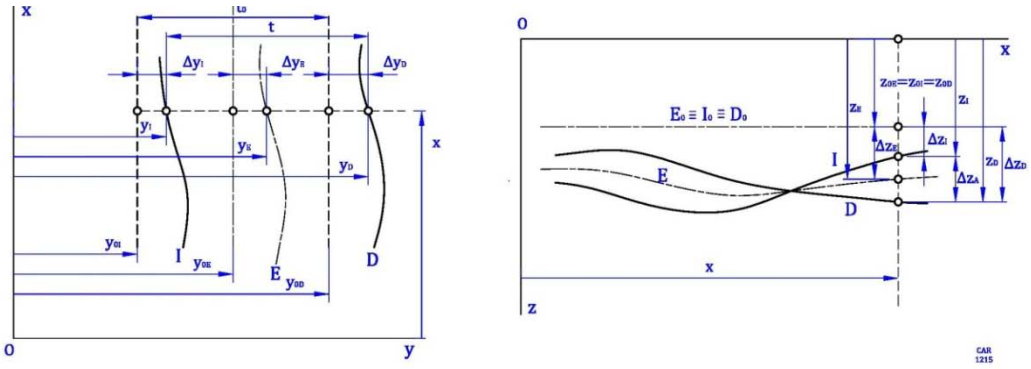


Figura 3. Desplazamientos de los rieles. Derecha: vista superior. Izquierda: vista lateral. Coordenadas: x en sentido de marcha, y horizontales, z verticales (medidas hacia abajo). Nomenclatura: I→Riel izquierdo, E→Eje de la vía, D→Riel derecho. Subíndice "0" indica valores nominales, sin deformaciones. t_0 trocha nominal. t trocha modificada. Δz_A: alabeo.

Es decir que el desplazamiento vertical máximo del riel derecho corresponde al máximo desplazamiento vertical del eje de la vía más la mitad del alabeo. Obviamente vale lo mismo para el riel izquierdo.

3.3 Especificación de los desplazamientos en base a normas.

En los distintos países las normas especifican los valores máximos de estas desviaciones según el tipo de tránsito y las velocidades máximas a desarrollar. Lamentablemente en nuestro país no existen normas específicas para este tema en particular, por lo que tomaremos como referencia las normas norteamericanas de la FRA (Federal Railroad Administration) [14]. En la misma se tipifican 9 categorías de vía, cada una con límites definidos de velocidad para trenes de pasajeros y de carga, siendo la categoría 9 la más exigente y la categoría 1 la correspondiente a vía en malas condiciones y sólo utilizable en muy baja velocidad. Hemos adoptado para el diseño los desplazamientos asociados con la categoría 4, que corresponden estimativamente a la vía típica de líneas troncales en estado aceptable de nuestro país.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que las normas FRA se aplican a la tocha de 1.435mm en tanto que esta mesa se aplicará a estudios en diferentes trochas, pero es de especial interés trabajar en 1.676mm que es la trocha ancha argentina. La consulta de las normas de Indian Railways, que también utiliza esta trocha, y por brevedad no podemos resumir aquí nos llevan a ampliar ligeramente los valores de la tabla y tomar como valores máximos de diseño ±14 mm para variaciones verticales y ±16 mm para variaciones horizontales.

Tabla 2. Cálculo de desplazamientos en base a normas FRA, vía categoría 4, referencia [14]

Desplaz. Horizontal Referencia 13 §213.55	Δt variación de trocha	Δy_E variación de eje vía	Total horizontal (ecuación 3) $\Delta y = \Delta y_E + \frac{1}{2}\Delta t$	Desplazam. Horizontal. Esc. 1:5
	1½" (38.1mm)	1½ (38.1mm)	57.1 mm	±11.4 mm
Desplaz. Vertical Referencia 13 §213.63	Δz_A alabeo	Δz_E variación de eje de vía	Total vertical (ecuación 6) $\Delta z = \Delta z_E + \frac{1}{2}\Delta z_A$	Desplazam. vertical Esc. 1:5
	1½" (38.1mm)	2" (50.8mm)	69.85mm	±14.0 mm

3.4 Movimientos

Los movimientos deben ser ejecutados con precisiones lineales del orden de 0.1mm, bajo cargas mecánicas importantes (~500/5000 N). Para simular el desplazamiento del bogie en vía recta, las cuatro ruedas se accionarán a la misma velocidad angular, independientemente de los movimientos de sus ejes descriptos en el punto anterior. Es interesante destacar que con las ruedas del banco perfectamente alineadas y sin ninguna perturbación, lo que simula una vía recta perfecta, aumentando suficientemente la velocidad, se llegará a una cierta velocidad crítica, a la cual aparecerán oscilaciones transversales crecientes del bogie que pueden llevar al descarrilamiento u otra falla catastrófica. Esta velocidad crítica depende de las constantes mecánicas del bogie (masas, acoplamientos elásticos y amortiguaciones) y su determinación experimental tiene un valor crucial, dado que en la marcha real la velocidad debe mantenerse por debajo de esta velocidad crítica con un razonable coeficiente de seguridad.

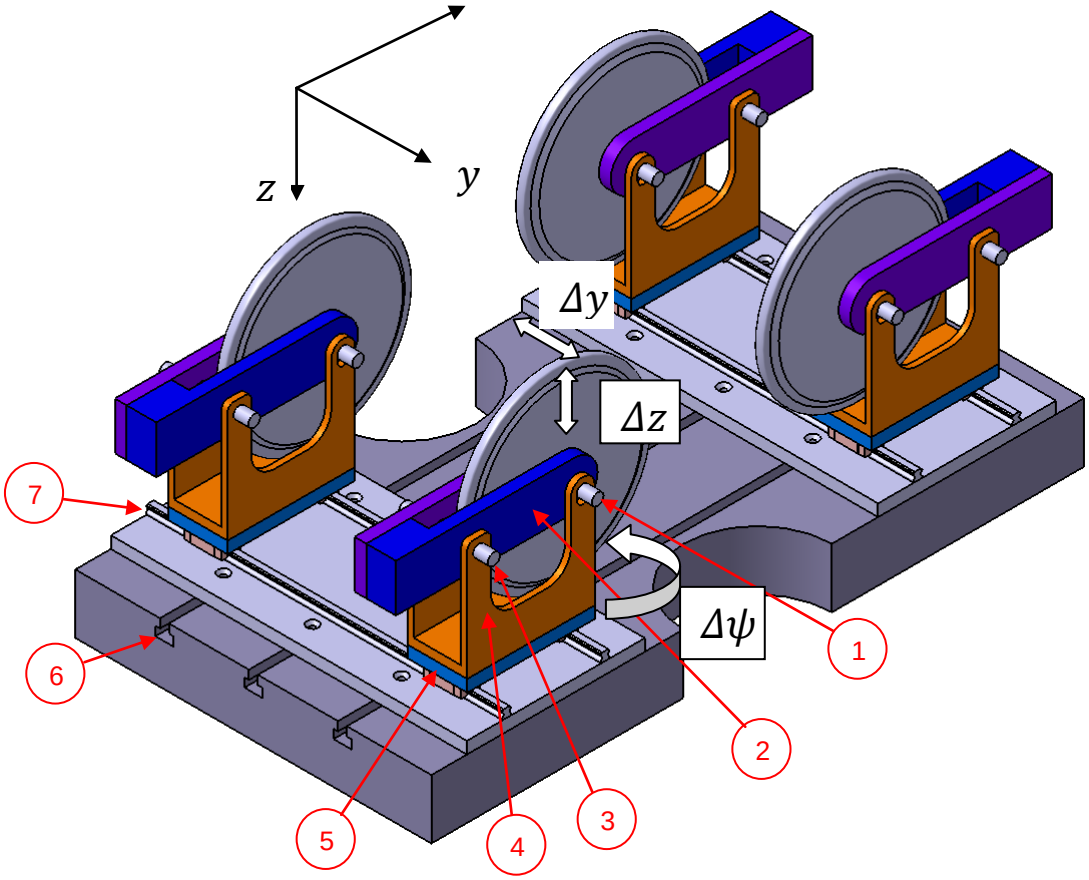


Figura 4. Visión de conjunto de banco de rodadura en escala 1:5. (simplificada). (1) Eje de giro de la rueda. (2) Brazo pivotante (3) que sostiene al eje de la rueda y que al bascular permite pequeños movimientos verticales Δz del conjunto eje-rueda. (3) Eje del brazo articulado. (4) Bastidor soporte del eje del brazo (nótese el agujero elongado para permitir el movimiento del eje de la rueda según z). (5) Platina. (6) Ranuras guía para movimientos longitudinales. (7) rieles para movimientos transversales.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. APLICACIÓN DE CARGAS VERTICALES.

Una estructura ubicada por sobre la mesa permitirá aplicar fuerzas verticales y transversales sobre el modelo del bogie en estudio que simulen diversas cargas convenientemente escaladas (por ejemplo las que exigen diferentes normas). El bastidor puede efectuar pequeños giros $\Delta\psi$ (estáticos, prefijados para cada ensayo) respecto de un eje vertical que pasa por el centro de la rueda y está fijo a la platina. No se muestra en la figura 4 la superestructura para posicionar el bogie, los actuadores para los movimientos Δy y Δz ni la motorización.

5. FACTORES DE ESCALA DE LAS DISTINTAS MAGNITUDES FÍSICAS INVOLUCRADAS.

Para interpretar los resultados obtenidos experimentalmente y obtener conclusiones de utilidad para el prototipo en escala 1:1, debemos elegir una estrategia de escalado de las diferentes magnitudes. Las geométricas se determinan unívocamente: si las dimensiones lineales se escalan con un factor $f_l = {l_1}/{l_0}$, donde l_1 es la longitud en escala 1:1 y l_0 es la longitud en el modelo, las superficies se escalarán como $f_s = {f_l}^2$ y los volúmenes como $f_v = {f_l}^3$. Para el escalamiento del tiempo elegimos un factor unitario $f_t = 1$ lo que implica también un factor unitario para las frecuencias. Esta elección nos permite observar los fenómenos en la misma escala de tiempo que en el bogie real. Cabe aclarar que algunos grupos trabajando en este tema han elegido factores diferentes [11, 13]. Eligiendo acero como material del bogie automáticamente nos impone los factores de densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson: $f_\rho = f_E = f_\nu = 1$. Nuevamente esta elección no es única, pero hay muy pocas alternativas prácticas, dado que si se elige otro material, quedan determinadas las tres constantes, cuyas relaciones son diferentes de las del acero utilizado en el vehículo real. El coeficiente de fricción entre la rueda y el riel es fundamental en la dinámica ferroviaria porque condiciona las fuerzas en la zona de contacto. Siendo también de acero tanto las ruedas del bogie como las del banco, el coeficiente de fricción será el mismo que para el caso real, (suponiendo igualdad de terminaciones mecánicas) lo que implica $f_\mu = 1$.

Prosiguiendo de esta manera, en base a las relaciones ya definidas y utilizando las ecuaciones que vinculan las diferentes magnitudes físicas, obtenemos la tabla 3 que muestra los factores de escalamiento de algunas magnitudes físicas.

Tabla 3. Factores de escala de las diferentes magnitudes los ensayos en la mesa de rodadura

Magnitud	Fórmula dimensional	Factor algebraico	Factor numérico
Longitud	l	f_l	5
Superficie	$S = l^2$	$f_S = f_l^2$	25
Volumen	$V = l^3$	$f_V = f_l^3$	125
Densidad	ρ	$f_\rho = 1$	1
Masa	$m = \rho l^3$	$f_m = f_l^3$	125
Momento de inercia	$I = \rho l^5$	$f_I = f_l^5$	3125
Tiempo	t	$f_t = 1$	1
Velocidad	$v = {}^{l}/_{t}$	$f_v = f_l$	5
Aceleración	$a = {}^{l}/_{t^2}$	$f_a = f_l$	5
Fuerzas de inercia	$F = ma = \rho l^3({}^{l}/_{t^2}) = \rho l^4/t^2$	$f_F = f_l^4$	625
Fuerzas gravitatorias (peso)	$P = mg = \rho l^3 g$	$f_P = f_l^3$	125

Observamos en las dos últimas filas de la tabla un problema que condiciona el diseño de toda la estructura. En tanto que las fuerzas de inercia escalan como $f_l^4 = 625$, las fuerzas gravitatorias (peso) escalan como $f_l^3 = 125$. Esto alteraría los resultados (deberíamos trabajar en un planeta con $g = \frac{1}{5} 9.8 \frac{m}{seg^2} = 1.96 \frac{m}{seg^2}$, lo que no es posible por el momento) por lo que se deberá descargar el bogie suspendiéndolo de una superestructura que sostenga 4/5 de su peso (No mostrada en la figura 4).

6. CONCLUSIONES

Se ha realizado un diseño conceptual completo incluyendo cálculos teóricos y el diseño mecánico de un banco de rodadura para bogies ferroviarios en escala 1:5. Se ha elegido la escala 1:1 para el tiempo, la densidad y las propiedades mecánicas de los materiales. El equipo permite simular prototipos de todas las trochas que se utilizan en el país y admite distancias entre ejes 1.600 a 3000 mm (en escala 1:1). El diseño permite aplicar a las ruedas perturbaciones que simulan variaciones de ancho, variación transversal del eje, nivel medio y alabeo de la vía, así como defectos aislados del riel. Se trabajado en el marco de un vacío de normas ferroviarias a nivel nacional, por lo que se han utilizado normas de la Federal Railway Administration, US Department of Transportation, con modificaciones para adaptarlo a las condiciones locales. Se ha estudiado con detalle la estrategia de modelización en escala y se ha previsto que la compensación de la diferente ley de escalado para las fuerzas de inercia y las gravitatorias requiere aplicar al modelo del bogie fuerzas de sustentación de un valor de cuatro quintas partes de su peso propio.

Se está finalizando la ingeniería de detalle asociada con los movimientos transversales y comenzando el mecanizado de las piezas mayores. Estos bancos no son comerciales y se han desarrollado en unos pocos institutos de investigación y universidades del exterior, no

existiendo ninguno a nivel nacional. Una revisión bibliográfica exhaustiva muestra que el modelo diseñado presenta soluciones originales no existentes en la literatura.

El banco será de gran utilidad para desarrollo y optimización de prototipos de bogies. Será además una herramienta útil para formación en técnicas avanzadas de diseño ferroviario.

REFERENCIAS

[1] Iwnicki, S., *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, Ed. Taylor and Francis, 2006

[2] Shabana A., Zaazaa K., Sugiyama H., *Railroad Vehicle Dynamics*, CRC Press, 2008

[3] Jaschinski, A., Chollet, H., Iwnicki, S. D., Wickens, A. H., and Von Würzen, J., *The Application of Roller Rigs to Railway Vehicle Dynamics*, Veh. Syst. Dyn., vol. 31, p. 345, 1999.

[4] Kimiaki S., Shogo K., Mamoru E., *A Design And Bench Test of Multi-modal Active Suspension of Railway Vehicle*, ieee.org/iel2/3173/8998/00398128.pdf

[5] Jaschinski, A., *On the Application of Similarity Laws to a Scaled Railway Bogie Model.* Dissertation,TU-Delft, 1990 and DLR-FB 90-06, Oberpfaffenhofen, 1990

[6] Jaschinski, A., Grupp, F. and Netter, H., *Parameter Identification and Experimental Investigations of Unconventional Railway Wheelset Designs on a Scaled Roller Rig, In The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, Proceedings of 14th IAVSD Symposium, Ann Arbor, Michigan, 1995, Segel, L., Ed., Swets&Zeitlinger, Lisse, 1996.

[7] Allen, P. D., *Error Quantification of a Scaled Roller Rig*, Doctoral Thesis, Manchester Metropolitan University, 2001.

[8] Allotta, B., Conti, R., Meli, L.,Pugi. F., Ridolfi, A., *Development of a HIL Railway Roller Rig Model for the Traction and Braking Testing Activities Under Degraded Adhesion Conditions*, International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 57, p. 50, 2013

[9] Bosso N, Gugliotta, A. Somà A., *Design Simulation and Testing of High Speed Vehicles Using Scaled Roller Rig*. DINAME 2013 - Proceedings of the XV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics M.A. Savi (Editor), ABCM, Buzios, RJ, Brazil, February 17-22, 2013

[10] Bosso, N., and Zampieri, N., *Experimental and Numerical Simulation of Wheel-Rail Adhesion and Wear Using a Scaled Roller Rig and a Real-Time Contact Code, Shock and Vibration*, vol. 2014, Article ID 385018, 2014.

[11] Gerlici J., Lack T. and Harušinec J., *Realistic Simulation of Railway Operation on the RAILBCOT Test Stand*, Applied Mechanics and Materials, vol. 486 p. 387, 2014

[12] Yu-Jeong Shin, Won-Hee You, Hyun-Moo Hur and Joon-Hyuk Park, H.. *Control of Railway Vehicle Suspension with MR Damper Using Scaled Roller Rig*, 2014 Smart Mater. Struct. vol.23, 2014

[13] Kalivoda, J., *Roller Rig Experiments with a Mechatronic Railway Bogie*,SIMPACK News, p.15, August 2014

[14] Federal Railway Administration, *Track Safety Standards*, US Department of Transportation Track and Rail and Infrastructure Integrity Compliance Manual, 2014

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo dado por la Universidad Nacional de Lomas de Zamora por medio del subsidio Lomas CyT 13/C062.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SIEMBRA A PRESION CONSTANTE. MEJORAS EN EL PROCESO DE SIEMBRA DIRECTA

Juan S. Iturralde, Pedro S. Giraudo, Huber G. Fernandez y Carlos E. Tais

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional Fac. Reg. Villa María
Av. Universidad 450, Villa María, Córdoba, Argentina
carlos.e.tais@gmail.com

RESUMEN

Las sembradoras utilizadas en el sistema de siembra directa realizan básicamente tres operaciones; la apertura del surco, la dosificación y distribución de semillas y finalmente la cobertura con tierra y rastrojo de las mismas.

Si bien en nuestro país este tipo de labranza ha demostrado gran efectividad, se detecta que en la primera operación, según el tipo, el estado del suelo y los obstáculos que pueden plantear los restos de raíces o malezas, la profundidad resultante del surco es variable, generando un problema de rendimiento de cultivo, por diferencias en los tiempos de germinación, emergencia y crecimiento de la planta [1].

Para abordar este problema se realizaron ensayos de campo sobre los cuerpos de siembra de varias sembradoras existentes en el mercado actual, relevando las mismas con el objetivo de detectar las oportunidades de mejora y sugerir innovaciones en los cuerpos de siembra, interviniendo en el diseño mecánico de aquellos.

En este trabajo se propone el rediseño del paralelogramo deformable donde están situados los discos y los resortes mediante los cuales el cuerpo de siembra aplica la presión sobre el terreno. Se desarrolló un modelo numérico para determinar mediante simulación la fuerza ejercida. Los resultados se compararon con los obtenidos en los ensayos de laboratorio, validando de esta forma el modelo implementado en la simulación. Posteriormente, se modificaron los parámetros geométricos del paralelogramo incorporados al modelo hasta arribar al diseño óptimo. Finalmente, se procedió a la verificación estructural mediante software de elementos finitos de las piezas principales que componen el cuerpo de siembra.

Los ensayos realizados sobre el equipo modificado han demostrado una mejora significativa en la presión constante, permitiendo mantener una profundidad uniforme durante el proceso de apertura del surco. Se pretende contribuir con la agricultura de precisión, mejorando la calidad de siembra y maximizando las prestaciones de las sembradoras.

.

Palabras Claves: *Cuerpo de siembra, Presión constante, Simulación numérica, Elementos finitos*

1. INTRODUCCIÓN

Los discos abridores efectúan la apertura del surco cuya profundidad de trabajo puede oscilar entre los 0.02 m como mínimo y los 0.06 m como máximo, dependiendo del tipo de semilla y de las condiciones de una banda de suelo de aproximadamente entre 0.12 m y 0.15 m [2].

Esto se logra con el propio peso del mecanismo y una carga extra de hasta 1470 N proporcionada por sendos resortes alojados en el paralelogramo (si el cuerpo tiene discos, éstos clavan por peso, si hay una púa o reja, ésta ejerce una succión) [3-6]. Si existe sobrepeso en caso de suelos blandos, se incorporan ruedas limitadoras de profundidad. En la Figura 1 se muestran las partes principales de un cuerpo de siembra típico

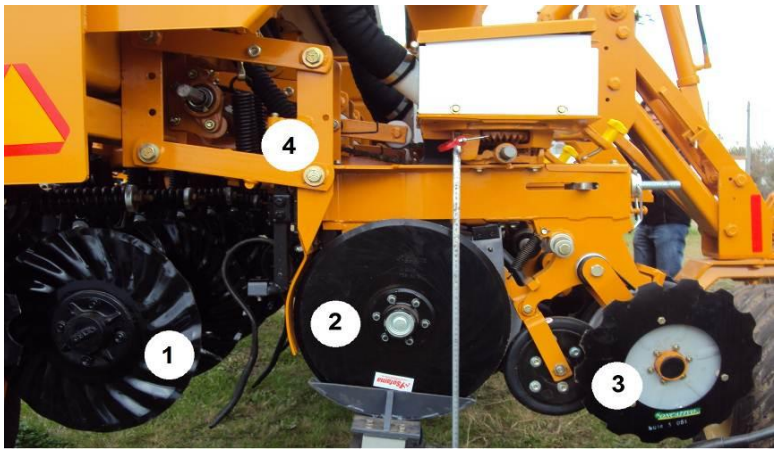


Figura N°1: Elementos del cuerpo de siembra en sembradora directa. (1) Cuchilla cortarrastrojo. (2) Doble cuchilla abridora de surco. (3) Ruedas tapadoras. (4) Paralelogramo con resorte forzador.

En un suelo semiárido o en un suelo irregular, las variables cambian y esto conduce a que no se conozca con precisión la variación de carga vertical que debe aplicarse al suelo para lograr una profundidad uniforme. Ante esta situación se deben generar distintos esfuerzos compensatorios dependiendo de cada terreno en particular.

Para abordar esta problemática se analizaron diferentes variantes implementadas en las máquinas comerciales, como son los sistemas elásticos (resortes) o neumáticos (pulmón de aire) con el objetivo de comprender el comportamiento y diseñar un dispositivo que pueda compensar las cargas, esfuerzos y variaciones para obtener profundidades uniformes, minimizando los efectos debidos a las condiciones del terreno.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Para los ensayos en campo se utilizó equipamiento compuesto de criquet hidráulico, celdas con display y salida serie, regla graduada y un goniómetro 360° digital, entre otros elementos, los cuales se muestran en la Figura 2.



Figura N°2: Equipamiento utilizado en trabajos de campo

La celda de carga se coloca sobre un elevador hidráulico y el conjunto se coloca por debajo de los doble discos abre surcos. Se realiza un recorrido sin los resortes y se mide el peso del cuerpo. Se registró la fuerza que indica el display de la celda en intervalos de 0.02 m. Luego se repite la operación con los resortes instalados en su posición original.

Con los datos obtenidos se caracteriza el comportamiento de la carga durante el recorrido ascendente del cuerpo de siembra. La transferencia de la misma puede ser variable (creciente) o constante. Se realizaron mediciones sobre 18 equipos de diez marcas existentes en mercado.

2.1. Resultados obtenidos

En la Figura 3, se muestran los valores de la fuerza transferida en función del recorrido en ascenso. Se identifican las curvas correspondientes a los ensayos en los que se obtuvo la carga variable y la constante. En todos los casos, los resultados surgen del promedio de los valores obtenidos de las diversas máquinas. La mayoría de los equipos manifiestan un comportamiento de carga variable mientras que en unos pocos (10%) la respuesta demostró que la carga se mantuvo constante.

En aquellos con carga variable, los resultados muestran una respuesta lineal entre 1030 N hasta un máximo de 1200 Kg después de haber levantado 0.12 m el tren de siembra, logrando así una variación de 1470 N/m de recorrido. Esta situación se presenta tanto en aquellos equipos que no

ISBN: 978-987-1676-63-7

permiten regulación de la posición del resorte (enganche monopunto) como en aquellos con resorte regulable (enganche multipunto), o sea con la alternativa de resorte con tensión variable.

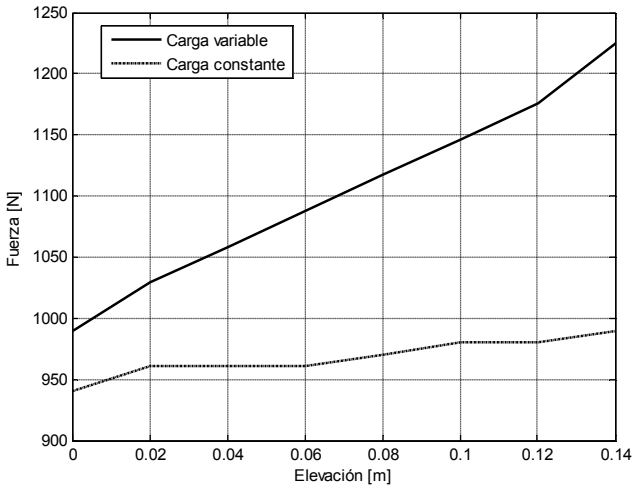


Figura N°3: Gráfico de carga sobre el suelo en función de la elevación del cuerpo de siembra

El desempeño de un tren de siembra con un comportamiento de carga constante muestra como respuesta valores aproximados sobre una recta paralela al peso propio del cuerpo de siembra. Entre los modelos evaluados hay tres que presentan carga constante regulable y uno con carga constante pero sin alternativas de variarla.

El esfuerzo aplicado al suelo se utiliza para efectuar todas las operaciones mencionadas al principio. Si existiese sobrante de carga, situación común en los casos analizados y que se pretende optimizar a partir de este trabajo, éste es absorbido por las ruedas limitadoras de la profundidad, las cuales requieren una carga de 100 N a 300 N para cumplir su función [7]. El exceso se traduce en compactación y significa un sobredimensionamiento mecánico innecesario. Un cuerpo de siembra con carga variable debe tener necesariamente unas ruedas limitadoras de la profundidad anchas para soportar la carga variable. Un cuerpo con carga constante, adecuadamente regulado, puede tener las ruedas limitadoras de profundidad angostas, las que copian con mayor fidelidad las irregularidades del terreno además de permitir un mejor aprovechamiento de los barre rastrojos. Estos resultados justifican el estudio y la implementación de las mejoras en los modelos ensayados

3. REDISEÑO DEL CUERPO DE SIEMBRA

Para efectuar el rediseño en el cuerpo de siembra e introducir las modificaciones que permitan que la carga transferida se mantenga constante para las distintas posiciones, se procedió en una

ISBN: 978-987-1676-63-7

primera etapa a desarrollar un software que permita analizar y determinar la configuración óptima del conjunto de barras y resortes que constituyen el paralelogramo deformable. Luego esos resultados son evaluados en laboratorio sobre un prototipo experimental.

3.1. Resultados del software de simulación

Se desarrolló un software que permitió inferir resultados a priori, combinando distintas variables como: geometría del paralelogramo deformable (largos de barra, puntos de articulación y toma, etc.), tipos y cantidad de resortes, ángulos de posicionamiento, fuerzas actuantes y pesos propios.

Para incorporar al programa el efecto de los resortes utilizados en los equipos, se efectuó previamente una caracterización de los mismos de manera que el modelo matemático utilizado represente lo más fielmente posible el comportamiento real de los mismos. Para esto se ensayó el resorte con distintos pesos y se midió su elongación.

Para el resorte individual la rigidez medida es de 28420 N/m mientras que para el conjunto de dos resortes es 57820 N/m. Se asume entonces un modelo lineal que responde a la Ecuación 1

$$Fr = k\,\delta \qquad (1)$$

Siendo k = 57820 N/cm la rigidez del conjunto y δ la deformación del resorte.

Algunos de los resultados obtenidos mediante el software utilizado para la simulación se muestran en la Figura 5. Se obtuvieron resultados para cuatro posiciones de los resortes de carga, analizando el efecto de la incorporación al mismo de una precarga.

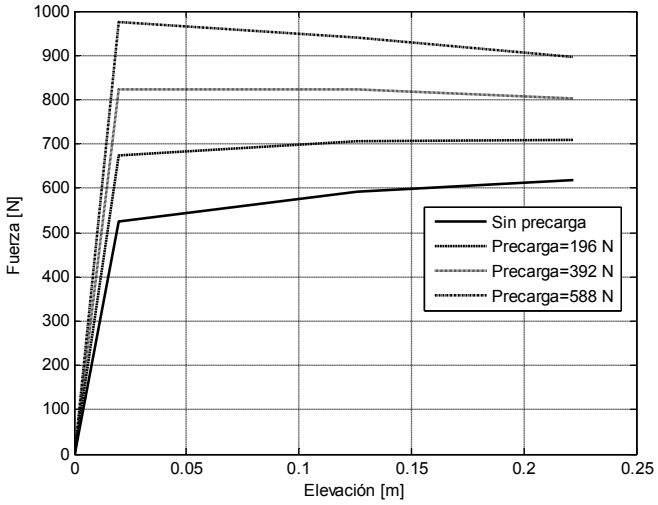


Figura N°4 – Resultados de la simulación en la Posición 1

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.3. Ensayos con el prototipo experimental

En base a los resultados del software de simulación, se construyó un prototipo experimental, que a priori muestra una mejora en el desempeño del cuerpo de siembra. En la Figura 5 se muestra una fotografía del prototipo construido.

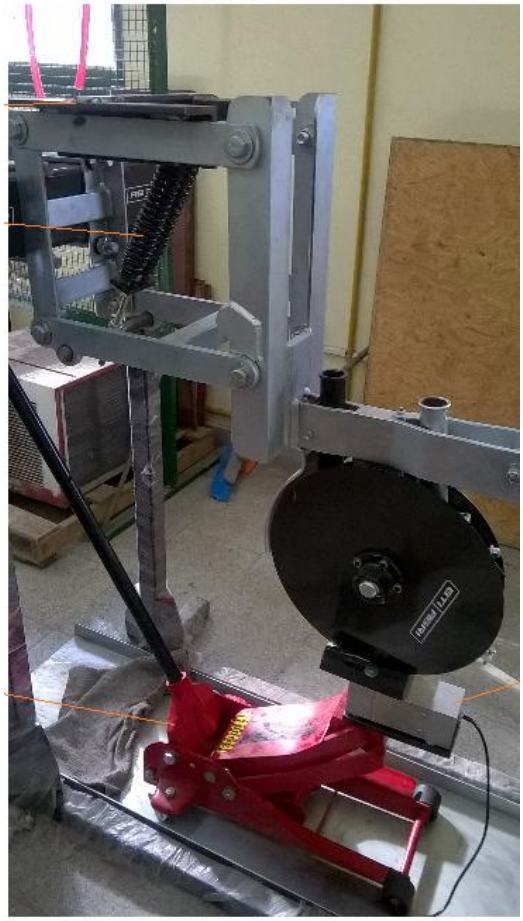


Figura N°5 – Prototipo del cuerpo de siembra utilizado en los ensayos en laboratorio

Se incorporó al equipo un sistema adaptador para ensayar el comportamiento del cuerpo de siembra con cuatro posiciones distintas del resorte. Este adaptador fue configurado de acuerdo con los resultados obtenidos mediante el software de simulación. La Figura 6 muestra el dispositivo con el resorte instalado, en la misma se indican las cuatro posiciones en las cuales puede colocarse el extremo superior del resorte. Estas posiciones relativas al centro de rotación superior del paralelogramo deformable se especifican en la Tabla 1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

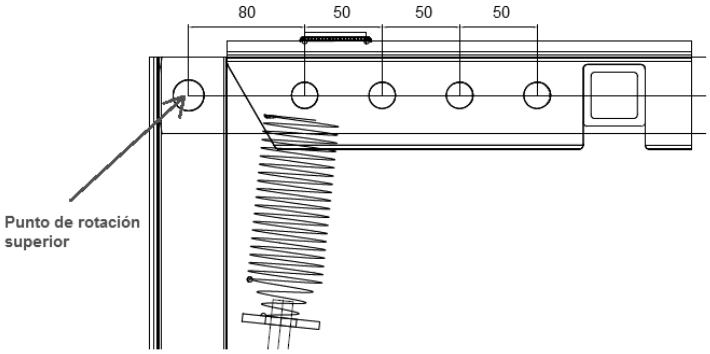


Figura N°6 – Vista del adaptador con las 4 posiciones del resorte

Tabla 1. Distancia del eje de rotación al eje de la varilla soporte del resorte

Caso	Longitud [m]
Posición 1	0.08
Posición 2	0.13
Posición 3	0.18
Posición 4	0.23

El pretensado de los resortes se logra mediante una varilla roscada con la cual, mediante el ajuste de una tuerca en la parte inferior del soporte del resorte, se modifica la longitud inicial del mismo. La Tabla 2 muestra la correspondencia entre las longitudes de precarga y la fuerza inicial del resorte.

Tabla 2. Fuerza inicial en el resorte en función de la longitud de precarga

Longitud [m]	Fuerza inicial [N]
0	0
0.02	1176
0.03	1764
0.04	2352
0.06	3528

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los resultados de los ensayos se muestran en la Figura 6. Los ensayos en la Posición 1 indicaron un comportamiento con poca variación del esfuerzo a lo largo del recorrido, en particular cuando el resorte actuaba sin precarga. Similar situación se observa para una precarga de 392 N.

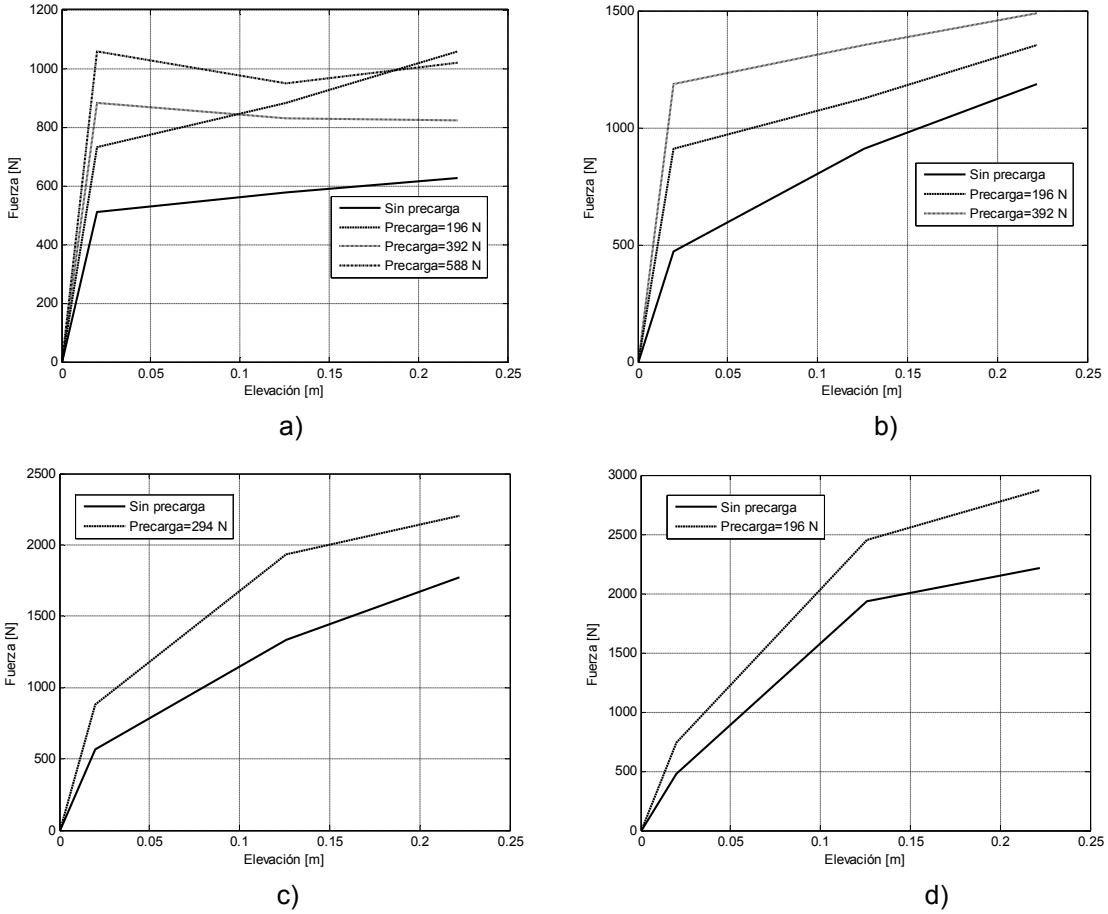


Figura N° 6. Fuerza sobre el terreno a) Posición 1. b) Posición 2. c) Posición 3 d) Posición 4.

El incremento en la distancia entre el punto de sujeción del resorte y el punto de rotación superior generó mayores deformaciones en el resorte y mayores esfuerzos en el mismo. El último ensayo con 0.020 m de precarga en la Posición 4 produjo deformaciones permanentes en el resorte.

3.3. Comparación de resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación

El objetivo de la comparación de los resultados experimentales con los de la simulación fue validar el software desarrollado en la etapa anterior. Esto permite utilizarlo en futuros estudios para efectuar un estudio más detallado del funcionamiento del conjunto evaluar otras alternativas al

ISBN: 978-987-1676-63-7

diseño. Los puntos de comparación que se eligieron son representativos de las curvas para las cuatro posiciones. Estos se especifican en la Tabla 3:

Tabla 3. Ejemplo de Tabla insertada en el Texto

Parámetro	**Precarga [N]**	
	Caso1	**Caso2**
Posición 1	0	2352
Posición 2	0	2352
Posición 3	0	1764
Posición 4	0	1176

En la Figura 8 se muestran los datos experimentales y los resultados de la simulación para el caso sin precarga.

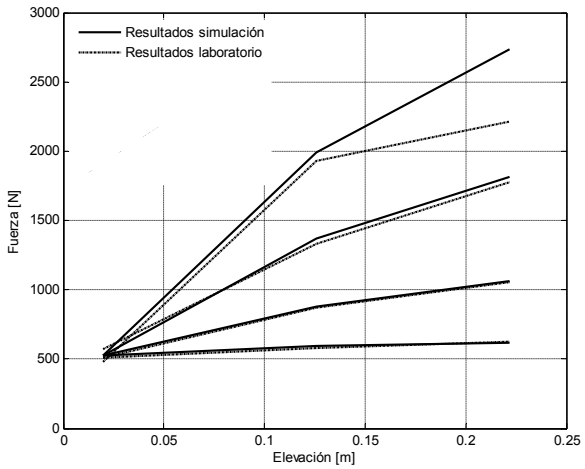


Figura N° 8. Comparación de resultados para el caso sin precarga y cuatro posiciones del resorte

La comparación de datos mostró una buena correspondencia entre los datos experimentales de ensayos y aquellos obtenidos mediante el programa de simulación. Los resultados muestran en todos los casos diferencias menores al 5% entre ambos valores, con excepción de los puntos de mayor elongación del resorte que corresponden a la Posición 4 ya que el modelo del resorte incorporado al programa es lineal y acotado a pequeñas deformaciones. Los ensayos muestran que la rigidez es variable y disminuye para valores de elongación excesivos, esto es, un comportamiento no lineal para grandes deformaciones. Igualmente se puede concluir que el programa de simulación desarrollado es válido para el estudio del dispositivo, aunque en un futuro sería deseable incorporar las características no lineales propias de grandes deformaciones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSIONES

La evaluación de los cuerpos de siembra muestra el productor agropecuario no regula la carga sobre los cuerpos de siembra para cada lote y menos para cada ambiente. Generalmente la carga, o sea, la posición de los resortes se fija una vez y luego ya no se corrige.

Los cuerpos de siembra tienen limitadores de recorrido tanto para la posición más baja como para la carrera ascendente. Se han observado algunos topes golpeados debido a que el recorrido o rango de flotación es insuficiente para ese ambiente. La carga variable, en lotes ondulados, hace que las ruedas limitadoras de la profundidad sean las primeras en romperse.

Para contemplar esta situación, los equipos se proveen con ruedas anchas para disminuir la compactación del suelo, aunque es deseable que posean ruedas limitadoras de la profundidad angostas para un mejor copiado del terreno y la profundidad de siembra se mantenga uniforme.

Mediante este trabajo se obtuvo una alternativa a los equipos comerciales que logra mejorar la condición respecto de mantener la carga constante. El dispositivo que se propone instalar muestra su mejor performance en la Posición 1. Puede ser utilizado en la mayoría de las sembradoras que se observan en el mercado a partir de ajustes para cada caso determinados a partir de resultados provistos por el software de simulación.

REFERENCIAS

[1] Gomez Macpherson, H., Publicaciones FAO “Factores de manejo del cultivo” –ISBN 92-5-304488-8. Año 2001

[2] Márquez, L. Curso Maquinaria Agrícola (SSD) – Bellota Agrisolutions. 2004.

[3] Carlos R. Baumer, Aapresid, Sembradoras y Fertilizadoras para Siembra Directa. Arg. 2000

[4] Martínez Vilela, Gil Rives, Prado. Ruiz-Santaella, Torres, González Fernández. Asociación Española Agricultura De Conservación/Suelos Vivos. Ficha técnica N°4. Córdoba España. 1999.

[5] Hernanz, J.L. Sembradoras a chorrillo de siembra directa. Vida Rural nº49. 1997

[6] Gil Ribes, J. La maquinaria agrícola en el laboreo de conservación. Capítuo IX. En: Agricultura de Conservación: Fundamentos Agronómicos, Medioambientales y Eco. 1997

[7] ASAE Estándar S477 DEC93. Terminology for soil engaging components for conservation tillage planters, drill and seeders. St Joseph. Michigan EEUU. ASAE Standars 1995

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE APLICACIÓN DE FOSFATIZADO DE ZINC EN CONEXIONES ROSCADAS DE COMPONENTES DE LA SARTA DE PERFORACIÓN

Darío Mainini [1], Leandro Ramoska [1], Damián Campos [1] y Germán Keil [1].

[1]Dpto. Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina
correo-e: dariomainini@gmail.com
leandro.ramoska@fain.uncoma.edu.ar
damian.campos@fain.uncoma.edu.ar
german.keil@fain.uncoma.edu.ar

RESUMEN

Dentro de las principales actividades de la explotación petrolífera primaria, se destaca el proceso de perforación. Este proceso se lleva a cabo utilizando equipos específicos, entre estos el llamado conjunto de fondo o sarta de perforación (BHA, *Bottom Hole Assembly*). El mismo está formado por una serie de elementos cilíndricos de transmisión mecánica de fuerza, entre la mesa de perforación y la herramienta o trepano.

Entre los componentes más importantes del BHA podemos mencionar: los *Drill Pipes, Heavy Weight Pipes, Drill Collar´s*; estos se unen entre sí a través de conexiones roscadas. Dichas uniones se encuentran expuestas a solicitaciones de montaje y servicio variables. La vida útil de los componentes se ve afectada principalmente, por fenómenos de corrosión y abrasión.

Por lo expuesto, resulta imperativo mitigar el efecto de los fenómenos indeseables mencionados. Para llevar adelante dicha tarea es de práctica habitual en la industria, realizar tratamientos superficiales de protección a las uniones roscadas.

Entre los recubrimientos más utilizados podemos mencionar el fosfatizado de zinc, que entre otras ventajas proporciona: protección contra la corrosión y el desgaste por abrasión, por retención del lubricante en su porosidad superficial. Sus costos son relativamente inferiores a otros procedimientos. La aplicación del mismo debe cumplir con los requerimientos normativos vigentes.

En el presente trabajo, se exponen las distintas etapas desarrolladas en el proceso de diseño de una máquina de aplicación de fosfatizado de zinc, para conexiones roscadas de los elementos de la sarta de perforación. Se incluye una fase de prototipeado que permitió validar, mediante las pruebas realizadas, las suposiciones asumidas en etapas tempranas del proyecto.

Palabras Claves: *Fosfatizado de Zinc, Sarta de Perforación, Conexiones Roscadas.*

Área Temática: D- Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas.

1. INTRODUCCION

Los conjuntos de perforación de fondo utilizados en la industria petrolera, y especialmente sus conexiones roscadas, se encuentran sometidos a rigurosas condiciones de servicio, las cuales se ven agravadas por fenómenos de corrosión y desgaste. A los efectos de mitigar dichos fenómenos, es de práctica habitual, aplicar recubrimientos protectores en las uniones roscadas.

El fosfatizado de zinc es uno de los recubrimientos que más se utiliza en la industria, específicamente en el sector de inspección y reparación. Esto se debe principalmente a que, entre otras ventajas proporciona protección contra la corrosión, evita el desgaste por abrasión al retener el lubricante en su porosidad superficial, con costos relativamente inferiores a otras aplicaciones superficiales. Dicho tratamiento consiste en bañar la pieza de acero con una solución acuosa de Ácido Fosfórico y Sulfato de Zinc (soluto aprox. 5 a 10 % en peso), a una temperatura alrededor de los 80 °C durante 30 min aproximadamente. Cabe mencionar que algunos baños disponibles en el mercado, incorporan aditivos y sustancias adicionales que mejoran su desempeño.

La aplicación del mismo debe cumplir con los requerimientos normativos vigentes del sector [1]. Estos especifican que las conexiones roscadas de componentes de la sarta de perforación (*Drill String Component´s*) deben recibir el tratamiento de fosfatizado en la conexión roscada interior (*BOX*) y exterior (*PIN*), Figura 1, sobre una longitud no mayor a 300 mm en cada extremo.



Figura 1: Conexiones tipo *PIN* y *BOX*.

Es de práctica usual en las empresas del sector, aplicar la solución fosfatizante por inmersión. El tiempo de aplicación del mismo oscila entre 30 y 40 minutos. El principal limitante para aplicar el tratamiento de esta forma se debe a que las barras de perforación (*Drill pipe SAE4145, Heavy Weight y Drill collar SAE4140*) cuentan con una longitud aproximada de 9,5 m y su peso oscila entre los 300 y 2300 Kg.

El presente trabajo surgió de la necesidad de una Empresa que opera en la Cuenca Neuquina, de brindar este tipo de servicio (Fosfatizado de Zinc), para superar las limitaciones precedentemente detalladas y optimizar los procesos involucrados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. DESCRIPCION DEL PROCESO DE FOSFATIZADO

El Fosfatizado de Zinc es un proceso de acabado y pre-tratamiento, ampliamente utilizado en la protección de superficies de metales ferrosos y no ferrosos.

Desde el punto de vista de las reacciones químicas podemos mencionar que, al formarse el revestimiento, una porción del metal base se convierte en uno de los componentes de la película protectora resultante. Dicha película es mucho menos reactiva que la superficie del metal original, la cual confiere un potencial igual a la superficie metálica, neutralizando el potencial local, previniendo sitios de corrosión galvánica. En la Figura 2, se pueden observar imágenes tomadas con un microscopio electrónico de barrido (MEB) de una muestra del metal base y otra luego de la aplicación del fosfatizado.

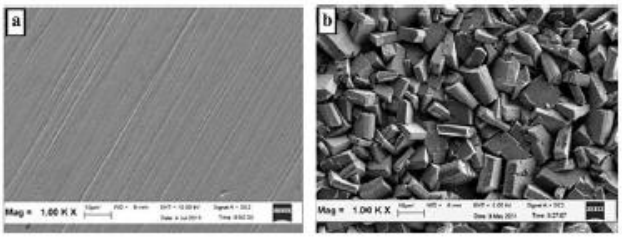


Figura 2: Imagen MEB del metal base (a) y fosfatizado de Zinc (b).

El recubrimiento se forma como resultado de una reacción topo-química (reacción de inicio localizado en sitios micro-catódicos). Todas las soluciones de fosfatizado convencionales están basadas en agua y ácido fosfórico con uno o más iones de metales pesados metálicos, que contienen esencialmente ácido fosfórico libre y fosfatos primarios de los iones metálicos contenidos en el baño. Cuando se somete una superficie de acero a dicho proceso, la reacción se inicia por el ácido fosfórico libre presente en el baño, en los micro-cátodos presentes en el sustrato metálico. Tomando en cuenta las expresiones desarrolladas por S. Narayanan [2], se observa en la Figura 3, la secuencia total y las reacciones del proceso de recubrimiento.

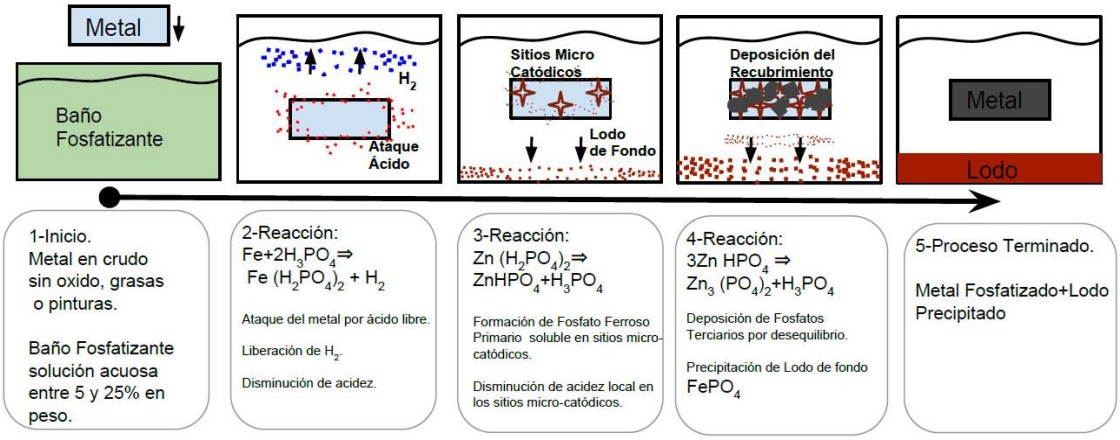


Figura 3: Proceso de fosfatizado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los requerimientos normativos [1], mencionan la importancia de aplicar el recubrimiento de fosfatizado en las conexiones, y brindan en forma general especificaciones para su aplicación. Adicionalmente, se especifica que debe existir un procedimiento detallado del proceso de fosfatizado en el sitio de tratamiento. Dicha documentación debe contar mínimamente con la siguiente información:

a) **Control de la solución:** se debe tener en cuenta principalmente la temperatura del baño y concentración de la solución de fosfatizado.

b) **Preparación de la conexión:** la superficie debe estar libre de óxido, residuos y lubricantes.

c) **Listado de etapas del proceso:** especificar paso a paso y de manera detallada, todas las operaciones requeridas para un tratamiento de fosfatizado.

d) **Criterios de aceptación y rechazo del fosfatizado:** el recubrimiento debe resistir una prueba de adherencia, que consiste en rayar repetidas veces la superficie tratada con una goma de borrar de dibujo. Al observar la superficie en cuestión, esta debe contener una marca de goma adherida sin haber descubierto la superficie del metal base.

   Luego de la aplicación de la capa lubricante, la superficie debe ser sometida a una inspección visual con una lupa de 30X. En dicha inspección, debe visualizarse una superficie con la coloración esperada (gris oscuro o gris claro homogénea), sin presentar puntos claros ni marcas que muestren la superficie del sustrato sin tratar.

   Adicionalmente pueden realizarse pruebas por inmersión de resistencia a la corrosión, según ASTM G44.

e) **Confirmación de calidad del proceso:** pruebas periódicas para verificar que el sistema de fosfatizado ofrece resultados aceptables y repetibles. Esto podría incluir procedimientos, mediciones y registros. Adicionalmente, esta norma incluye recomendaciones sobre inspección post-tratamiento, con criterios generales para verificar la adherencia, superficie oxidada, coloración y textura.

Por sugerencia de los responsables del área de Inspección de la Empresa, se adoptó la solución de fosfatizado denominada Z-5 [4]. Se asume que la misma es la adecuada para dicha aplicación, y se utilizan los datos técnicos indicados en la Tabla 1, facilitados por el proveedor.

Tabla 1: Características del recubrimiento.

Característica	Rango de Valores	Unidad
Coloración	Gris Claro-Gris Oscuro	-
Cambios dimensionales aproximados	1	μm
Peso del Recubrimiento	1 a 15	gr/m^2
Porosidad Promedio	0,5 a 2	%
Resistencia Test de inmersión ASTM G44	13	gr/m^2
Adherencia aproximada Test ASTM G99	0,5 a 0,8	mm^3

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. DESARROLLO

Conforme a las buenas practicas deben aplicarse técnicas sistemáticas para la elaboración y evaluación e implementación de proyectos de ingeniería. Las mismas se fundamentan en consideraciones realizadas por diferentes autores. En nuestro caso se consideraron las propuestas realizadas por Ulrich y Eppinger [4] y Pahl & Beitz [5], que se sintetizan en el diagrama de bloques presentado en la Figura 4.

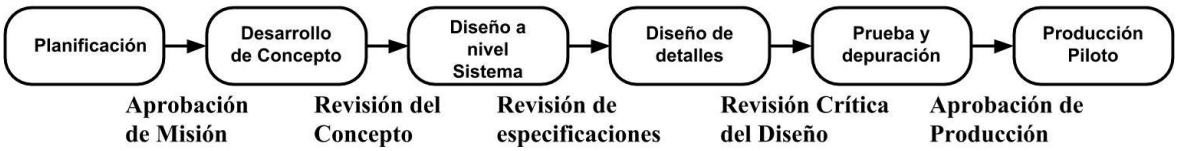


Figura 4: Etapas de desarrollo para un proyecto genérico.

El desarrollo de la máquina, se inició con la depuración de la información bibliográfica y la detección de las necesidades de los usuarios obtenidas a través de entrevistas y encuestas. Con dicha información se establecieron las estructuras funcionales. En la Figura 5 se puede observar el diagrama de caja negra, en el cual se identifican las funciones principales de la máquina.

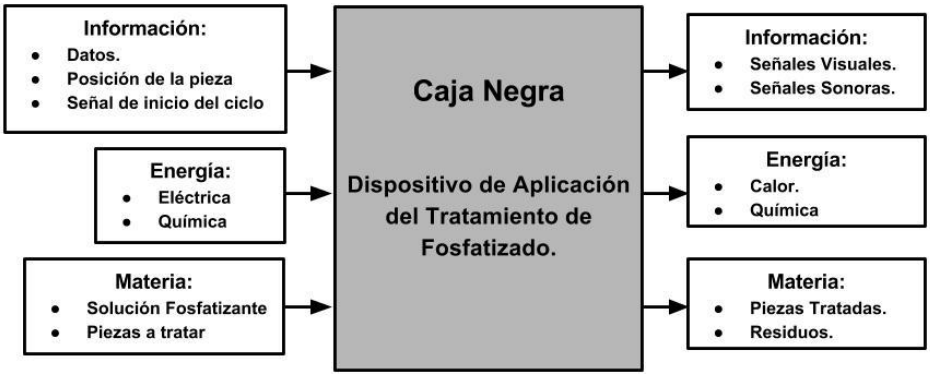


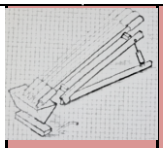
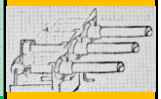
Figura 5: Diagrama Caja Negra.

Basados en la información previa, podemos resaltar que existen subfunciones con mayor grado de criticidad o importancia. Entre estas podemos resaltar las siguientes: almacenar la solución fosfatizante, calentar la misma hasta la temperatura de servicio, aplicar el recubrimiento y recuperar la solución aplicada.

Mediante una tormenta de ideas y croquizado básico, se generaron numerosas alternativas de solución. Cada una de ellas satisfacía parcial o totalmente el conjunto de subfunciones requeridas para la operación deseada. Para escoger la variante que mejor cumplía con los requisitos de la máquina, se utilizó el método de la Matriz de Decisión [3]. Este método evaluativo, consiste en crear una tabla donde se muestran los diferentes conceptos y los criterios de selección. Como se

puede observar en la Tabla 2, el concepto seleccionado contempla el sistema de aplicación de la solución fosfatizante por rociado.

Tabla 2: Matriz final y concepto seleccionado.

Criterio de Selección			Seleccionado 	
Riesgo de Derrame	0,00	0,00	0,18	-0,18
Costo energetico	0,00	0,00	0,00	0,00
Costo del dispositivo	-0,09	-0,09	0,00	0,09
Volumen de Quimico	-0,09	0,00	0,09	0,00
Facilidad de Fabricacion	-0,09	0,09	0,00	0,00
Riesgo de Caida de Objetos	-0,14	-0,14	0,14	0,14
Multiples Tuberias a Tratar	0,14	-0,14	0,14	0,14
Posibilidad de Automatizacion del proceso	0,00	-0,09	0,09	-0,09
Instalaciones Adicionales	-0,05	-0,05	0,05	0,05
Incertidumbres de Calidad del Proceso	0,09	0,09	-0,09	0,09
Sumatoria	-0,23	-0,32	0,59	0,23

Independientemente de lo señalado y previo a la decisión final en cuanto a la selección definitiva del concepto solución se analizaron y evaluaron los puntos débiles detectados en el análisis previo:

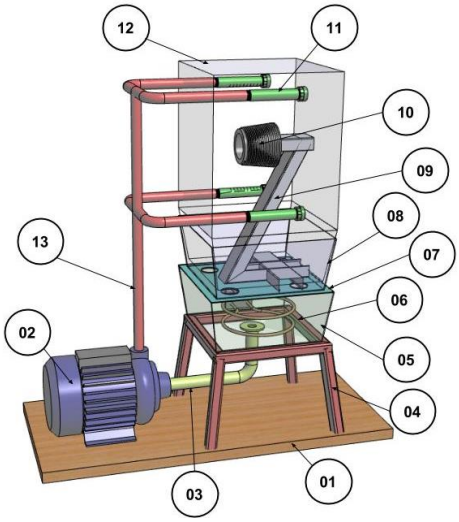
a. Incertidumbre sobre la calidad final del recubrimiento.
b. Posibilidad de fabricación con la tecnología disponible en la región.
c. Disponibilidad en el mercado de los materiales requeridos.
d. Confiabilidad y durabilidad del dispositivo.
e. Costo de fabricación.

Con el objetivo de reducir las incertidumbres planteadas precedentemente en relación al concepto seleccionado, el equipo de trabajo se propuso construir un prototipo funcional de rociado. De esta forma se intentó obtener información útil de primera mano, y decidir fehacientemente sobre la viabilidad del proyecto.

Con el objetivo de facilitar el manipuleo de las piezas durante las pruebas, se optó por cortar los extremos de las tuberías dado que estos segmentos son las conexiones propiamente dichas a tratar.

En la Figura 6 se representan esquemáticamente los principales componentes del prototipo, que permite visualizar la aplicación de la solución fosfatizante sobre las piezas a tratar.

ISBN: 978-987-1676-63-7



N°	Denominación
01	Base de FibroMelamina 18 mm
02	Bomba Periferica-370 Watts
03	Cañeria de Succión PP
04	Soporte de Depósitos Estructural 20x20mm
05	Deposito Inferior PP 9000cm^3
06	Resistencias Eléctricas Genéricas 1200 Watts
07	Tapa de Deposito PP
08	Depósito Superior PP 9000cm^3
09	Soporte de Pieza Ad Hoc
10	Pieza a Tratar
11	Boquilla de Rociado PP Ad Hoc
12	Mampara PVC Ad Hoc
13	Cañeria de Rociado PP

Figura 6: Componentes principales del prototipo.

Como puede observarse en la Figura 6, en la base del depósito inferior (05) se instalan las resistencias eléctricas (06) encargadas de calentar la solución fosfatizante. El sistema de rociado está compuesto por boquillas (11) montadas sobre cañerías de polipropileno (13) y una bomba periférica (02). El depósito superior (08) recupera la solución que ha sido rociada y canaliza el fluido hacia el depósito inferior para recircular el líquido. La sujeción de la pieza es una tarea externa al dispositivo, y se dispone, a tal fin, de un soporte regulable en altura (09).

En la Figura 7, se visualiza la cañería de succión del fluido en la parte inferior del depósito. Esta es una configuración recomendada para todos los sistemas de bombeo convencionales. En el prototipo dicha configuración de succión positiva es imperativa, ya que el margen para evitar la cavitación es nulo, debido a que el fluido se encuentra a temperaturas del orden de los 80-90 °C.



Figura 7: Disposición de cañerías y depósitos del prototipo construido.

Una vez construido el prototipo se procedió a realizar diferentes pruebas de funcionamiento, aplicando la solución fosfatizante a las muestras seleccionadas. En las mismas se consideraron diferentes temperaturas de aplicación, concentración del baño y grados de limpieza de la muestra.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El nivel de cobertura y mojado de las piezas se determinó a priori, a partir de la observación directa de la superficie a tratar. En la Figura 8 (a) se observa que el espesor de capa de fluido logrado es de aproximadamente 4 mm. Dicho espesor se obtuvo de la observación de los fotogramas de video, obtenidos durante las pruebas.

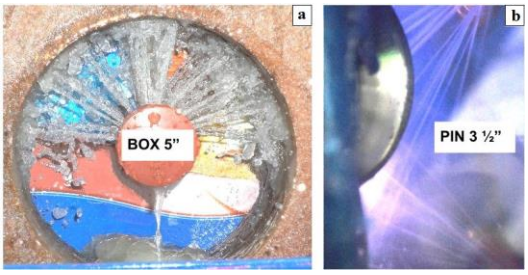


Figura 8: Cobertura de Superficies BOX (a) y PIN (b).

En la Figura 9 se observan tres series de datos, correspondientes a diferentes temperaturas seleccionadas como objetivo de control.

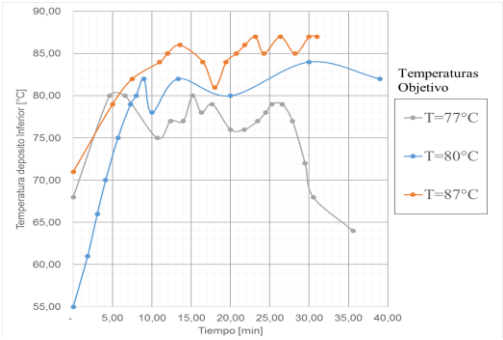


Figura 9: Datos de temperatura vs tiempo obtenidos con el prototipo.

En la Tabla 3, se comparan las variables de interés utilizando los datos experimentales obtenidos y los modelos teóricos, detallados anteriormente.

Tabla 3: Comparación de datos experimentales con el modelo teórico.

	Calor cedido al medio [Watt]	Caudal de Reposición [Kg/seg]	Tiempo de Calentamiento [min]
Modelo Experimental	316	2,3	20
Modelo Teórico	574	2,45	10,6

En cuanto a las diferencias observadas por el tiempo de calentamiento, cabe mencionar que el modelo de cálculo teórico, sólo contempla la masa de agua contenida en el recipiente sin tomar en cuenta el calor que requiere toda la masa del prototipo para ponerse a régimen.

Como se puede observar en la Figura 10, luego de realizada la prueba de adherencia, sobre una de las muestras tratadas exitosamente, no se evidencia desprendimiento del recubrimiento.

ISBN: 978-987-1676-63-7

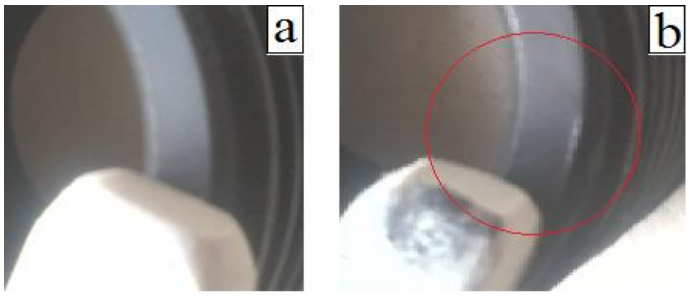


Figura 10: Prueba de adherencia. Antes (a) Después (b).

Luego de la aplicación de la capa lubricante, se complementa la inspección visual utilizando una lupa de 30X. En la Figura 11, podemos observar una superficie homogénea con la coloración esperada (gris oscuro o gris claro, sin puntos claros ni marcas que muestren la superficie del sustrato sin tratar).



Figura 11: Inspección visual aumento de 30X.

Las pruebas detalladas anteriormente, son las que alcanzaron mejores resultados en cuanto a los requerimientos mínimos de uniformidad y coloración. En contrapartida, algunas de las muestras tratadas presentaron diversas fallas e irregularidades en el recubrimiento. En la Figura 12 se observa el detalle de una superficie que no cumple con los requerimientos mínimos.



Figura 12: Detalle resaltando falla de recubrimiento.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las superficies como la observada en la Figura 13 (aplicación defectuosa) surgen por una combinación de alguno de los siguientes factores:

a) Utilización de boquillas de orificios de 0,75 mm o 1 mm, resultando en un rociado muy enérgico con formación de gotas muy pequeñas que rebotan contra la superficie de la muestra.
b) Aplicación del recubrimiento sin llegar a la temperatura prefijada.
c) Iniciación del rociado simultáneamente con el ciclo transitorio de calentamiento, lo que produce una carga térmica adicional, disminuyendo la temperatura de la solución. Esto produce una reacción temprana indeseada en la superficie, que aísla el sustrato metálico del tratamiento.
d) Acortamiento excesivo de la duración del ciclo de aplicación (menor a ocho minutos).
e) Aplicación del producto sobre piezas sin la preparación adecuada, dejando restos excesivos de lubricante, oxido y/o humedad.
f) Utilización de concentraciones inferiores al 5% en volumen.

Una vez validado el concepto solución seleccionado a través de las pruebas realizadas en el prototipo físico focalizado, se realizó la ingeniería básica y de detalle ajustadas a las necesidades específicas de la Empresa. La planta de inspección y reparación de tuberías de perforación tiene una playa de maniobras, en la cual, las tuberías son trasladadas de una zona a otra utilizando un autoelevador. Cada lote de tuberías, se almacena en racks destinados a tal fin.

Para facilitar el posicionamiento de las conexiones a tratar dentro de la máquina, se proyectó un conjunto de ruedas que facilitan el desplazamiento de todo el dispositivo sobre un par de rieles fijados al contrapiso. En la Figura 13 se puede observar el detalle del posicionamiento de las tuberías en la máquina dentro del sector de trabajo, y un esquema de la misma con los cuatro bloques físicos principales que agrupan diferentes subfunciones (Módulo I: Estructura; II: Almacenamiento de la solución; III: Rociado y IV: Sistema de Control).

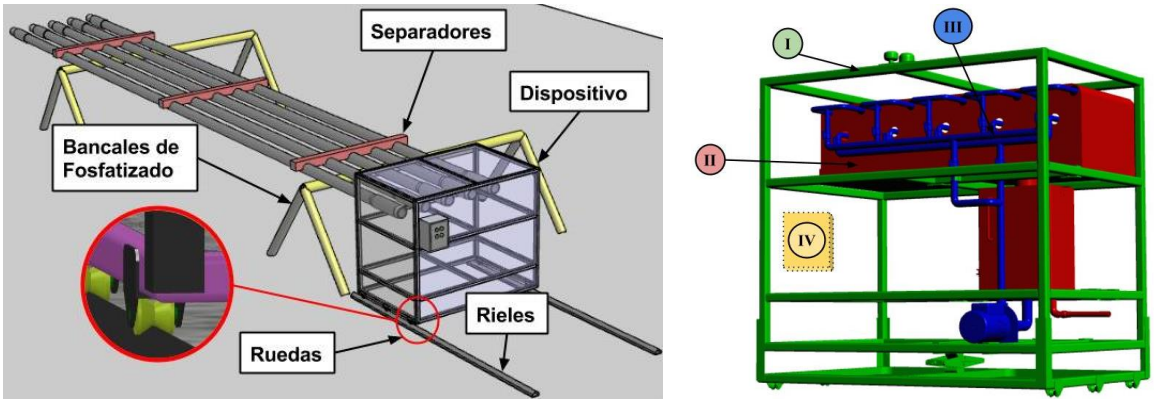


Figura 13: Sector de trabajo y esquema general de la máquina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Tabla 4, se presentan las especificaciones técnicas ajustadas de la máquina. Cabe destacar que las mismas son el resultado de un proceso de refinamiento de la información obtenida en las etapas anteriores y las consideraciones expuestas en el diseño preliminar. Las mismas son las especificaciones más importantes y fueron definidas durante la etapa de prototipado y pruebas.

Tabla 4: Especificaciones Técnicas Ajustadas de la Máquina.

Descripción	Valores	Unidad
Cantidad de conexiones a tratar simultáneamente	5	-
Tipo de conexiones	PIN/BOX	
Control de temperatura	Automático	-
Control de rociado	Automático	-
Alimentación de red	380	Vca
Consumo máximo de potencia	8	KW
Potencia calefactora	6	KW
Caudal máximo	120	l/min
Presión de circulación	1,5	bar
Rango de temperatura de trabajo	60 a 95	°C
Capacidad del depósito de calentamiento.	40	l
Duración máxima del ciclo calentamiento	40	min.
Duración máxima del ciclo completo de trabajo	50	min.

4. CONCLUSIONES

Con el presente trabajo se dio cumplimiento a los requerimientos de la Empresa, referenciados a la normativa de aplicación, siendo una oportunidad para mejorar la calidad de los procesos tecnológicos involucrados, ampliamente utilizados en la industria.

Dentro de la metodología de proyecto utilizada, el prototipo se constituyó en una valiosa herramienta conceptual y de validación de los modelos teóricos aplicados.

Los resultados experimentales obtenidos con las muestras de escala real, cumplieron de manera satisfactoria las pruebas de calidad requeridas por la normativa.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] “Standard DS-1” Vol. 3. T H Hill Associates Inc. Fourth Edition May 2012.

[2] “Surface pretreatment by phosphate conversion coatings a review” T.S.N. Sankara Narayanan National Metallurgical Laboratory.

[3] “Hoja de datos Técnicos, Fosfatizante Z-5” MEDIOAMBIENTE.

[4] “Product Design and Development”, K. Ulrich, S. Eppinger, Fifth Edition. Mac Graw Hill.

[5] "Engineering Design, A Systematic Approach" Third Edition. G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.H. Grote. Editorial Springer, 2007.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SIMULADOR DE CARGA PARA BANCO DE ENSAYOS DE COJINETES HIDRODINÁMICOS

Claudio E. Merelli [1,2,3], Daniel O. Barilá [2], Gustavo G. Vignolo [1,2,3] y Lidia M. Quinzani [3]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur,
Av Alem 1253 – 8000 – Bahía Blanca - Buenos Aires, ARGENTINA
correo-e: cemerelli@plapiqui.edu.ar.
[2] Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Facultad de Ingeniería,
Ruta Prov. Nº 1, Km. 4 – 9000 – Comodoro Rivadavia - Chubut, ARGENTINA
[3] Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI), Universidad Nacional del Sur – CONICET
Camino La Carrindanga km. 7 – CC 717 - Bahía Blanca - Buenos Aires, ARGENTINA

RESUMEN

Los cojinetes hidrodinámicos son elementos que se utilizan para soportar rotores de máquinas que requieran una gran vida útil y se encuentren sometidos a altas cargas e impactos. Son parte fundamental de un sinnúmero de equipos, de las más diversas aplicaciones y potencias. La determinación analítica y numérica de los parámetros de flujo del lubricante entre el eje y el cojinete son herramientas esenciales a la hora de diseñar o estudiar la influencia de tales dispositivos. Sin embargo, las resoluciones analíticas son muy limitadas y los métodos de simulación deben validarse con resultados experimentales. Dada la dificultad para encontrar datos de ensayos útiles para probar estas formulaciones físico-matemáticas y, como parte de un proyecto integral de estudio de cojinetes hidrodinámicos, se diseñó y construyó en una primera etapa un banco de ensayo con el fin de medir presión en la película fluida y temperatura del cojinete, como así también la posición del eje y todas las cargas que se encuentran presentes (Fuerza vertical, horizontal y torque). Concluida esta etapa y habiendo dotado al banco únicamente con la capacidad de aplicar cargas constantes sobre el rotor, se dio comienzo a una nueva instancia de desarrollo, motivo del presente trabajo, para ampliar tales posibilidades.

Se presenta aquí el diseño de un sistema de carga hidráulico-mecánico-eléctrico con el propósito de simular las condiciones a la que se expone un cojinete en condiciones reales de uso: desbalanceo, cargas variables, cargas constantes, impactos, etc., con un control específico de cada una de ellas.

Se abordan las variantes de diseño evaluadas, los aspectos constructivos, elementos intervinientes, dimensionamiento y cálculo resistente. Asimismo, debido a las elevadas cargas y frecuencias de trabajo, se modeló el sistema de carga junto con el banco de ensayo como un sistema elástico para predecir su funcionamiento dinámico ante las diversas situaciones planteadas.

Palabras claves: *Simulador de carga, cojinetes hidrodinámicos.*

1. INTRODUCCIÓN

Los cojinetes hidrodinámicos son elementos de máquina que se utilizan para soportar rotores sometidos a grandes cargas y que requieran una gran vida útil. Consisten en un conjunto de dos cilindros, uno dentro del otro, separados por una capa de fluido lubricante. Generalmente, el cilindro externo es estático (y también se lo denomina cojinete) y el interno rotatorio (denominado eje, rotor o muñón). La geometría de la película fluida que existe entre ambos (huelgo), sumada a la velocidad que se le imprime al rotor, genera presión por efectos viscosos en el lubricante y le otorga al sistema su capacidad portante. Dado que los cojinetes forman parte de un sinnúmero de máquinas, de las más diversas aplicaciones y potencias, el estudio de su comportamiento y sus condiciones de trabajo resulta un tema de suma importancia. La simulación analítica y numérica del flujo de lubricante entre el eje y el cojinete es una herramienta esencial a la hora de diseñar un cojinete. Sin embargo, los métodos de simulación deben verificarse y ponerse a prueba con sistemas reales en los que se conozcan los valores de las variables simuladas. Dado que en la bibliografía no es sencillo encontrar resultados experimentales aptos para tal fin, se construyó en una etapa previa un banco de ensayo para poder medir todas las variables físicas de interés en la película fluida de los cojinetes [1].

Tabla 1. Nomenclatura

A_i	Área del tramo i	L_i	Largo del tramo i
K_i	Constante elástica del tramo i	r_i	Radio interno del tramo i
E_{conj}	Módulo de elasticidad del conjunto aceite-caño	A_{bom}	Área del actuador bomba
E_c	Módulo de elasticidad de la cañería	E_a	Módulo de elasticidad del aceite
$F_{(\theta)}$	Fuerza generada por la leva y resorte	k_{eq}	Constante elástica equivalente
K_{eje}	Constante elástica del eje	K_{cel}	Constante elástica de la celda de carga
K_{rod}	Constante elástica del rodamiento	K_{res}	Constante elástica del resorte
K_{sh}	Constante elástica del sistema hidráulico	M1	½ masa de aceite+masa del actuador 1
M2	½ masa de aceite+masa del actuador 2	M3	½ masa del eje
M4	½ masa del eje	M5	Masa del porta cojinete
K_{ij}	Coeficiente de rigidez del cojinete en dirección j, debido a fuerza en dirección i	C_{ij}	Coeficiente de amortiguación del cojinete en dirección j, debido a fuerza en dirección i

ISBN: 978-987-1676-63-7

1.1. Descripción del banco de ensayo

El banco de ensayo construido cuenta con un rotor impulsado por un motor, un sistema de almacenamiento y suministro de lubricante, un rodamiento para aplicar la carga ubicado en la mitad del eje y un cojinete instrumentado, como puede verse en las figuras 1.a) y 1.b).

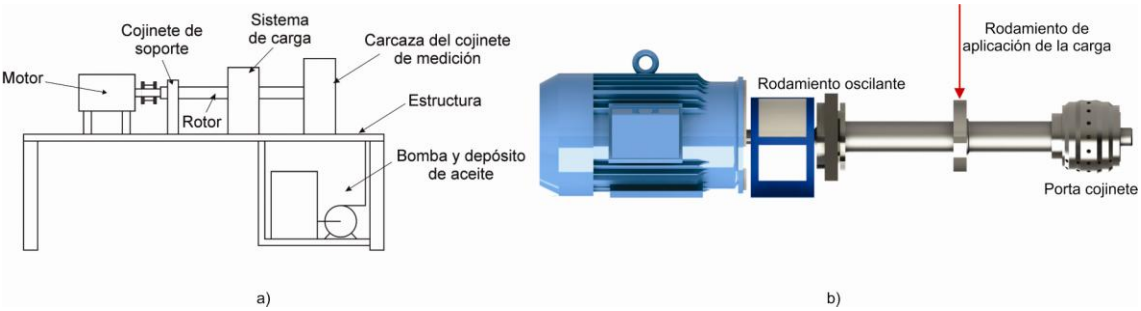


Figura 1. a) Diagrama simplificado del banco de ensayo de cojinetes; b) Vista de perfil en detalle del banco de ensayo.

El detalle de las características operacionales y las variables que pueden medirse en el banco pueden encontrarse en [1].

Los ensayos que se realizan a los cojinetes hidrodinámicos para validar los modelos matemáticos empleados se pueden englobar en dos campos, los estáticos y los dinámicos. En los primeros, al rotor girando se lo somete a una carga que no tenga variaciones en el tiempo. Se deja que el equipo llegue a una condición estacionaria (principalmente de temperatura) y se toman mediciones de: temperatura del cojinete, capacidad portante, par de fricción y presión a lo largo de la película fluida. En cambio, en los ensayos dinámicos se somete al eje a una carga que varíe en el tiempo (en dirección, magnitud o ambas). Esto posibilita no sólo determinar las características ya mencionadas, sino que además permite calcular los coeficientes de rigidez y amortiguamiento del sistema [2]. Estas dos magnitudes físicas poseen características muy particulares en los cojinetes, ya que al aplicar una carga sobre el rotor, este no sólo se mueve en la dirección de aplicación sino que además lo hace en forma perpendicular, describiendo una órbita. A este comportamiento se lo conoce como “acoplado o cruzado” y da lugar a la existencia de coeficientes que no se encuentran presentes en la mayoría de los sistemas físicos. Esto es, rigidez y amortiguamiento en la dirección *i*, para una carga en la dirección *j*, y viceversa.

Cuando los coeficientes de rigidez cruzados son de signos opuestos, el acoplamiento se vuelve desestabilizante produciendo fuerzas que agregan energía a la órbita del eje, resultando en amplitudes muy grandes de desplazamiento que pueden no llegar a ser contrarrestadas por la disipación directa del cojinete [3].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para modelar el comportamiento dinámico de un sistema mecánico se requiere del conocimiento de la respuesta de cada uno de sus componentes ante cargas variables, incluyendo los apoyos. De esta manera, los coeficientes de rigidez y amortiguamiento de los cojinetes son muy importantes a la hora de estudiar las frecuencias críticas de los rotores y la determinación de zonas de posible inestabilidad. Es por ello que este trabajo se basa en el diseño de un equipo tal que pueda ser utilizado en la determinación de todos los parámetros antes mencionados y, además, simular todas las condiciones a la que está expuesto un cojinete. Los requerimientos considerados para ello se desarrollan a continuación.

1.2. Tipos de carga propuestos:

Los tipos de carga requeridos para el sistema, se describen en la Figura 2.

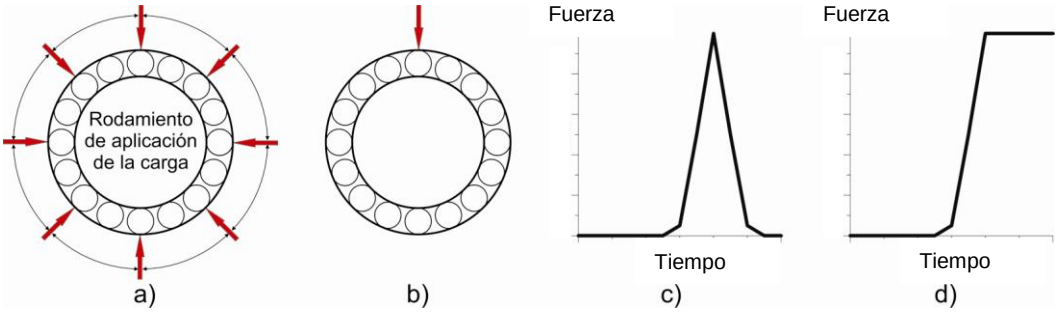


Figura 2: Funciones de carga a cumplir a) Carga rotante con frecuencia de giro independiente a la rotor, y que pueda variar entre 1000 y 6000 RPM, b) Carga constante o variable de igual dirección, c) Carga impacto, y d) Carga escalón.

Todas las opciones mostradas deben contar, además, con ángulo variable de aplicación de la carga en 360° y módulo entre 0 y 1000 kgf sobre el cojinete. Asimismo, no se requiere que actúen en forma simultánea.

2. DESARROLLO

A grandes rasgos, el sistema de carga diseñado cuenta con un motor eléctrico independiente, dotado de un volante de inercia, que mueve excéntricas (levas circulares) las cuales comprimen resortes. La fuerza resultante de la interacción del resorte y la excéntrica es amplificada por un balancín mecánico y luego por acción hidráulica hasta ser aplicada en el rodamiento de carga del banco de ensayo mediante actuadores hidráulicos.

Cada conjunto leva-resorte genera una carga armónica que, en combinación con otras permite logar una carga rotante. Por ejemplo, en los motores asincrónicos trifásicos el campo magnético rotante se logra por la suma de tres funciones sinusoidales desfasadas 120° tanto angular como

geométricamente. Este mismo resultado puede lograrse con dos funciones de la misma naturaleza pero desfasadas 90°. Así, la fuerza rotante en el sistema propuesto se genera combinando dos conjuntos leva-resorte, como se ve en la figura 3.a)

Con este tipo de disposición se obtiene un diagrama de alzada del tipo:

$$Y = seno(\theta)\,\mathrm{e}\ , \tag{1}$$

y, la fuerza que entrega el resorte es entonces:

$$\mathrm{F} = K_{res} e\ \ 1{+}seno(\theta)\ \ . \tag{2}$$

Esta ley de variación es centrada en uno, como se aprecia en la figura 3.b), y no permite generar una carga rotante ya que se precisa de funciones centradas en cero para ello. A fin de ajustarla, se aplica mediante un tercer actuador una fuerza constante opuesta a la que generan ambos resortes para eliminar el valor medio de la resultante, como se ve en la figura 3.c).

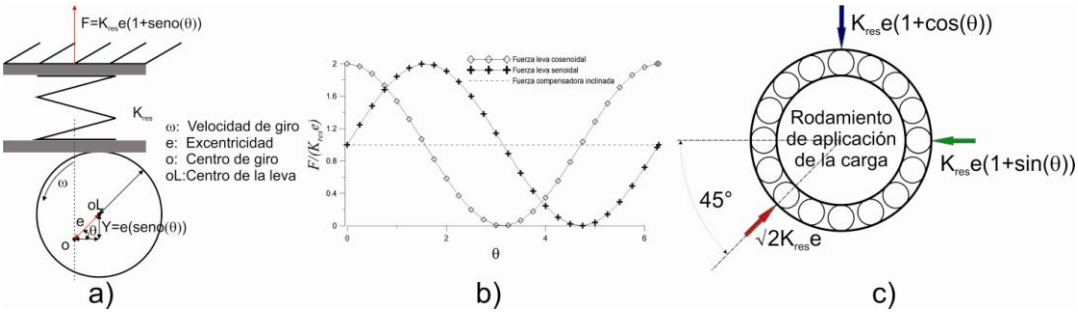


Figura 3. a) Sistema de leva botador; b) Funciones generadas; c) Disposición de cargas.

De esta manera, la fuerza aplicada al descomponerse en la dirección horizontal y vertical logra como resultante una carga senodial y cosenoidal centradas en cero, que al estar desfasadas 90° geométricos producen una carga rotante de módulo constante.

Esta misma disposición puede emplearse para producir una carga variable de forma arbitraria, siendo necesario cambiar la geometría de la leva según la función requerida. Asimismo, puede usarse también para generar las cargas de impacto y escalón, como se describe posteriormente.

Cabe destacar que el hecho de utilizar el sistema de generación de carga con levas excéntricas descrito implica que la fuerza que produce el resorte deba ser del doble de magnitud de la carga máxima deseada. Además, al aplicarse la fuerza en el medio del eje, como se muestra en la figura 1.b), se requiere que la fuerza sobre el rodamiento de carga sea del doble de la máxima sobre el cojinete. Todo ello conlleva a que el resorte deba someterse a 4000 kgf para una carga rotante de 1000 kgf en el cojinete. Estas exigencias, sumadas a las frecuencias máximas de trabajo, resultan difíciles de cumplir para un resorte comercial de un tamaño lógico. Es por ello que se amplifica la

carga producida por el resorte, en una primera instancia mediante un balancín (amplificación mecánica) y luego por un sistema hidráulico.

Teniendo en cuenta las deformaciones adicionales que estas amplificaciones conllevan, se elige un balancín que incrementa ocho veces la carga mientras que el sistema hidráulico lo hace dos veces, por lo que el resorte debe realizar como máximo 250 kgf.

Esta disposición además de ser práctica y de fácil construcción permite mucha versatilidad en lo que se refiere a la manipulación del equipo ya que se puede separar la parte de generación de carga, de la de aplicación mediante el sistema hidráulico. La figura 4.a) muestra la disposición general, mientras que en la figura 4.b) puede apreciarse un modelo tridimensional del sistema propuesto.

Para poder producir el impacto y escalón simplemente se utiliza el sistema ya mencionado enfrentando dos de los cilindros presurizados y luego se los descarga mediante válvulas temporizadas convenientemente como se muestra en la figura 4.c).

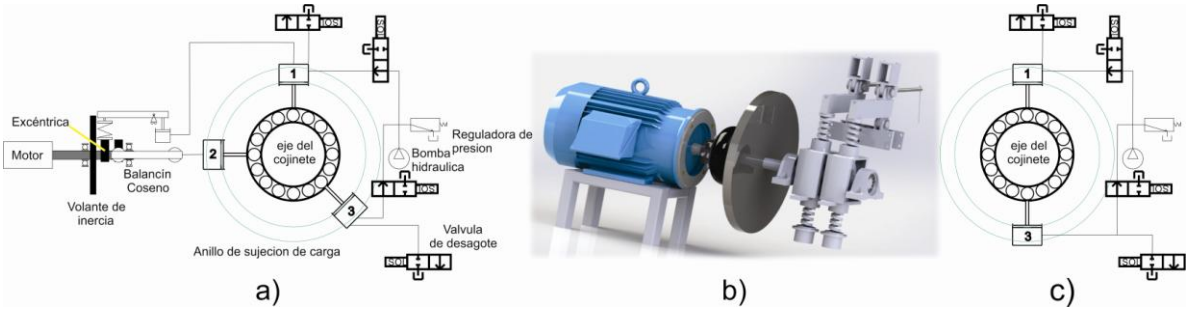


Figura 4: a) Disposición general del simulador; b) Relevamiento 3D del cuerpo generador de carga con balancines variables; c) Disposición carga impacto y escalón.

Los balancines, además de comunicar y amplificar el esfuerzo, son utilizados como controladores de carga al poder variar el punto de pivoteo, como se muestra en la Figura 5). Asimismo, permiten su manipulación en funcionamiento, lo cual es importante para asegurar repetitividad en los ensayos.

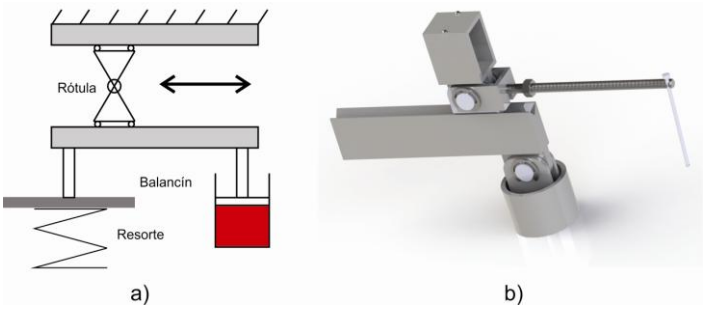


Figura 5: a) Esquema de balancín con punto de pivote móvil. b) Diseño 3D del balancín

2.1. Cálculo de esfuerzos, velocidades y deformaciones

Dado que la fuerza que se genera con la leva y el resorte depende de la rigidez del sistema aguas abajo, es de gran importancia disponer de un modelo matemático que represente el comportamiento del sistema bajo cargas y velocidades especificadas para conocer cabalmente los valores reales de carga alcanzados. El modelo permite, además, obtener una mayor aproximación de las fluctuaciones de velocidad en el generador de carga, las cuales pueden afectar los ensayos a realizar.

Los elementos más representativos del sistema para considerar sus deformaciones se determinan mediante un análisis de orden de magnitud, siendo los más representativos: fluido lubricante, cañería, actuadores, rotor, cojinete y celdas de carga.

2.2. Modelo elástico para la carga vertical

Para realizar la simulación con el sistema de carga trabajando en conjunto con el banco de ensayo se propone el siguiente sistema elástico equivalente. En la figura 6 se puede apreciar el sistema real y el matemático.

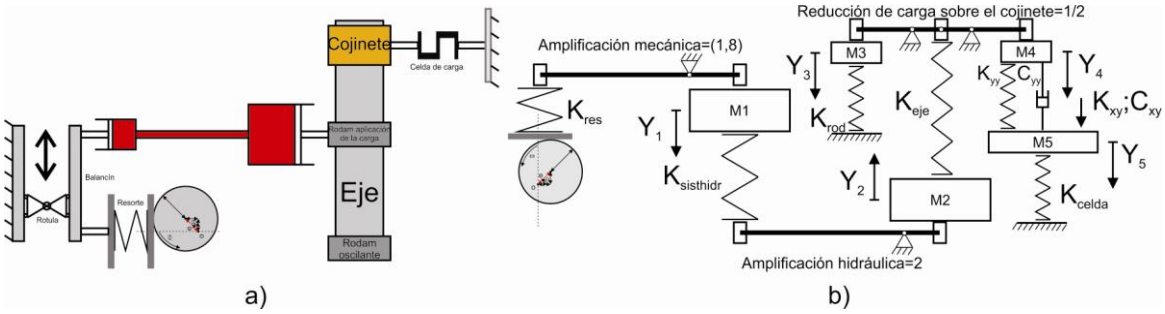


Figura 6: a) Disposición general del simulador y el banco de ensayo; b) Modelo elástico del banco y el simulador.

2.2.1. Sistema hidráulico.

El sistema hidráulico se modela dividiéndolo en 3 sectores diferentes: el actuador bomba, cañería de transmisión y actuador amplificador. Todos ellos trabajan con la misma presión ya que esta es función solamente de la fuerza del resorte y el área del actuador. Es por ello que el circuito hidráulico es equivalente a un sistema de resortes en serie como se puede ver en la figura 7.a), donde la constante de cada uno se determina como:

$$K_{conji} = \frac{E_{conji} A_{bomb}^2}{A_i L_i} \tag{3}$$

Se utiliza la elasticidad del conjunto aceite-cañería ya que se considera la deformación de ambos. Teniendo en cuenta que las tuberías no cumplen con la condición de pared delgada (figura 7.b) y que el aumento de volumen de la cañería es debido a las tensiones tangenciales, dicha elasticidad se calcula como:

$$\frac{1}{E_{conji}}=\frac{1}{E_a}+\frac{2C}{E_c} \quad ; \quad C=\frac{r_e^2+r_e r_i}{r_e^2+r_i^2} \tag{4}$$

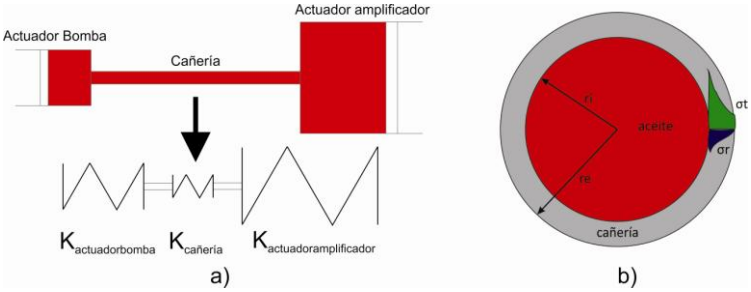


Figura 7. a) Circuito hidráulico simplificado; b) Esquema de cañería de pared gruesa con perfil de tensiones.

2.2.2.Modelado del eje y cojinete

La constante de rigidez equivalente para el eje a flexión con uno de sus soportes imposibilitado de permitir momento flector se determina a partir del cálculo de la flecha, donde:

$$Y=\frac{FL^3}{48EI}\text{, donde } F=KY \rightarrow K_{eje}=\frac{48EI}{L^3} \tag{5}$$

Para lograr un ajuste satisfactorio del cojinete y así poder determinar cuánto influye el corrimiento del eje por la naturaleza hidrodinámica del apoyo en el simulador de carga, se utilizan las constantes de rigidez y amortiguación calculadas para la solución de cojinetes infinitamente cortos en condiciones dinámicas [4]. El método se basa en idealizar a la película de aceite y su reacción

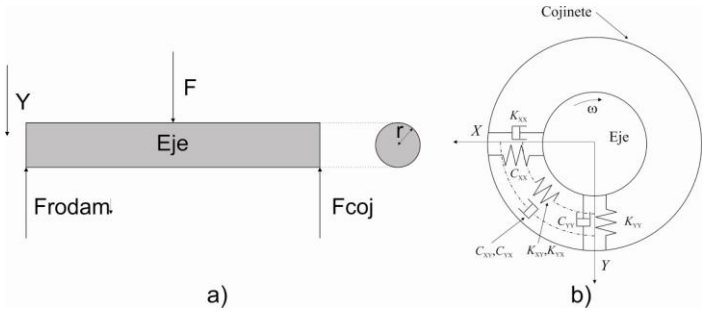


Figura 8. a) Eje del banco de ensayo; b) Equivalente elástico cojinete.

ante cargas variables como si fuesen resortes y amortiguadores no lineales. Básicamente se resuelve la ecuación de Reynolds de lubricación para cojinetes infinitamente cortos agregando un término temporal al huelgo como así también a las condiciones de borde para la velocidad del centro del eje. El modelo en cuestión queda, en forma simplificada como se ejemplifica en la figura 8. b).

Se definen entonces los coeficientes de interés como:

$$K_{ij}=-\left(\frac{dF_i}{dj}\right)_0 \begin{cases} i=X,Y \\ j=X,Y \end{cases} \qquad C_{ij}=-\left(\frac{dF_i}{d\left(\frac{dj}{dt}\right)}\right)_0 \begin{cases} i=X,Y \\ j=X,Y \end{cases} \tag{6}$$

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con todos los parámetros de elasticidad del simulador y del banco de ensayo más un modelo para el generador de carga, es posible resolver el planteo elástico propuesto en la figura 6.b). En este último se consideran las excéntricas para poder determinar la verdadera velocidad de giro de la carga como así también el correcto cálculo de un volante de inercia y la incorporación de resortes de compresión como compensadores de par para la puesta en marcha del sistema. Esto se debe a que los elevados torques instantáneos, figura 9.d), a los que se encuentra el rotor del generador de carga pueden afectar su velocidad angular y así modificar las cargas que se desean producir.

En las figuras 9.a), b), c) se muestran los valores de la órbita del eje del banco de ensayo, el valor real de la carga en el cojinete y la variación de la velocidad de giro del simulador para una condición de carga rotante y otra de carga elíptica determinados a partir de los datos de la tabla 2. Se puede observar cómo se comporta el simulador de carga en funcionamiento con todos los parámetros optimizados tales como: excentricidad de la leva para compensar deformaciones del sistema aguas abajo, masa del botador, cálculo del volante de inercia y cantidad de resortes para estabilizar el par instantáneo bajo las exigencias más altas de fuerza y frecuencias de giro del orden de las 1400 RPM.

Tabla 2. Parámetros de cálculo

Parámetros del cojinete		**Parámetros del simulador**	
C (Huelgo)	0.05mm	1.13	Excentricidad leva (cm)
μ viscosidad (Pa.s)	0.0192	8	Amplificación mecánica leva seno
ω Velocidad del eje (1/s)	400	8	Amplif. mecánica leva coseno carga circular
ϕ diámetro del cojinete (cm)	6	156	$K_{resorte}$ (KN/m)
L largo del cojinete (cm)	1.5	4	Amplif. mecánica leva coseno carga elíptica

ISBN: 978-987-1676-63-7

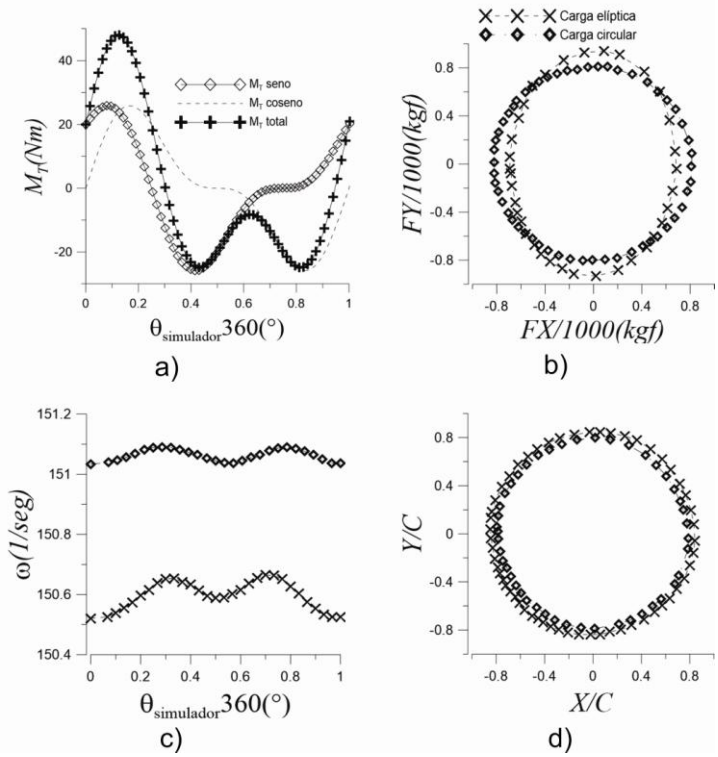


Figura 9. a) Par generador de carga sin compensadores; b) Órbita de la carga sobre el cojinete; c) Velocidad de giro del simulador; d) Órbita del cojinete.

Es importante denotar la gran estabilidad de la velocidad de giro en una condición desfavorable, la fluctuación máxima es prácticamente despreciable. Esto se logra por el aporte del volante de inercia sumado a los compensadores de par. Todo ello, permite asegurar un buen desempeño en el rango de velocidades y cargas planteadas para su diseño.

4. REFERENCIAS

[1] G.G. Vignolo et al, Banco de ensayos para estudio experimental de cojinetes hidrodinámicos, II CAIM, Vol. 67, pp. 2–14, 2014.

[2] Childs D, Hale K. A Test Apparatus and Facility to Identify the Rotordynamic Coefficients of High-Speed Hydrostatic Bearings. ASME. J. Tribol.1994;116(2):337-343. doi:10.1115/1.2927226.

[3] Wilkes JC, Childs DW. Tilting Pad Journal Bearings—A Discussion on Stability Calculation, Frequency Dependence, and Pad and Pivot. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. 2012; 134(12):122508-122508-17. doi:10.1115/1.4007369

[4] Kirk RG, Gunter EJ. Short Bearing Analysis Applied to Rotor Dynamics—Part I: Theory. ASME. J. of Lubrication Tech. 1976;98(1):47-56. doi:10.1115/1.3452771.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN MONOCASCO DE FORMULA SAE MEDIANTE MATERIALES COMPUESTOS

C.M. Napole [1]

[1] Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata
116 S/N e 47 y 48, La Plata, Argentina
correo-e: c.napole@hotmail.com

RESUMEN

La competencia de vehículos de Formula SAE organizada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices permite la construcción de chasis de los vehículos de acuerdo a tres posibilidades: un reticulado de acero cuya geometría es normalizada, un reticulado diseñado de manera personalizada de acuerdo a ciertas condiciones impuestas por el reglamento y un monocasco de material compuesto. Entre los beneficios de utilizar material compuesto para la construcción se encuentran una reducción significativa del peso del vehículo así como también un aumento de rigidez del mismo. En este estudio se propone el diseño del monocasco en fibra de carbono y se aplica un estado de cargas debido a choque frontal, torsión e impacto lateral en el vehículo así como las solicitaciones por parte de las uniones para posteriormente determinar las cargas críticas y proponer una orientación de laminado.

Los cálculos fueron realizados de acuerdo a la teoría clásica de laminados y falla de primera lámina con la verificación de las uniones a distintos estados de falla como arrancamiento, tensión y aplastamiento. Una vez obtenidos los resultados analíticos, se realizó una simulación mediante elementos finitos con las correspondientes condiciones de borde y carga, así como también la geometría de las uniones. Los resultados de las simulaciones mostraron una diferencia que se corresponde al orden de magnitud de los cálculos analíticos. Debido a la influencia de los agujeros por la concentración de tensiones que estos generan, se propone como solución la inclusión de insertos de material isótropo y ply-drops. Aunque el costo de producción resultó ser el quíntuple al de un reticulado de acero, se redujo el peso del chasis en un 54 % y se incrementó la rigidez del vehículo con el fin de asegurar la integridad del piloto.

Palabras Claves: *Monocasco, Formula SAE, Materiales Compuestos*

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio tiene como objetivo el diseño de un monocasco en materiales compuestos para un vehículo de competición de la Sociedad de Ingenieros Automotrices. A pesar de que el costo de los materiales y la mano de obra son elevados (el costo aproximado es de 3200 dólares, mientras que la construcción de un reticulado de acero es de 640 dólares), la motivación para utilizar este tipo de materiales en el diseño de la estructura surge de la buena relación resistencia-peso (ya que se puede reducir el peso en un 50%), lo que permite mantener la integridad del piloto con un mejor efecto en la performance del vehículo.

En cuanto a los cálculos analíticos, estos se realizarán a partir de la teoría clásica de laminados cuyo criterio de rotura a utilizar es el de tensión máxima. Este criterio establece que la falla se produce cundo algún componente de tensión llega al valor máximo uniaxial. Las hipótesis que contempla la teoría clásica de laminados son:

- Un comportamiento ortótropo de las láminas
- El estado de tensiones es plano para cada lámina
- Los desplazamientos, además de ser pequeños con respecto al espesor del laminado, son continuos en todo el laminado (por lo que no hay despegue de láminas) y en el plano del laminado varían linealmente con el espesor.
- Las deformaciones por corte transversal son despreciables, lo cual implica que las rectas normales a la sección transversal permanecen normales luego de la deformación.
- Las relaciones de tensión-deformación y desplazamiento-deformación son lineales.
- La deformación normal transversal es despreciable respecto a las deformaciones longitudinal y perpendicular.

Por otro lado, debido a que la carga de impacto lateral es una carga perpendicular al plano de una placa, se considerará una placa simplemente apoyada y sujeta a una carga puntual fuera del plano. Una carga fuera del plano se puede modelar como una expansión en una doble serie de Fourier [2], resultando la deflexión de acuerdo a la ecuación (1), donde el término a_{mn} depende de parámetros geométricos del laminado.

$$w = a_{mn} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\frac{m\pi x}{a} \sin\frac{n\pi y}{b} \qquad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

En cuanto a las condiciones de borde para el análisis, se considerará la sección trasera del monocasco como empotramiento ya que se asume que los anclajes llevan a dicho estado debido su rigidez y geometría. También se asumirá que el laminado será homogéneo en toda la estructura, es decir que la orientación será la misma, con el fin de facilitar el proceso de fabricación. Los materiales disponibles que se utilizarán para los cálculos son fibras unidireccionales, con propiedades mecánicas de acuerdo a la Tabla **1**, y núcleos de baja densidad.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de las fibras unidireccionales

E1 [Gpa]	E2 [Gpa]	G12 [Gpa]	v12	t [mm]	ρ [kg/m3]	F1t [Mpa]	F2t [Mpa]	F1c [Mpa]	F2c [Mpa]	F6 [Mpa]
100	7	3,5	0,3	0,2	1500	1600	50	600	150	50

Posteriormente se realizará una verificación mediante elementos finitos en Abaqus, configurando el caso con las propiedades mecánicas de los materiales, cargas, criterio de rotura y orientación obtenida en los cálculos analíticos. Además, se tendrán en cuenta ciertas estructuras que deben estar presentes en el monocasco, como los arcos frontales, que deben ser de acero SAE4130.

2. METODOLOGÍA

2.1 Geometría para el análisis analítico

En esta investigación se realizó una modelización de la geometría del monocasco considerándola como una composición de placas planas y discretizada en diferentes estaciones, de acuerdo a la ubicación de los arcos frontales.

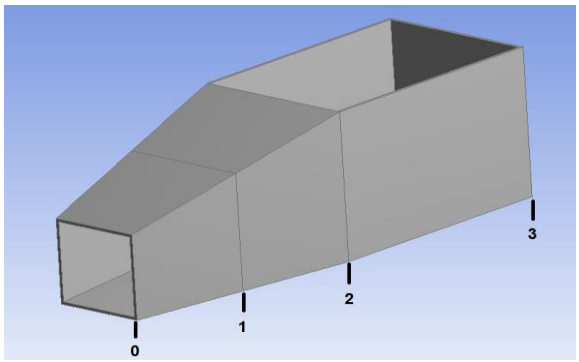


Figura 1: Geometría simplificada para el análisis

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2 Estado de cargas

Los escenarios críticos que han sido considerados son: choque frontal, torsión y cargas laterales. En cuanto al choque frontal, el reglamento establece que es necesario que la fuerza de impacto sea de 150 kN. Además, se asumió que este impacto viene acompañado por una fuerza de frenado de 3185 N junto a una fuerza de 1224 N generada debido al peso del vehículo, siendo el punto de aplicación el portamasas de la suspensión. Estas fuerzas se trasladan a las estaciones 1 y 2 de manera simétrica respecto al eje longitudinal del vehículo.

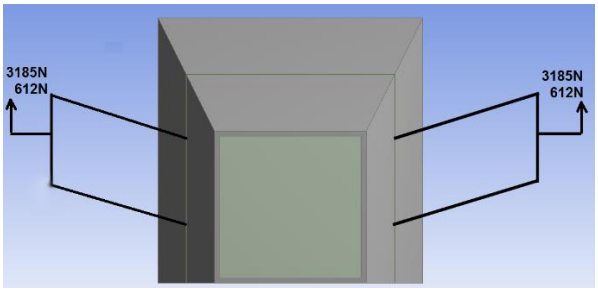


Figura 2: Cargas sobre la suspensión

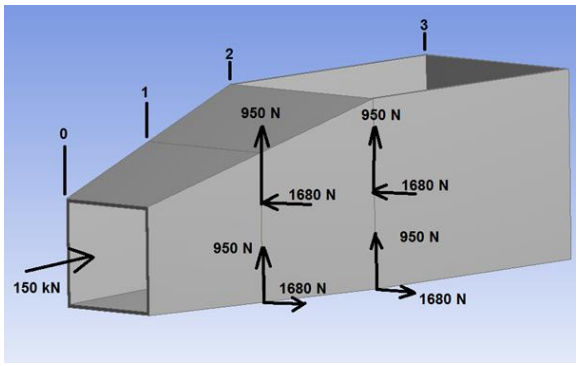


Figura 3: Estado de cargas de impacto frontal

Para el estado de cargas de torsión, se ha propuesto una situación extrema donde la vinculación del mismo con el piso es mediante dos ruedas laterales, lo cual genera fuerzas aplicadas a las estaciones 1 y 2 en el lado izquierdo de la geometría.

ISBN: 978-987-1676-63-7

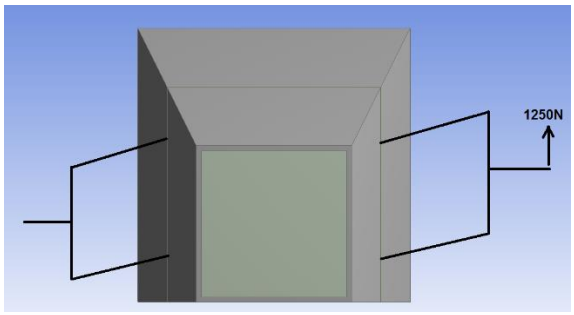


Figura 4: Carga sobre la suspensión debido a la torsión

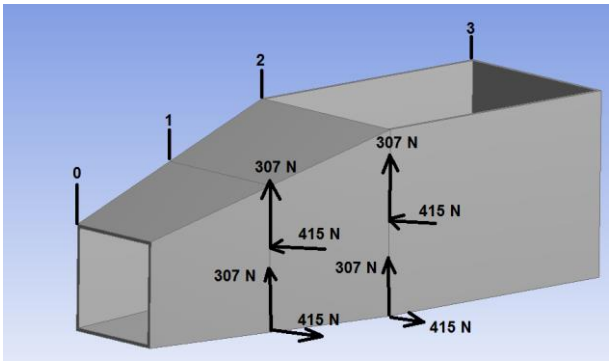


Figura 5: Estado de cargas de torsión

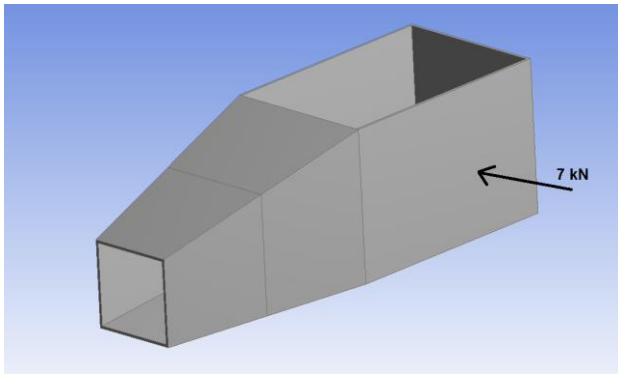


Figura 6: Estado de cargas de impacto lateral

En cuanto a las cargas laterales, el reglamento establece que la carga de impacto es de 7kN aplicada entre las estaciones 2 y 3.

Por último, como requerimiento por parte del reglamento, las uniones con el resto de las estructuras deben tolerar esfuerzos de 30 kN.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3 Geometría para el análisis numérico

En base a las condiciones propuestas, con el fin de verificar de manera computacional los resultados, un modelo de elementos finitos se ha realizado mediante el programa Abaqus. Para la configuración, se han tenido en cuenta los agujeros con sus respectivas medidas y condiciones de borde así como cargas aplicadas y costillas de material isótropo de acuerdo al reglamento.

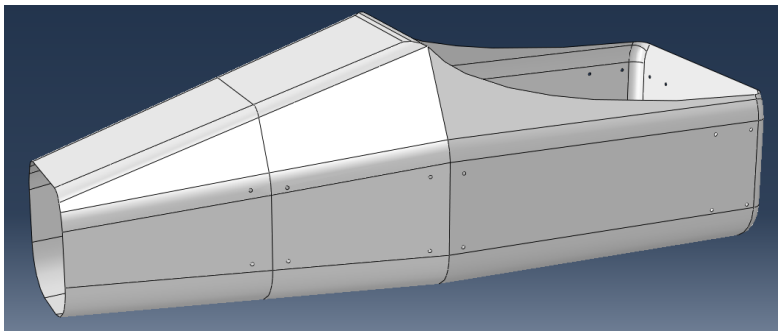


Figura 7: Geometría para el análisis mediante elementos finitos

3. RESULTADOS

3.1 Resultados analíticos

Considerando la geometría de análisis como placas planas y teniendo en cuenta las solicitaciones mencionadas, se genera un estado combinado de cargas de corte y compresión. El estado de choque frontal, debido la magnitud de la carga compresiva y por las fuerzas de suspensión, genera compresión y corte en las semiplacas superiores de las estaciones 1, 2 y 3. El estado de cargas de torsión genera un estado de flexión diferencial entre la estación 2 y 3, por lo que la semiplaca izquierda superior se encuentra expuesta a la mayor solicitación, aunque la magnitud es menor que el impacto frontal.

ISBN: 978-987-1676-63-7

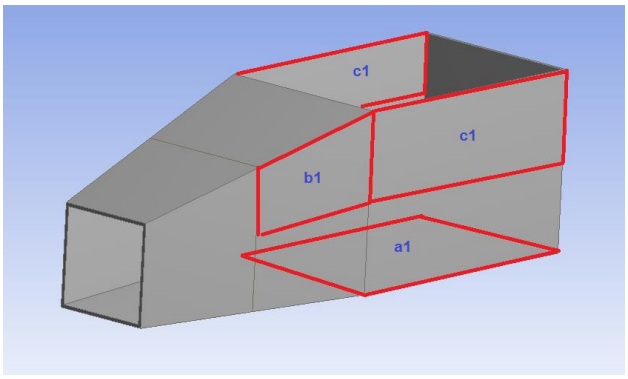


Figura 8: Placas de mayor solicitud estructural

En base al tipo de solicitud que poseen las placas, se propuso la siguiente orientación de láminas respecto al eje longitudinal del vehículo con un núcleo tipo A400 de 25mm.

$$[0, 0, -45, 45, Núcleo]_s$$

Aplicando la teoría de laminación clásica a la orientación escogida, se obtuvieron los siguientes parámetros, en donde se evidencian tanto los factores de seguridad como las láminas críticas al momento del fallo, así como también la verificación de la carga puntual y las uniones.

Tabla 2: Resultados analíticos del análisis estructural del impacto frontal y torsión

Estado de cargas	Ubicación	Nx [N/m]	Ny [N/m]	Nxy [N/m]	Factor de seguridad	Factor de seguridad a pandeo	Observaciones
Choque frontal	C1	-228978	0	13571	2,44	2,25	Fallan Fibras a 0°
	A1	-129870	0	0	4,31	3.91	Fallan Fibras a 0°
	B1	-211920	0	7600	2,64	2,5	Fallan Fibras a 0°
Inclinación en dos ruedas	C1	-10260	0	6478	39,56	50	Fallan Fibras a -45°

Tabla 3: Resultados analíticos del análisis estructural de la carga puntual

Carga puntual [N]	Factor de seguridad	Observaciones
7000	7,09	Falla por rotura lamina a 0°

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 4: Resultados analíticos de la verificación de uniones

Verificación de uniones [Factores de seguridad]	
Falla por arrancamiento	1,56
Falla por aplastamiento	3,54
Falla por tensión máxima	0,42

3.2 *Explicación de cálculo*

Dado que los cálculos de los resultados analíticos son de amplia extensión, se explicará brevemente la verificación de uniones. Esta se realizó a partir de las siguientes expresiones:

$$P_{arrancamiento} = 2et\tau_u \qquad (2)$$

$$P_{aplastamiento} = dt\sigma_u \qquad (3)$$

$$P_{tensión\ máxima} = \frac{(w-d)t\sigma_{max}}{k_\sigma} \qquad (4)$$

La carga de arrancamiento depende de la distancia del agujero al final del laminado (e), del espesor y de la tensión de corte que es capaz de soportar el laminado bajo la orientación asumida. Se recomienda una proporción de 40 a 50% de láminas ±45° para evitar este modo de falla.

Por otra parte, la falla por aplastamiento depende del diámetro del agujero (d), del espesor y de la tensión de aplastamiento.

Por último, la falla por tensión máxima depende de la separación entre agujeros (w), el diámetro del agujero, el espesor del laminado, la tensión máxima que es capaz de soportar el laminado y un factor de concentración de tensiones. Este último término depende de las propiedades elásticas equivalentes al laminado.

3.2 *Resultados numéricos*

En las siguientes imágenes, se visualizan los índices de falla (inversa del factor de seguridad) que se obtuvieron en la simulación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

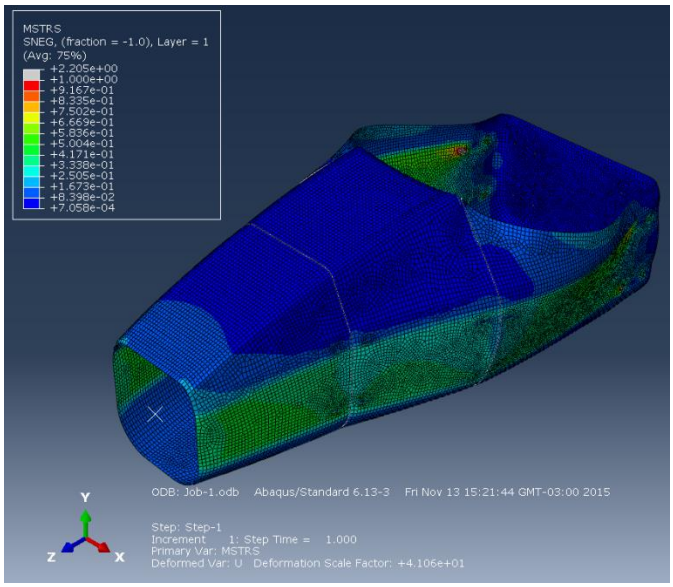


Figura 9: Índices de falla para las láminas a 0°

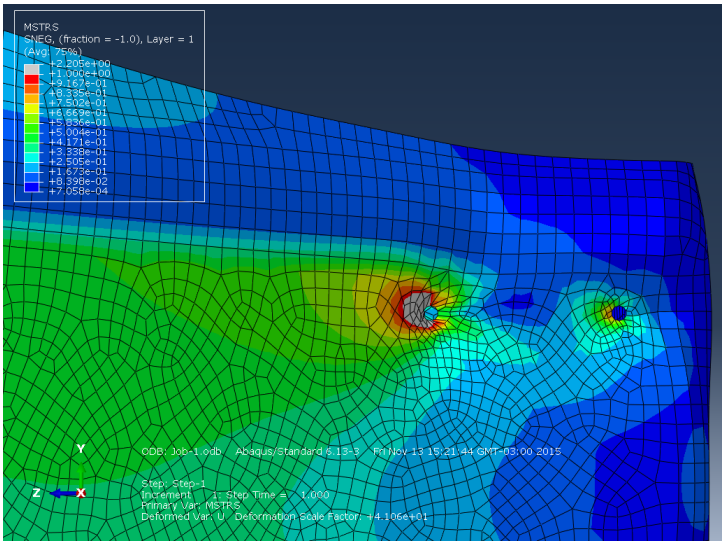


Figura 10: Índices de falla en la zona más solicitada del monocasco

ISBN: 978-987-1676-63-7

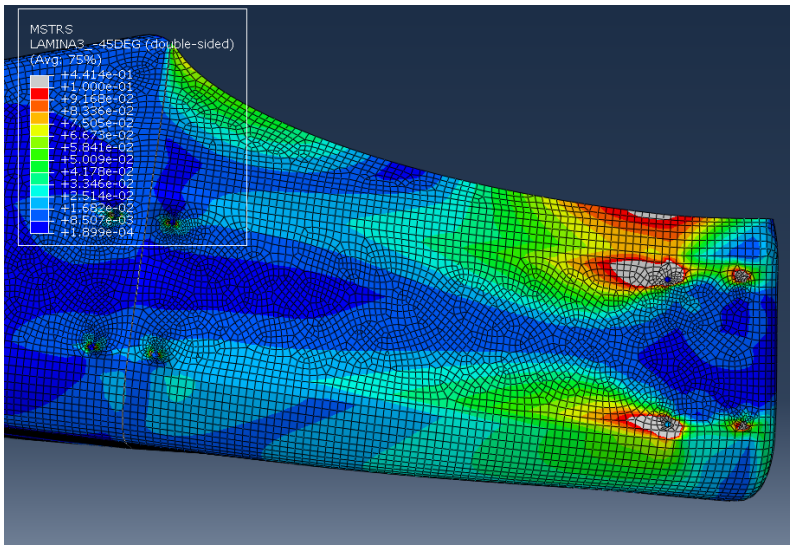


Figura 11: Índices de falla para la condición de torsión para las láminas a 45°

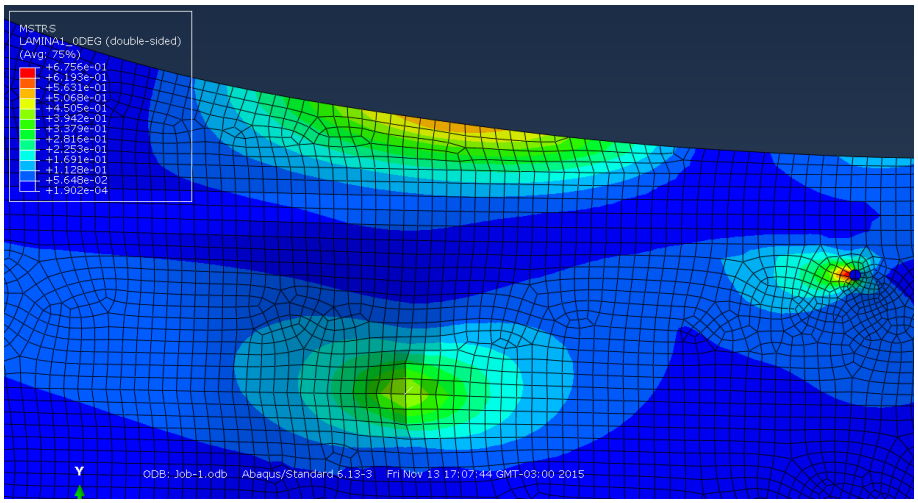


Figura 12: Índices de falla para la lámina exterior a 0° con un esfuerzo puntual

4. DISCUSIÓN

El criterio de elección en cuanto a la orientación del laminado contempló las siguientes características:

- Entre los esfuerzos presentes, el longitudinal es dominante por lo que se provee una gran proporción de fibras a 0°.
- Los esfuerzos longitudinales al ser compresivos generan inestabilidad por lo que se proveen laminas a ±45°.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- La solicitación en las uniones es muy alta y por lo tanto es necesario incrementar tanto el espesor como la tolerancia a esfuerzos de corte por lo que resulta beneficiosa la inclusión de un núcleo y fibras a ±45°.
- El laminado es simétrico y balanceado, por lo que no se genera un acoplamiento entre esfuerzos en el plano y curvaturas en el plano medio así como entre deformación transversal y distorsión de placas. Esto resulta beneficioso para el análisis al momento de caracterizar el laminado por medio de ensayos mecánicos.

Los cálculos analíticos demostraron que los factores de seguridad para los principales estados de carga fueron adecuados. Aunque esto no ocurrió con la verificación de uniones ya que los factores no resultaron apropiados. Cuando una estructura de material compuesto posee agujeros, su capacidad de soportar carga se reduce entre un 50 y 80 %. Es necesario que el laminado no falle por arrancamiento ni por tensión máxima ya que son fallas donde se genera una desunión.

En cuanto a la simulación, dentro de la escala de los índices de falla, los agujeros concentraron la mayor tensión en la estructura. No obstante, en el resto de la estructura se indicaron valores inferiores a la unidad en las láminas de mayor solicitud, las cuales se predijeron en los cálculos analíticos.

5. CONCLUSIONES

En esta investigación se verificó el diseño de un monocasco de Formula SAE con materiales compuestos, en base a una orientación de láminas elegidas con criterio, con teoría analítica y mediante elementos finitos. La elección del laminado significó una decisión donde prevalecieron efectos importantes a tener en cuenta como inestabilidad, uniones, rigidez, simetría y balance. Además, el hecho que el laminado sea homogéneo implica una mayor facilidad al momento de la construcción del mismo.

Se verificó que los agujeros generaron concentraciones de carga que pueden ser perjudiciales, ya que pueden generar fallas características como delaminación y agrietamiento del laminado. No obstante, existen soluciones para poder mitigar estos efectos como lo son los ply-drops o los insertos de material isótropo. Mientras que los insertos de material isótropo - como aluminio o acero - distribuyen las cargas en los agujeros, los ply-drops implican un aumento de espesor puntual que disminuye gradualmente en la extensión del laminado.

En cuanto a la solución numérica, se verificó una resistencia acorde tanto en uniones como en la estructura con el fin de proveer un factor de seguridad alto. Los resultados de los factores de seguridad se encuentran dentro del orden de magnitud, en comparación con la solución analítica.

Las zonas con mayor solicitud resultaron ser las placas analizadas y las uniones tal como era de preverse.

El diseño propuesto, a pesar de su elevado costo, redujo un 50% de peso respecto de una construcción en acero estructural, y presentó un incremento de rigidez en favor de mantener la integridad del piloto.

Como investigaciones futuras, sería necesario tener en cuenta factores como la energía de absorción de impacto. En el presente estudio, se consideró despreciable debido a la baja velocidad que poseen los vehículos y las elevadas medidas de seguridad que existen (como neumáticos de absorción y tierra movida en varios sectores). Por otro lado, el presente enfoque de diseño es preliminar y sería necesario incluir otros esfuerzos como transmisión de peso, soportes de amortiguador-resorte, etc.

6. REFERENCIAS

[1] Society of Automotive Engineers, *Formula SAE Rules*, SAE International, 2014

[2] Jones R. M., *Mechanic of Composite Materials*, Taylor & Francis, Virginia, EEUU, 1999.

Agradecimientos

El autor de este trabajo desea agradecer a los ingenieros aeronáuticos Cristian Bottero, Gastón Bonnet y Marco Fontana por el apoyo y asesoramiento del presente trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISPOSITIVO PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE SUELOS AGRÍCOLAS

Remirez, Pablo[1]; Donaire, Cristian[1]; Masch, Federico[2]; Flores, Marcelo[1] y Hecker, Rogelio[1,2]

[1] Departamento de Mecánica – Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 Nro 390, General Pico, La Pampa, Argentina
correo-e: pabloremirez@ing.unlpam.edu.ar
[2] CONICET

RESUMEN

La agricultura de precisión intenta lograr mayores rendimientos en los cultivos mediante el correcto uso de los recursos disponibles como son los insumos y el suelo a cultivar. Utilizando la tecnología se pretende recolectar la mayor cantidad de datos que permitan obtener la información adecuada para aplicar al manejo de estos recursos. Uno de los factores que inciden de manera negativa al rendimiento de los cultivos es la compactación del suelo. El dispositivo posee forma de cuchilla, es capaz de medir de manera continua la resistencia al avance a diferentes profundidades y en tiempo real [1]. Es de diseño simple, consta de una sola pieza y posee el grado de robustez necesario para el trabajo en campo.

El siguiente trabajo muestra el diseño, construcción y calibración de la cuchilla. El diseño se realizó mediante el método de elementos finitos que permitió optimizar los parámetros dimensionales para su construcción. Se muestran los ensayos en laboratorio, las mediciones y la calibración de la herramienta. Los resultados indican que la cuchilla tiene la sensibilidad suficiente para hacer mediciones a partir de los valores de rotura de suelo y errores de sensibilidad cruzada prácticamente despreciables. Esto muestra un buen grado de desacople e independencia de las mediciones a diferentes valores de profundidad. Este es un resultado importante que permitirá estimar diferentes perfiles de compactación, mejorándose la toma de decisiones.

Palabras Claves: *Agricultura de precisión, Compactación del suelo, Sensibilidad, Sensibilidad Cruzada, Strain Gauges.*

1. INTRODUCCIÓN

La compactación de los suelos es una de las variables que se tienen en cuenta para la planificación en agricultura ya que ésta condiciona el desarrollo radicular de las plantas. Además, disminuye el intercambio gaseoso y la capacidad de infiltración de agua en el suelo. El desarrollo de sensores para determinar el grado de compactación de los suelos se hace imprescindible en la agricultura de precisión; así como la medición de otras propiedades físicas y químicas de manera continua, georreferenciada y en tiempo real o “sobre la marcha”.

El desarrollo de herramientas “sobre-la-marcha”, se ha centrado principalmente en el diseño de sensores mecánicos bajo la premisa de que la resistencia mecánica ofrecida al movimiento de una cuchilla plana es un método indirecto de medición que permite estimar el grado de compactación del suelo. Los primeros sensores desarrollados estuvieron destinados a medir la resistencia mecánica total del suelo y a la visualización de la dinámica de fractura de la interacción suelo-herramienta, utilizaban una celda única de carga obteniéndose solo la capacidad de determinar la variabilidad horizontal de dicha resistencia mecánica [2-4]. Ante la necesidad de detectar la variabilidad vertical, uno de los conceptos que se utilizan consiste en una cuchilla plana a la cual se le instala un conjunto de galgas extensiométricas distribuidas en su geometría. En función de las deformaciones medidas por estas galgas se estima el perfil de presión en el frente de ataque de la cuchilla [5-7]. Otro concepto de desarrollo, es la adopción de métodos de medición directa en el frente de ataque de la cuchilla [8-11]. Este método posee la característica de poder obtener un conjunto de lecturas a distintas profundidades del suelo. Estos sensores poseen en general una mayor complejidad constructiva y conjunto de piezas mayor.

El uso de la herramienta estará condicionado por factores propios al suelo (humedad, piedras, vegetales, rastrojos, raíces), factores climáticos (precipitaciones, temperatura, viento), factores de implementación (maquinarias de tracción, implementos y métodos de clavado) y factores humanos (concentración, metodologías de trabajo, etc.). Hay un conjunto complejo de factores que interaccionan hombre-suelo-herramienta que exigen un diseño con un grado de robustez adecuado a dicho contexto, sumado a la necesidad de determinar la variabilidad horizontal y variabilidad vertical de la resistencia mecánica del suelo. Por lo tanto, debe poseer un método constructivo simple el cual minimice la cantidad de piezas y que el mismo se desarrolle de forma óptima en condiciones de campo, y la capacidad de realizar mediciones directas del suelo.

En este trabajo se presenta el diseño, la fabricación y la calibración de una herramienta que permite estimar los niveles de compactación en los suelos, la misma efectúa mediciones a distintas profundidades de manera on-line y en forma continua cuando a ésta se la desplaza dentro del terreno. Las características de esta herramienta son la robustez, geometría sencilla, sin elementos móviles y la posibilidad de distinguir diferentes tipos de perfiles de compactación. Primero se

ISBN: 978-987-1676-63-7

mostrará de manera cualitativa los aspectos básicos del diseño de la cuchilla, luego la etapa de fabricación y por último la calibración de la cuchilla.

2. DISEÑO

Se presenta el diseño de una herramienta en forma de cuchilla vertical que al desplazarse dentro del terreno permitirá estimar los distintos perfiles de compactación del suelo. Para ello, se medirá la resistencia al avance de la cuchilla a distintas profundidades a partir de la deformación captada sobre elementos deformables. Estos elementos son del tipo anillo circular con una variante en su geometría, dada por un rectángulo con un círculo en su interior. Esta configuración de la ranura forma un vínculo tipo viga en forma de “L” entre el anillo y el cuerpo de la cuchilla, aportándole rigidez en la dirección perpendicular e independencia entre celdas. El detalle del diseño y cálculos se desarrolla en [1].

Dado que se plantea estimar el perfil de compactación del suelo con la profundidad, es necesario medir la resistencia al avance a distintas alturas de la cuchilla, para esto se practican tantos anillos rectangulares como puntos se crean necesarios para estimar los diferentes perfiles de presión. En este caso se utilizarán tres celdas, tal como se muestra en la Figura 1.

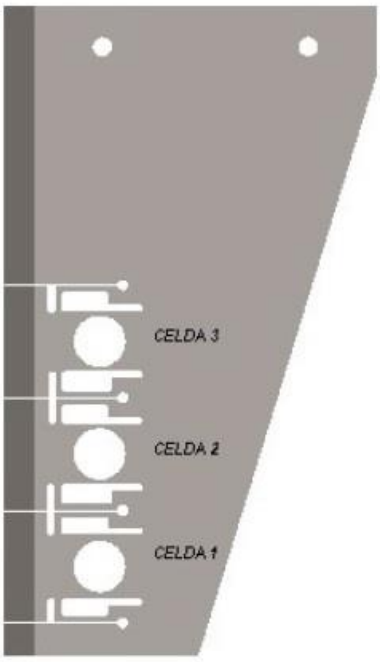


Figura 1: Esquema de la cuchilla.

Como la cuchilla se comporta como una viga en voladizo las presiones que se ejercen sobra cada celda provocará deformaciones sobre las celdas restantes. Este concepto, es el de sensibilidad cruzada y es una medida de cuanto acoplamiento hay entre celdas debido a las presiones. Por lo

tanto, es necesario lograr un desacople en la lectura de cada uno de los anillos y para lograrlo se practican ranuras sobre el frente de la cuchilla.

Como principales parámetros de diseño se tiene que la herramienta debe medir hasta una profundidad de no más de 25cm, distinguir presiones a partir de los 0,5MPa y que sea capaz de diferenciar tipos de perfiles de presión tales como los perfiles lineales o cuadráticos.

3. FABRICACIÓN

La cuchilla se fabricó con una plancha de acero SAE 1010 laminada en caliente de 25,4mm de espesor. La forma trapezoidal se obtuvo mediante oxicorte, los agujeros se hicieron con una broca y luego mediante mandrilado se dio la terminación superficial. El filo de la cuchilla se maquinó por fresado. Hay que mencionar que por tratarse de un prototipo y por cuestiones económicas se decidió realizar la fabricación por los métodos mencionados. En un futuro se realizará la construcción del mismo mediante electroerosión.

Para la estimación de los esfuerzos se utilizan strain gauges SG-3/350-LY41 de 350 Ω con los cuales se miden las deformaciones. Se arma un puente completo de Wheatstone con 4 SG tal como indica la Figura 2, los SG1 y SG2 miden las deformaciones producto de las presiones y los SG3 y SG4 sirven para compensar los efectos de la temperatura.

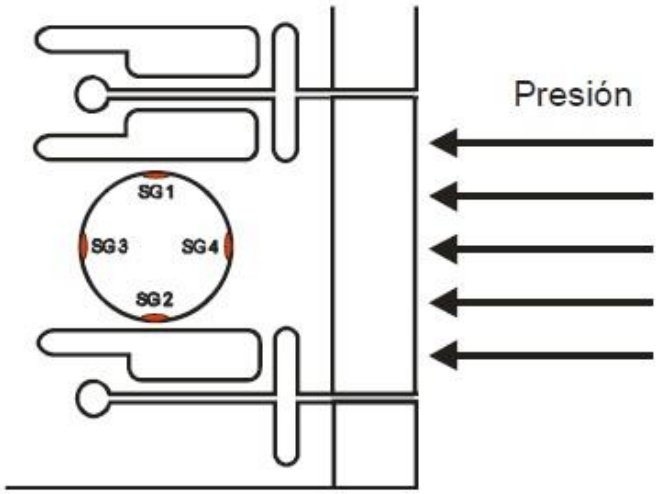


Figura 2: Ubicación de los SG sobre la celda inferior de la cuchilla.

Como las deformaciones medidas por SG3 y SG4 son despreciables comparadas con las deformaciones medidas por SG1 y SG2, se puede mostrar que la relación entre la tensión de excitación V_{ex} y la tensión de salida del puente V_o está dada por la Ecuación 1.

$$V_o = \frac{1}{4} \cdot GF \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \cdot V_{ex} \quad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Donde V_o es la tensión de salida del puente, GF es el factor del SG, □1 y □2 son las deformaciones medidas por SG1 y SG2 respectivamente, y V_{ex} es la tensión de excitación del puente. La tensión óptima de excitación se define de acuerdo a las características del acondicionador de señal y de la capacidad de disipación de calor. Como la temperatura afecta la medición, la potencia que se permite disipar al SG depende de los parámetros tales como si la prueba es estática o dinámica, exactitud en la medición, condiciones de disipación de calor. En función de estas limitaciones la tensión máxima de excitación calculada de acuerdo al instrumental disponible es de 7V.

En la Figura 3 se muestra los strain gauges pegados sobre una de las celdas y en la Figura 4 se muestra la cuchilla fabricada e instrumentada.

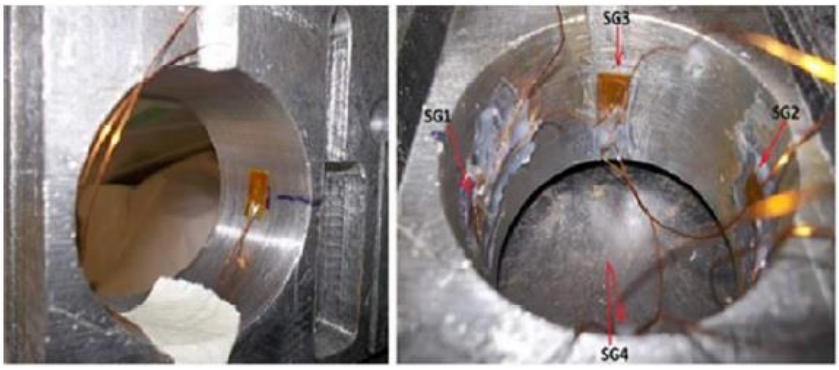


Figura 3: Strain gauges pegados sobre una de los anillos.



Figura 4: Cuchilla fabricada e instrumentada.

Primero se realiza la etapa de acondicionamiento de señales, donde se filtra y adapta la señal proveniente del transductor a la entrada del convertidor analógico/digital. A cada uno de los tres puentes de Wheatstone le corresponde un acondicionador de señal que además de amplificar la salida del puente V_o, provee la tensión de excitación V_{ex} regulada y continua que minimiza los problemas de ruido eléctrico, se utilizan acondicionadores de señal IPC DAS SG-3016. Luego, la adquisición de datos se realiza con una placa DNA–201–100 que se encuentra ensamblada en un Cubo Ueisim 600-1G. Se programó en Matlab un modelo de Simulink que lee la señal de entrada en cada uno de los canales de la placa adquisidora.

4. CALIBRACIÓN

La calibración del sistema consiste en establecer la relación entre las señales que provienen de los acondicionadores y las fuerzas que las provocan. Se sujetó la cuchilla a igual modo de sujeción que tendrá en las pruebas de campo, se equilibraron los puentes de Wheatstone, se aplicaron distintos valores de presión de manera independiente sobre cada celda y se midieron las tensiones respectivas. Las constantes que relacionan la tensión de salida con las presiones aplicadas sobre cada una de ellas se obtienen de la Ecuación 2.

$$V_{oi} = k_i \cdot P_i \tag{2}$$

Donde P_i [MPa] es la presión media aplicada, k_i [mV/MPa] es la constante de proporcionalidad y V_{oi} [mV] es la tensión de salida medida en la celda i. La Figura 5 muestra la tensión de salida de las tres celdas de la cuchilla en función de la presión aplicada.

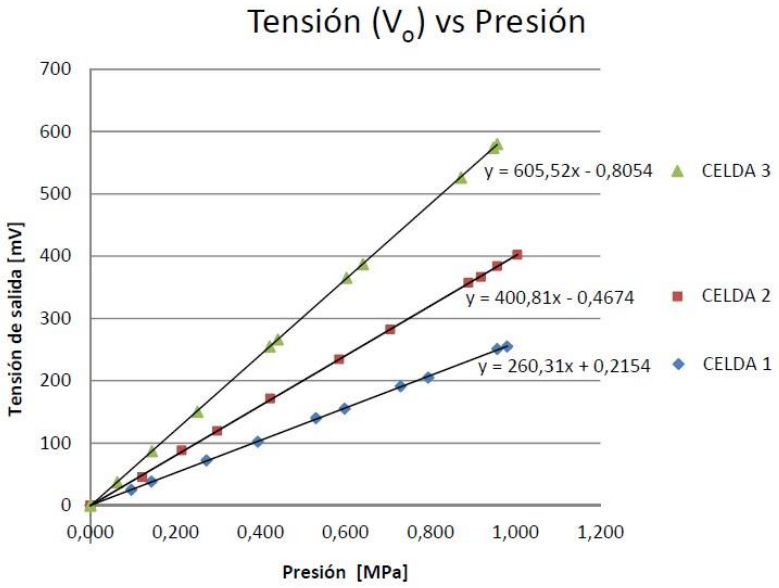


Figura 5: Tensión en función de las presiones sobre las celdas.

Las constantes resultado de la calibración resultan de los valores de la pendiente de las rectas, así obtenemos las presiones en función de las tensiones medidas, Ecuación 3.

$$P_1 = 3{,}84E^{-3} \cdot V_{01}$$
$$P_2 = 2{,}49E^{-3} \cdot V_{02}$$
$$P_3 = 1{,}65E^{-3} \cdot V_{03}$$

En la Figura 6 se muestra uno de los ensayos dónde se somete a diferentes presiones a la celda 2 y se miden las tensiones de salida.

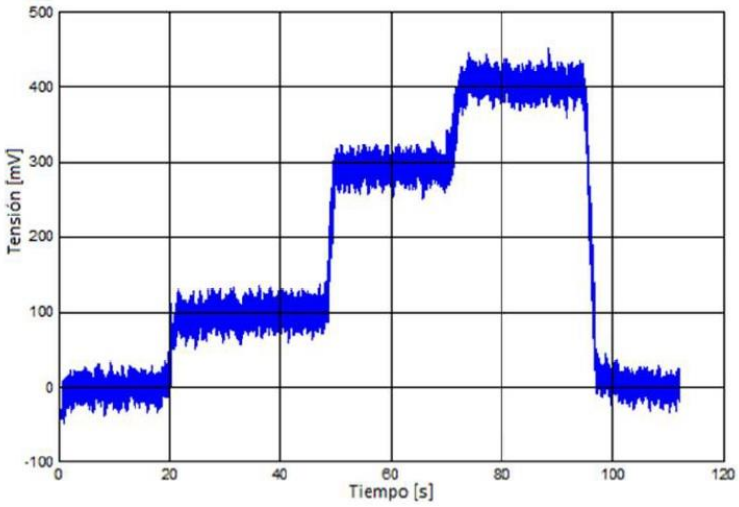


Figura 6: Tensión de salida de la celda 2 para diferentes presiones.

Utilizando los valores de las pendientes de las rectas de la Figura 5 y las tensiones mínimas medidas en experimentación se calcula el valor mínimo medible por cada celda. Obteniéndose en todos los casos valores muy por debajo de 0,5MPa impuesto en la etapa de diseño.

La Figura 7 presenta el caso de las tensiones de salida en las tres celdas producidas por presiones sobre la celda 1. A modo de ejemplo, ante una presión (P_1, P_2, P_3) = (1; 0; 0) las tensiones medidas son (V_{01}, V_{02}, V_{03}) = (260,31; 11,08; 28,53). Claramente se ve que hay mediciones de tensión en las celdas 2 y 3 con ausencia de presiones. Esto se debe a que la cuchilla actúa como una viga en voladizo, donde la influencia más significativa la provocan las presiones más alejadas del punto de fijación. Para los casos en que las presiones se aplican sobre las celdas 2 y 3, se obtienen gráficos similares.

ISBN: 978-987-1676-63-7

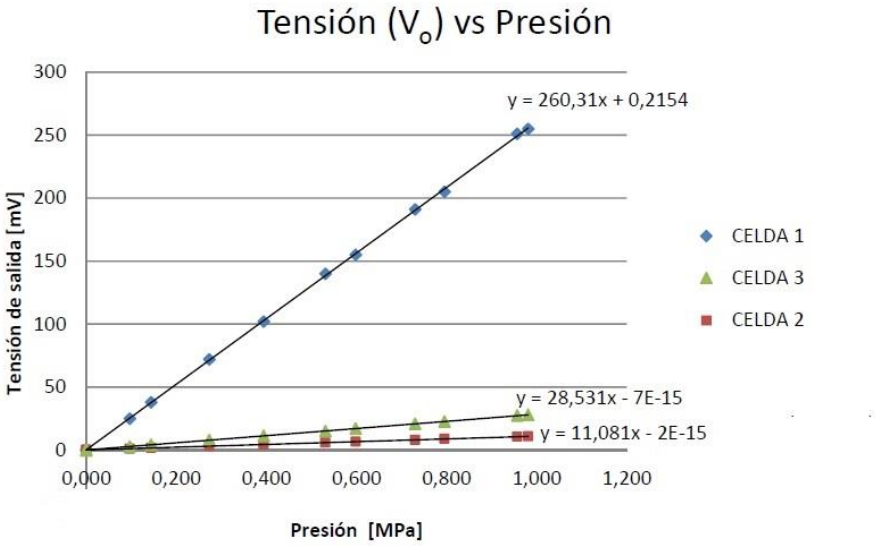


Figura 7: Medición de tensión sobre las celdas en función de P_1.

Para lograr un mayor desacople en las lecturas se utilizará un sistema de ecuaciones que compense las mediciones tal como se desarrolla en [1].

Utilizando la Ecuación 2 y considerando los efectos producidos por las presiones sobre todas las celdas obtenemos la Ecuación 4, donde V_{oi} es el voltaje de salida medido en la celda i, P_i es la presión aplicada en la celda i, ki es la constante que se obtiene de la Ecuación 2 y $ki|j$ es la constante de proporcionalidad entre el voltaje en la celda i producto de la presión Pj.

$$\begin{aligned} V_{01} &= k_1 \cdot P_1 - k_{1|2} \cdot P_2 - k_{1|3} \cdot P_3 \\ V_{02} &= -k_{2|1} \cdot P_1 + k_2 \cdot P_2 - k_{2|3} \cdot P_3 \\ V_{03} &= -k_{3|1} \cdot P_1 - k_{3|2} \cdot P_2 + k_3 \cdot P_3 \end{aligned} \tag{4}$$

Expresando la Ecuación 4 en forma matricial y reemplazando las constantes por los valores obtenidos en los ensayos de calibración tenemos la Ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} V_{01} \\ V_{02} \\ V_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_{1|2} & -k_{1|3} \\ -k_{2|1} & k_2 & -k_{2|3} \\ -k_{3|1} & -k_{3|2} & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 260,31 & -3,68 & -0,46 \\ -11,08 & 400,81 & -1,49 \\ -28,53 & -15,68 & 605,52 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

No obstante, para obtener el valor de la presión aplicada en función del voltaje captado en cada celda se calcula la inversa de dicha matriz, Ecuación 6.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,84.10^{-3} & -3,51.10^{-5} & -2,83.10^{-6} \\ -1,05.10^{-4} & 2,49.10^{-3} & -6,06.10^{-6} \\ -1,78.10^{-4} & -6,29.10^{-5} & 1,65.10^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{01} \\ V_{02} \\ V_{03} \end{bmatrix} \tag{6}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como ejemplo de uso de la matriz, ante un perfil de presiones (P_1, P_2, P_3) = (1; 1; 1) las tensiones medidas sin usar la matriz son (V_{01}, V_{02}, V_{03}) = (264,45; 413,38; 649,73) y los valores estimados de presión usando la ecuación 3 son (P_1, P_2, P_3) = (1,0155; 1,0293; 1,0720) obteniéndose un error del 1,55%, 2,93% y 7,20% respectivamente. Si utilizamos estos valores de tensión medidos en la Ecuación 5 obtenemos los valores estimados de presiones (P_1, P_2, P_3) = (0,9991; 0,9976; 1,0069) obteniéndose un error del -0,09%, -0,24% y 0,67% respectivamente. Con la matriz de desacople obtenemos estimaciones en los valores de presión con errores inferiores al 1%.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño, construcción y fabricación de una cuchilla, y que los resultados de las experiencias de laboratorio muestran que se podrán obtener estimaciones de los diferentes perfiles de presión que se puedan encontrar en los suelos agrícolas.

En el banco de prueba se demostró que la cuchilla es capaz de medir en forma estable los esfuerzos sobre cada una de las celdas de carga compensando los efectos térmicos que pudieran afectar las mediciones realizadas. Se muestra además una alta linealidad entre el voltaje medido y los esfuerzos aplicados, un error de sensibilidad cruzada bajo, prácticamente despreciable en algunos casos. Estos valores indican un buen grado de desacople e independencia de las mediciones de presión sobre cada celda. Si bien con la matriz de desacople se obtienen estimaciones de presión con bajos errores, el desacople generado a partir del diseño de la cuchilla es aceptable.

El diseño simple que posee la cuchilla facilita su fabricación. Consta de una sola pieza, posee el grado de robustez necesario para el trabajo en campo y la capacidad de realizar mediciones a diferentes profundidades con errores bajos.

6. REFERENCIAS

[1] Remirez, Luis Pablo; Flores, Marcelo Gustavo; Hecker, Rogelio Lorenzo; Masch, Federíco; Vicente, Diego. Diseño Preeliminar De Un Dispositivo Para Estimar La Compactación De Suelos Agrícolas. ENIEF, 19 al 22 de Noviembre de 2013, Mendoza.

[2] Herrera, M.S., Coronel, C.I., Coba, D.L, Cueto, O.G., Bravo, E.L.: Development of a Sensor for Soil Continuous Compaction Measurement. 20(1). (2011).

[3] Adamchuk, V.I, Morgan, M.T., & Sumali, H..: Application of a strain gauge array to estimate soil mechanic impedance on-the-go. Transactions of the ASABE, 44(6), 1377-1383. (2001).

[4] Adamchuk, V.I, Ingram, T.J., Sudduth, K.A., Chung, S.O.: On-the-go Mapping of soil mechanical resitance using a linear depht effect model. 51(6), 1885-1894.(2008).

[5] Adamchuk, V.I., Christenson, P.T.: Development of an instrumented blade system for mapping soil mechanical resistance represented as a second-order polynomial. Soil & Tillage Research, 95(1-2), 76-83. (2007).

[6] Chung, S.O., Sudduth, K.A., Hummel, J.W.: Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 49(1), 5-14. (2006).

[7] Gilandeh, Y.A.: On-the-go soil mechanical strength measurement at different soil depths. Journal of Food, Agriculture & Environment, 7, 696-699. (2009).

[8] Sudduth, K.A., Chung, S.O., Sanchez, P., Upadhyaya, S.K.: Field comparison of two prototype soil strength profile sensors. Computers and Electronics in Agriculture, 61(1), 20-31. (2008).

[9] Sharifi, A., Mohsenimanesh, A.: Soil mechanical resistance measurement by an unique multicone tips horizontal sensor. Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences. International Agrophysics (26), 61-64. (2012).

[10] Karabay, Sedat. Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers. Materials & Design. Volumen 28, Issue 2, 2007, pag. 496 - 506.

[11] Matias D. Jaliff Perez, Rogelio L. Hecker, Gustavo M. Flores, Desarrollo de un Sistema de Monitoreo para el Proceso de Torneado. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, II CAIM 2010, San Juan, Argentina, 16 al 19 de noviembre de 2010.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE LESIONES DE MAMA PARA UN TOMÓGRAFO POR EMISIÓN DE POSITRONES

Eduardo E. Rodríguez [1], Maximiliano Véliz [1], Julieta Robledo [2], Patricia Yapura [3], Viviana Montilla [2], Cinthia Papp [2] y Carlos Giannone [2]

[1] Instituto de Industria (IDEI), Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS)
J. M. Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina
Correo-e: erodrigu@ungs.edu.ar, mveliz@ungs.edu.ar
[2] División Física Médica, Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Del Libertador 8250, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Correo-e: julietarobledo@gmail.com, vimontilla@gmail.com, cpapp@cnea.gov.ar, giannone@cnea.gov.ar
[3] Instituto de Oncología Ángel H. Roffo, Universidad de Buenos Aires
Av. San Martín 5481, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Correo-e: patricia.yapura@gmail.com

RESUMEN

Se describe el diseño y la construcción de un simulador de lesiones de mama para un tomógrafo por emisión de positrones, originado en la necesidad de contar con un dispositivo que permita, entre otras posibilidades: a) validar el desempeño de un tomógrafo especializado en mamas para la evaluación de parámetros físicos, como uniformidad tomográfica, ruido, coeficiente de atenuación y resolución espacial tomográfica; b) establecer límites de detectabilidad de lesiones variando contrastes y tiempos de adquisición; c) simular tipos de lesiones (frías y calientes); d) practicar controles de calidad periódicos; e) establecer protocolos para mejorar la calidad de las imágenes clínicas.

Para el diseño del simulador se tuvo en cuenta una serie de requerimientos: a) uso de materiales con mínima absorción a la radiación de 511 keV producto del decaimiento radiactivo del radiofármaco ^{18}F-FDG (flúor-desoxiglucosa) en muestras con una actividad de hasta 5 mCi; b) estanqueidad; c) facilidad de llenado y armado para minimizar el tiempo de exposición a la radiación; d) durabilidad y reproducibilidad.

El dispositivo logrado cuenta con una cámara cilíndrica de 1100 cm^3 que simula el tejido mamario mediante una solución acuosa de ^{18}F-FDG, en la que se insertan ocho tubos de distintos diámetros llenos con diferentes concentraciones de ^{18}F-FDG para representar lesiones localizadas y poder modificar el contraste lesión-fondo.

El material de construcción elegido fue ácido poliláctico y la técnica de construcción fue una de modelado por deposición fundida practicada con una impresora 3D. Las pruebas de absorción de radiación y de estanqueidad fueron óptimas. El tiempo promedio de carga y armado del simulador en situaciones reales de operación resultó menor que 15 minutos.

Este simulador se está usando en el Instituto de Oncología Ángel H. Roffo (UBA-CNEA), que cuenta con un tomógrafo MAMMI PET, el primero de su tipo en Latinoamérica.

Palabras Claves: *tomografía, simulador, impresión 3D.*

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de construcción rápida [1] han recibido un considerable impulso por el servicio que brindan las tecnologías de impresión 3D, recientemente popularizadas tanto para uso de hobbistas como para ingenieros y científicos. El uso de estas técnicas permite acelerar las pruebas de diseño de diversos productos, principalmente en la forma de prototipos, aunque también permiten la fabricación en pequeña escala de herramental y de piezas de repuesto [2]. En este abanico de posibilidades, también dan la oportunidad de construir equipamiento para la docencia y la investigación científica [3]. En particular, algunos antecedentes del uso de técnicas de construcción rápida para apoyo a la investigación en medicina se pueden ver en la referencia [4].

En este trabajo se describe el caso del diseño y fabricación mediante impresión 3D de un simulador de lesiones de mama, para uso específico en un tomógrafo por emisión de positrones instalado en 2014 en el Instituto de Oncología Ángel H. Roffo (UBA-CNEA) de la ciudad de Buenos Aires (Figura 1).

El tomógrafo especializado en mamas, denominado MAMMI PET [5], necesitaba contar con un dispositivo que permita validar su desempeño, como parte del programa de entrada en servicio del tomógrafo como fuente de diagnóstico primario de lesiones de mama [6]. Para este fin, se solicitó el diseño y fabricación de un dispositivo de simulación (fantoma) que cumpliera con una serie de requerimientos.

El MAMMI PET usa un anillo de detectores de la radiación γ de 511 keV resultante del proceso de aniquilación positrón-electrón luego de la desintegración radiactiva del radiofármaco ^{18}F-FDG (flúor-desoxiglucosa) que se usa en las prácticas diagnósticas [7]. Uno de los requerimientos fue el uso de materiales con mínima absorción a la radiación de esa energía proveniente de soluciones radiactivas con una actividad de hasta 5 mCi.



Figura 1: MAMMI PET del Instituto de Oncología Ángel H. Roffo. Por debajo de la camilla se encuentra el anillo de detectores (derecha).

ISBN: 978-987-1676-63-7

El uso de material radiactivo en estado líquido requería imperiosamente el diseño de un simulador con capacidad de contención estanca, pero a la vez simple para facilitar el llenado, el armado y el cierre, con cumplimiento de los estándares de seguridad para minimizar el tiempo de exposición a la radiación.

Desde el punto de vista de la construcción mecánica, el producto debía ser durable, de fácil reproducción y con posibilidades de recambio de sus partes.

A continuación, se describe el fantoma diseñado y fabricado en el Área de Ciencias y Tecnologías Básicas del Instituto de Industria de la Universidad Nacional de General Sarmiento, y puesto en funcionamiento en el Instituto de Oncología Ángel H. Roffo en 2015. Se presentan las posibilidades de aplicación del fantoma. Se muestran, además, imágenes tomográficas del fantoma obtenidas en los primeros ensayos realizados con el propósito de determinar los límites de detectabilidad del tomógrafo.

2. EL FANTOMA

La denominación biomédica del dispositivo es «fantoma de mama». El término fantoma se refiere a un artefacto utilizado para la calibración de equipos de diagnóstico por imágenes y que contiene elementos de características similares a los del organismo. En este caso, el fantoma es un «simulador de lesiones de mama», para uso específico con ^{18}F-FDG en el tomógrafo de emisión de positrones especializado en mamas MAMMI PET del Instituto de Oncología Ángel H. Roffo.

El simulador está constituido de tres partes y ha sido denominado FANT-I (Figura 2).

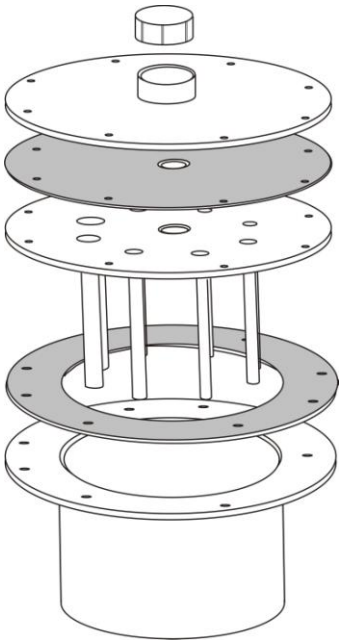


Figura 2: Esquema del simulador de lesiones de mama.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La parte principal es un recipiente cilíndrico de 12 cm de diámetro y 10 cm de altura, con base y pared de 2,5 mm de espesor. En la parte superior tiene una brida de 5 mm de espesor con ocho orificios pasantes, sobre la que se apoyan y sostienen las restantes partes del dispositivo. El volumen total del recipiente es 1.100 cm^3. Cuando se lo llena con una solución acuosa de ^{18}F-FDG, este volumen simula el tejido mamario.

La segunda parte la constituye un conjunto de ocho tubos cilíndricos de diámetros: 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm y 12 mm, todos de 8 cm de longitud y paredes de 1,5 mm de espesor, que se encuentran sostenidos por una segunda brida. Cuando se introducen vacíos en el recipiente principal, los tubos representan «lesiones frías», mientras que cuando se llenan con ^{18}F-FDG simulan la presencia de «lesiones calientes» de tamaños y posiciones bien definidos (Figura 3).

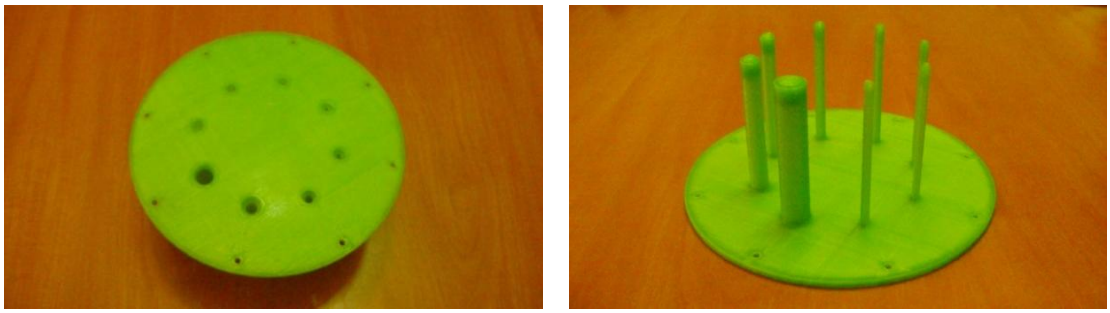


Figura 3: Brida con tubos.

La tercera pieza es la tapa del fantoma. Tiene en el centro un tapón roscado para facilitar, si fuera necesario durante los experimentos, la variación de concentración de la solución contenida en el recipiente principal. El llenado del recipiente con soluciones de distintas concentraciones del radiofármaco permite variar el contraste fondo-lesión, lo que es muy importante para obtener imágenes con una variedad de condiciones que se aproximen a las reales que se obtienen en las prácticas de diagnóstico médico.

Todas las partes están fabricadas con una técnica de modelado por deposición fundida practicada con una impresora 3D (marca Kikai, modelo T145). El material usado fue ácido poliláctico (PLA), un material termoplástico de uso común para impresión 3D (PLA: densidad de 1,25 g/cm^3; temperatura de transición vítrea entre 65 °C y 70 °C; temperatura de impresión entre 190 °C y 210 °C) [8]. El simulador vacío pesa 0,7 kg, y 1,7 kg cuando el recipiente principal y los tubos están todos llenos. En el momento de la entrega, el dispositivo final se presentó en un empaque, como se muestra en la Figura 4, e incluía el manual de uso, una brida con tubos de repuesto, juntas extra y jeringas con agujas.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 4: Presentación del simulador.

2.1 Elección del material y pruebas

La elección de PLA se fundó en la necesidad de contar con un material que, por una parte, no absorba el radiofármaco cuando este lo moje y, por otra, que no atenúe la radiación de 511 keV proveniente de la aniquilación positrón-electrón tras el decaimiento radiactivo del ^{18}F-FDG. [9]

Las pruebas de impermeabilidad fueron realizadas en el laboratorio mediante un procedimiento de pesadas sucesivas del recipiente con una balanza digital de 0,1 g de apreciación. Para ello, se lo llenó completamente con agua, se lo pesó, y se lo dejó estacionado durante dos horas. A continuación, el recipiente se vació, se secó con papel absorbente y se volvió a pesar. Estas pesadas no indicaron diferencias significativas antes y después del mojado, lo que se tomó como prueba positiva de la impermeabilidad. Al nulo poder absorbente demostrado por el PLA en estado sólido, también contribuyó la construcción de paredes libres de poros, lo que se logró en el proceso de fabricación imprimiendo capas de 0,2 mm de espesor a bajas velocidades de impresión (40 mm/s). Ambas circunstancias impidieron, en combinación, el paso de líquido al interior de las paredes.

Para analizar la atenuación del material a la radiación incidente, se usaron muestras de PLA rectangulares de 4 mm de espesor que fueron sometidas a radiación de 140 keV resultante del decaimiento radiactivo de ^{99m}Tc en un tomógrafo por emisión de fotón único (SPCT) del Hospital de Clínicas de la ciudad de Buenos Aires. Las tomografías tomadas a tres muestras de PLA no mostraron evidencia de una atenuación significativa de la radiación γ incidente de esa

ISBN: 978-987-1676-63-7

energía por parte de las muestras. Esto se fue decisivo para iniciar la construcción del fantoma con PLA. Dado que esa radiación del ^{99m}Tc es de menor energía que la más energética de 511 keV liberada por ^{18}F-FDG y a la que estaría sometido el material durante su uso en el MAMMI PET, se concluyó que tampoco en ese caso habría atenuación significativa. En estas pruebas, tampoco se observaron efectos de acumulación electrostática en la superficie de las muestras por efecto del contacto con el radiofármaco usado, en tiempos de observación de media hora, aproximadamente.

Una vez cerrado, el fantoma es hermético. La estanqueidad es una condición imprescindible, dado que de ocurrir un derrame, aun de una cantidad muy pequeña de ^{18}F-FDG, esta contaminaría el ambiente de trabajo (sala de preparado, sala del MAMMI PET o camilla). El cierre hermético del dispositivo se logró colocando entre cada par de bridas contiguas una junta circular fabricada con papel de juntas de 0,8 mm de espesor, previamente mojadas (papel saturado). El cierre se efectiviza con el ajuste de ocho mariposas que se enroscan en tornillos de bronce de 1/8" que atraviesan y unen todas las bridas. Las pruebas de cierre fueron óptimas, sin que se observasen pérdidas cuando se usó agua a 20 °C como líquido de llenado y se sometió el fantoma a pruebas extremas (sacudidas, rodaduras).

2.2 Llenado y operaciones

El llenado de los tubos es crítico para que no queden burbujas de aire en el interior. El método escogido consistió en llenar los tubos con una jeringa provista con una aguja fina (aguja para punciones lumbares de 0,6 mm de diámetro y 8 cm de longitud) y llegando con la aguja hasta el fondo de cada tubo. De esta manera, el líquido se vierte en la parte inferior del tubo y su ascenso logra expulsar el aire, evitando la formación y retención de burbujas. Este procedimiento de llenado de los tubos asegura la simulación de lesiones calientes homogéneas en volúmenes bien definidos. Vale la pena comentar que el llenado de los tubos de diámetros menores que 3 mm es casi imposible desde la parte superior de los tubos debido a efectos de la tensión superficial del líquido.

Durante el uso en el tomógrafo MAMMI PET, el llenado del recipiente y de los tubos se realiza con el fantoma en posición vertical, ubicado detrás de una pantalla protectora de vidrio plomado, respetando las normas de manipulación de material radiactivo. El llenado, más el cierre con el apriete de todas las mariposas roscadas, se llega a hacer en menos de 15 minutos. Este tiempo es razonable para minimizar la exposición a la radiación. Es indispensable contar en el lugar de trabajo con activímetros personales y de sala, y blindajes para las jeringas. Una vez lleno, el fantoma siempre se traslada con su eje en posición vertical. Antes de colocarlo en la camilla del MAMMI PET, se lo coloca en una bolsa de plástico cerrada, para la retención de líquido en caso que ocurra un derrame accidental (Figura 5). Un manual de

ISBN: 978-987-1676-63-7

uso describe todas las operaciones necesarias para el llenado, cierre y manejo del simulador, junto a las cuestiones de seguridad que se deben observar.



Figura 5: El simulador con ^{18}F-FDG colocado en la camilla.

3. USOS DEL FANTOMA

Las posibilidades de uso del fantoma construido son múltiples. Desde el 10 de diciembre de 2015 se está usando para una serie de estudios técnicos del MAMMI PET. Uno de ellos se refiere a la validación de desempeño del tomógrafo para la evaluación de sus parámetros físicos, como por ejemplo, su uniformidad tomográfica, nivel de ruido, medición del coeficiente de atenuación y determinación de la resolución espacial tomográfica. Además, el fantoma es apto para establecer los límites de detectabilidad de lesiones variando contrastes y la optimización de tiempos de adquisición. El fantoma se puede preparar también para simular lesiones frías y calientes localizadas y de tamaños definidos. En cuanto al control del tomógrafo, el fantoma va a servir para practicar controles de calidad periódicos y establecer protocolos para mejorar la calidad de las imágenes clínicas (trabajo en curso).

4. RESPUESTA DEL FANTOMA EN EL MAMMI PET

La Figura 6 muestra una salida de pantalla de la reconstrucción tomográfica a partir de la señal adquirida por los detectores de radiación γ del MAMMI PET. La reconstrucción se realizó usando un método iterativo [10]. En este caso, el fantoma se preparó con todos los tubos llenos de ^{18}F-FDG, a excepción del tubo de menor diámetro (1,5 mm) que se dejó vacío para representar una lesión fría. Para optimizar el contraste fondo-lesión, el recipiente principal contenía agua pura. Las imágenes corresponden a un barrido del anillo de detectores durante 15 minutos a lo largo del eje del fantoma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

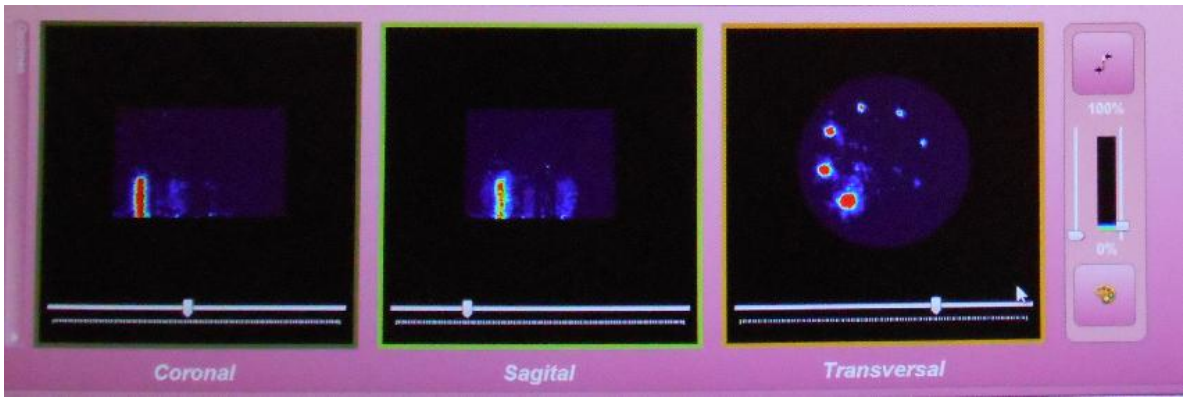


Figura 6: Imágenes tomográficas del simulador adquiridas con el MAMMI PET y reconstruidas con un método iterativo.

Específicamente, las imágenes muestran la detección de la lesión caliente simulada más pequeña, correspondiente a la reconstrucción de las proyecciones de las emisiones provenientes del tubo lleno de menor diámetro, de 2 mm de diámetro. En la práctica regular, a partir del conjunto de imágenes de los cortes coronal, sagital y transversal como los mostrados en la Figura 6, se genera una imagen tridimensional del volumen investigado.

5. CONCLUSIONES

Se describió un fantoma de mama diseñado especialmente para el tomógrafo de emisión de positrones especializado en mamas del Instituto de Oncología Ángel H. Roffo, y que es único de su tipo en Latinoamérica. Para el diseño y la evaluación del fantoma se requirió la asociación interdisciplinaria de miembros de varias instituciones del sistema público de ciencia y tecnología. Los resultados obtenidos son coherentes con la finalidad proyectada del dispositivo. La construcción del fantoma con una técnica de impresión 3D muestra la expansión de las posibilidades de este tipo de métodos de manufactura rápida para la fabricación de instrumental especializado para la investigación.

6. REFERENCIAS

[1] Ver, por ejemplo, https://wohlersassociates.com/Oct00MMT.htm/. También: Rodríguez Arroyave C. A., Muñoz Toro M. F., *Aplicación de técnicas de rapid tooling para la fabricación de prototipos de embutición.* Revista Universidad EAFIT, Vol. 41, N° 138, pp 96-109, 2005.

[2] Mazzola A., Balderrama M., Atorino J., Rodríguez E. E., Oknaian S., Kuperman S., *Reemplazo de accesorios de equipamiento de banco de sangre mediante impresión 3D*. Revista Argentina de Transfusión, Vol. XLI, N° 3, pp. 186-187, 2015.

[3] Zwicker A. P., Bloom J., Albertson R., Gershman S., *The suitability of 3D printed plastic parts for laboratory use*. Am. J. Phys., Vol. 83, p. 281, 2015.

[4] Hunt D. C., Easton H., Caldwell C. B., *Design and construction of a quality control phantom for SPECT and PET imaging*. Med. Phys., Vol. 36, N° 12, pp. 5404-5411, 2009.

[5] Moliner L., Gonzalez A. J., Soriano A., Sanchez F., Correcher C., Orero A., Carles M., Vidal L. F., Barbera J., Caballero L., Seimetz M., Vazquez C., Benlloch J. M., *Design and evaluation of the MAMMI dedicated breast PET*. Med. Phys., Vol. 39, N° 9, pp. 5394-5404, 2012.

[6] Asensio del Barrio C., Marina Corro G., Alcázar Alcázar R. y Rodríguez Garrido M., *Efectividad diagnóstica de la PET en el cáncer de mama. Revisión sistemática y meta-análisis*. IPE 60/09. Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias (AETS) - Instituto de Salud Carlos III, Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, 2009.

[7] Nuñez M., *Tomografía por emisión de positrones*. Informe de la Escuela Universitaria de Tecnología Médica, UdelaR, Montevideo, Uruguay, 2008.

[8] Ver, por ejemplo: http://www.textoscientificos.com/polimeros/acido-polilactico/.

[9] Tabla de datos consultada: *Gamma Compatible Materials (2007)*, de MDS Nordion. Sitio web: http://www.mdsnordion.com. La tabla hace referencias a termoplásticos como ABS, PET y PETG, pero no incluye PLA, el material usado en este trabajo.

[10] Kontaxakis G., Vaquero J. J., Santos A., *Reconstrucción de imagen en tomografía por emisión de positrones*. Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Esp), Vol. 96, Números 1-2, pp. 45-57, 2002.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Laboratorio de Ingeniería del Instituto de Industria de la Universidad Nacional de General Sarmiento por el uso de la impresora 3D y al Área de Medicina Nuclear del Hospital de Clínicas José de San Martín por el uso del tomógrafo SPECT. El desarrollo del simulador se hizo como parte del proyecto de investigación IDEI-UNGS 30/4077, período 2014-2016.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO DE UN PROTOTIPO PARA EL RELEVAMIENTO DE PARAMETROS DE UN SISTEMA DE MOLINENDA DE ABONOS ORGANICOS.

Walter SOTO; Héctor MARTIN, Sergio SOSA; Ezequiel ROSATTI; Alejandro FABBRO; Carlos OLIVO; Onofre PERESON y Mauricio CIAN

GRUDIM - Facultad Regional Reconquista de la UTN. Calle 44 nº 1000, (3560) Reconquista, Santa Fe, Argentina.
Correo-e: waltersoto2007@gmail.com, afabbro_487@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo forma parte del diseño de una máquina destinada a pequeños productores florihorticultores, que realice la tarea del abonado de terrenos empleando abonos orgánicos. La meta es subsanar los inconvenientes de índole mecánico en el sistema de acarreo que presentan las maquinarias existentes en el mercado.
En primera instancia se ha diseñado un prototipo del sistema de molienda, mediante software de diseño en tres dimensiones (3D). El objetivo es el estudio del comportamiento del abono y la determinación de parámetros del sistema de carga y molienda. Los datos podrán ser extrapolados posteriormente para la construcción del prototipo de abonadora.
El diseño pretende simular la geometría del sistema de alimentación (tolva), teniendo en cuenta que el abono debe llegar al esparcidor por acción de la gravedad, de manera que se reduzca el número de partes móviles que interactuaran en el sistema. El mismo cuenta con dos de sus laterales regulables en inclinación, un sistema de molienda formado por un rolo triturador que interactúa con un conjunto de cuchillas fijas a la estructura y una rejilla inferior que delimita la granulometría del abono que ha de llegar al esparcidor.
Esto conduce a determinar los dos parámetros fundamentales que se buscan que son la granulometría del abono a esparcir y la potencia mecánica necesaria para el accionamiento del rolo.

Palabras Claves: Diseño, Abonadora, Ensayo, Granulometría y Potencia

1. INTRODUCCIÓN

En el mercado existen diversos modelos de equipos abonadores, comúnmente llamados estiercoleras. Los cuales se diferencian entre sí, en la forma de esparcir el abono, la capacidad y el tipo de propulsión. No obstante, todas ellas presentan inconvenientes similares; un desgaste frecuente en el sistema de acarreo de estiércol y un elevado costo de adquisición, lo que dificulta la amortización del equipo para los pequeños productores.

El mecanismo acarreador, cuenta con elementos mecánicos como ser cadenas, engranajes y bujes, sometidos a elevadas solicitaciones con el agravante que el material a transportar es erosivo y alcalino, lo que provoca la rotura frecuente generando elevados costos de mantenimiento.

Considerando la problemática mencionada se ha realizado un estudio de posibles soluciones a estos inconvenientes, teniendo como consigna eliminar del sistema de acarreo y en el cual el abono llegue al esparcidor por acción de la gravedad.

2. DESARROLLO

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente se han propuesto varias alternativas, las cuales luego de ser evaluadas de acuerdo con los problemas que se presentan a los productores florihorticultores y las sugerencias realizadas por fabricantes de implementos agrícolas, se ha optado por un equipo que subsane estas carencias y tenga un bajo costo de adquisición y mantenimiento, adaptable a las características de la económicas de los productores de la región.

En la bibliografía consultada se ha encontrado descripciones del funcionamiento de implementos con algunas similitudes con el modelo que se pretende desarrollar, pero no así de los métodos de cálculos y teorías aplicadas para la determinación de solicitaciones mecánicas y potencia requerida. Tampoco se han encontrado referencias sobre propiedades mecánicas del abono que se utilizara.

Por tal motivo, es que se ha decidido desarrollar un prototipo del sistema de molienda a escala de lo que será la abonadora.

Para la determinación de los esfuerzos y potencias requeridas, se ha considerado como base la teoría de corte de una fresa actuando en concordancia. Esta teoría determina la fuerza y potencia de corte en función de la fuerza tangencial que se genera como reacción al corte del material a trabajar. Se ha adoptado esta teoría, debido a la similitud encontrada con el mecanismo que se pretende implementar, en el cual una cuchilla actuará como si fuese una fresa, pero en el caso analizado, se deberá contemplar la cantidad de conjunto de cuchillas paralelas que han de actuar de manera simultánea.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con este prototipo se pretende evaluar el comportamiento del abono, como así también medir la potencia requerida por el mecanismo y a su vez contrastar la teoría aplicada.

El prototipo consiste en dos sistemas fundamentales: la tolva y el sistema triturador.

2.1. Tolva

La tolva está constituida por cuatro laterales de chapa (Figura 1), formando un recinto trapezoidal el cual ha de contener el abono, que pasará por acción de la gravedad al sistema de trituración situado en el fondo de la misma.

El dato requerido de la tolva es el ángulo de inclinación necesario de sus laterales, de modo que permita el deslizamiento del abono hasta el rolo sin que se adhiera y maximice el volumen de carga de la misma.

El ángulo se determinará mediante el diseño de dos de sus lados fijos y dos regulables, mediante un sistema de bisagras y varillas roscadas que permitirán la regulación manual.

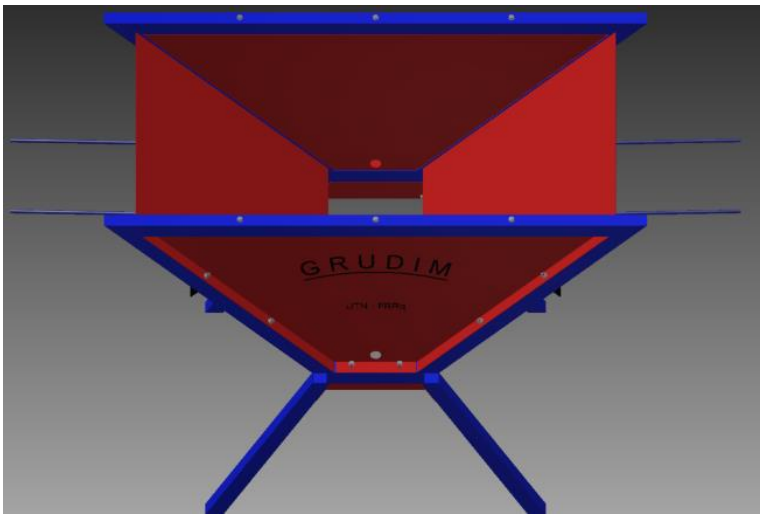


Figura 1: Tolva

2.2. Sistema triturador

Este sistema triturador (Figura 2) ha sido ideado de manera que desmenuce el abono mediante un rolo, el cual cuenta con cuchillas dispuestas sobre él de manera radial (Figura 3), las cuales se intercalan sobre otras fijas (Figura 4), solidarias a la estructura. A su vez, en el fondo tendrá una rejilla (Figura 5), que define la granulometría del abono a esparcir.

Es importante destacar que las cuchillas sobre el rolo quedan sujetas mediante tornillos (Figura 6), facilitando su inclusión o remoción, y de esta manera poder variar la separación entre las mismas, permitiendo determinar la cantidad de cuchillas necesarias para la operación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La rejilla (Figura 5), posee dimensiones fijas, por lo que se prevé la construcción de dos o tres tamaños para conseguir la dimensión requerida del abono.

De éste sistema se pretende determinar: el número de cuchillas necesarias; la velocidad y la potencia, para lograr un tamaño adecuado del abono para permitir una correcta dosificación en el terreno a abonar.

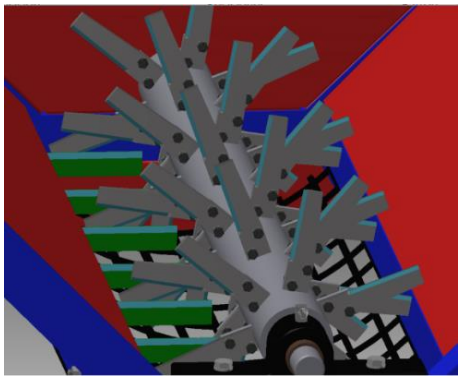


Figura 2: Sistema triturador

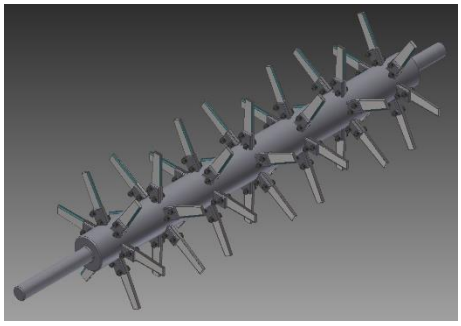


Figura 3: Rolo

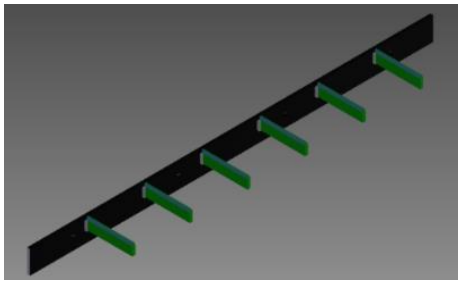


Figura 4: Cuchillas fijas

ISBN: 978-987-1676-63-7

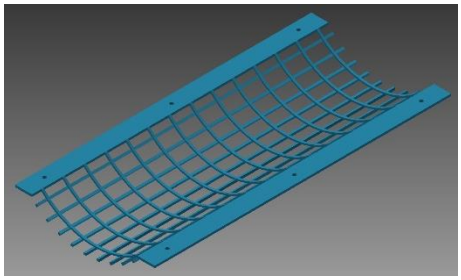


Figura 5: Malla o Rejilla

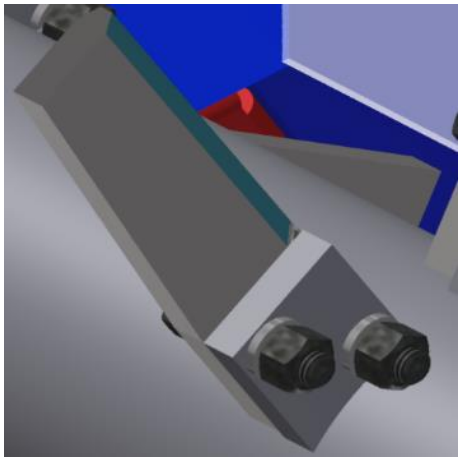


Figura 6: Sujeción por tornillos

3. CALCULOS

Para la realización de los cálculos se seleccionó un tractor de características que se engloba en el común de los utilizados en las labores de florihorticultura de la zona. Del cual se obtuvieron los valores característicos de funcionamiento Tabla 1.

Tabla 1. Datos característicos de un tractor

Tractor
Marca: John Deere
Modelo: 3029T
Potencia:
Potencia del motor a régimen nominal: 48 kW (64 hp)
Potencia a la TDP a régimen nominal: 41 kW (55 hp)
Toma de potencia:
Tipo Independiente
Accionamiento Mecánico
Régimen estándar: 540 rpm
Régimen del motor a régimen nominal de la TDP: 2400 rpm
Avance medio de trabajo: 10 km/h

ISBN: 978-987-1676-63-7

Además, se ha contemplado que en los campos de la región es necesario esparcir en promedio 2000 kg de abono por hectárea. A su vez, por una cuestión de productividad, es necesario que el ancho de labor sea de unos 10 m.

En base a estos datos se determinó caudal y la velocidad con la cual se desplazara el abono dentro de la tolva, de acuerdo a una sección de salida dada.

Con los datos anteriores y tomando como relación de construcción de 50 %, (esto es, tamaño abonadora vs prototipo de molienda), se resumen en la Tabla 2 los parámetros característicos adoptados de las dimensiones y velocidades teóricas que alcanzara el rolo en funcionamiento.

Tabla 2. Parámetros característicos de diseño.

Parámetros característicos del prototipo			
Velocidad de avance del estiércol hacia el triturador	V_a	4357,30	mm/min
Ancho de fresa	*b*	10,00	Mm
Resistencia especifica de corte	*ks*	0,02	kg/mm2
Largo de cuchilla	*e*	75,00	Mm
Diámetro exterior rolo	*D*	230,00	Mm
Numero de dientes	*Z*	6	dientes
Numero de columnas de dientes	Z_p	7	dientes
Velocidad tangencial Mínima	v_{min}	0,00	m/seg
Velocidad tangencial Máxima	v_{max}	9,75	m/seg

Mediante la Ecuación (1) de la teoría de cálculo de mecanizado adoptada y los parámetros de diseño del sistema de trituración, se han obtenido los valores reflejados en la Tabla 3 y que se han empleado para la plantilla de simulación estática que se detallara más adelante.

$$F_{máx} = \frac{2\pi \cdot V_a \cdot b \cdot k_s \sqrt{e(D-e)}}{1000 \cdot Z \cdot v} \quad (1)$$

Tabla 3. Resultados

Esfuerzos Máximo				**Sistema Internacional**	
Fuerza máxima	F_{max}	54469,66	Kg	534,35	N
Fuerza mínima	F_{min}	10,09	Kg	98,98	N
Momento Torsor					
Momento torsor máxima	$M_{t\,M}$	6264011,23	Kgm	61449,94	Nmm
Momento torsor mínima	$M_{t\,m}$	1,16	Kgm	11379,6	Nmm
Potencia por Cuchilla	*N*	2,62	CV	1,93	kW
Potencia de Total	N_T	18,37	CV	28,97	kW

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las teorías de corte con arranque de viruta fueron formuladas en forma empírica, las cuales contemplan coeficientes adimensionales los cuales obligan a utilizar los parámetros en unidades específicas, por lo que para llegar a valores significativos se debe respetar dichas unidades.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1. Simulación estática

Mediante el paquete de elementos finitos del software Autodesk Inventor se realizó una simulación estática de tensiones, tomando como base para la realización de este los valores calculados anteriormente, la cual arrojo los siguientes resultados ver Tabla 4 y que pueden verse en las Figuras 7 a 9 de la página siguiente.

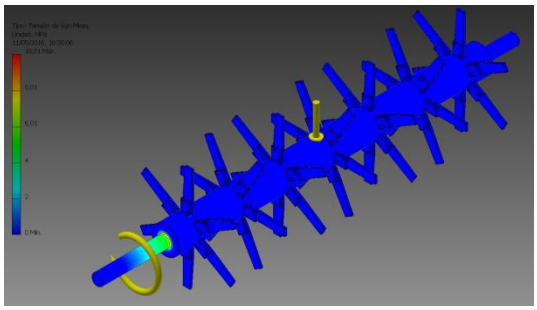


Figura 7: Tensión de Von Mises

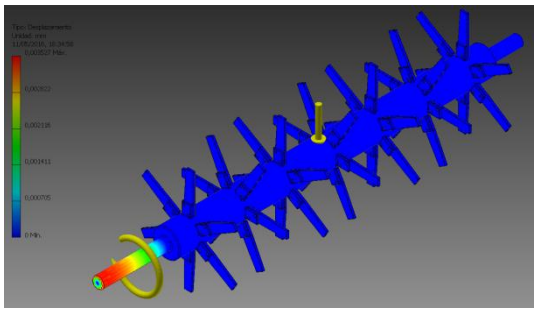


Figura 8: Desplazamiento

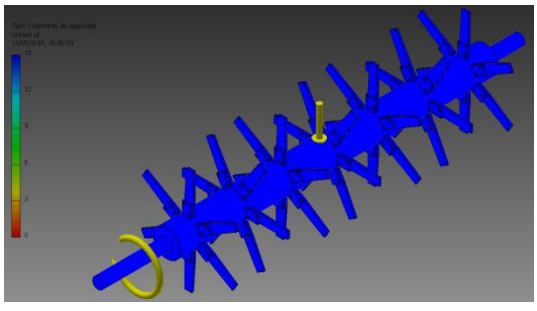


Figura 9: Coeficiente se seguridad

Tabla 4. Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Tensión de Von Mises	0,0000 MPa	10,0101 MPa
Desplazamiento	0,0000 mm	0,0035 mm
Coeficiente de seguridad	15 su	15 su

ISBN: 978-987-1676-63-7

Comparando las tensiones máximas de Von Mises con el límite de fluencia del acero SAE 1010 que es 2500 Kg/cm^2 (245,17 MPa), podemos decir que es un valor que permite justificar la construcción del prototipo ya que este el mismo resistiría las máximas tensiones de falla o rotura anteriormente calculadas.

4. CONCLUSION

Los trabajos realizados en el marco del proyecto, al momento de la presentación de este trabajo, contemplan el diseño computacional del prototipo del sistema de triturado y la realización de una plantilla de simulación estática de tensiones del rolo de trituración. De este análisis se han obtenido resultados que indican que el modelo es adecuado a los requerimientos calculados en forma teórica, avalando la construcción del prototipo.

Resta finalizar la construcción del prototipo (físico) para determinar si la teoría adoptada para el cálculo refleja los esfuerzos reales que se desarrollan en el sistema de molienda, cuando el mismo está operando en condiciones similares a las reales y con una muestra del abono que se pretende utilizar.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS

[1] BRUINS, D. H. Manual del ingeniero técnico. Herramientas y máquinas-herramientas. Vol X. T. II. Madrid: Urmo, 1981.

[2] DUBBEL, H. Manual del constructor de máquinas. (2ª ed.) Barcelona: Labor, 1945.

[3] GERLING, Heinrich. Alrededor de las máquinas-herramientas. (2ª ed.) Barcelona: Reverté, 1982.

[4] KOZHEVNIKOV, S. N.; YESIPENKO, Y. I.; RASKIN, Y. M. Mecanismos. Madrid: Gustavo Gili, 1975.

[5] MOTT, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. México: Pearson Educación, 2006.

[6] NORTON, Robert L. Diseño de Maquinaria. Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. (3ª ed.). México: Mc Graw Hill, 2005.

[7] ORTIZ-CAÑAVATE, Jaime. Las maquinarias agrícolas y su aplicación. (6ª ed.) Madrid: Mundi-Prensa, 2003.

[8] PERRY, Robert. Manuel del ingeniero químico. (6ª ed.). México: McGraw-Hill, 1992.

[9] PEZZANO, Pascual. Tecnología mecánica. Máquinas y herramientas. Tomo II. (10ª ed.) Buenos Aires: Alsina, 1984.

[10] PEZZANO, Pascual. Tecnología mecánica. Tomo I. (10ª ed.) Buenos Aires: Alsina, 1984.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DE LA TEORIA A LA PRACTICA EN EL DISEÑO DE ELEVADORES A CANGILONES DISCONTINUOS DE DESCARGA CENTRIFUGA.

Garofoli, Aldo D [1], Garofoli, Jorge M [2]

[1] Departamento de Ingeniería– Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina
correo-e: garofoli@uns.edu.ar.

RESUMEN

En la elevación de materiales a granel, con características como: baja humedad, granulometría homogénea, baja abrasividad, peso específico medio o liviano y buena fluidez, los equipos más utilizados son elevadores a cangilones del tipo discontinuo y descarga centrífuga. Su uso más difundido es el transporte de cereales, oleaginosos y semillas en general.

Con el fin de minimizar la inversión inicial del equipo en estudio y disminuir el tamaño de las instalaciones, suelen omitirse criterios de diseño que afectan al producto transportado, a los costos de operación, a la confiabilidad y a la durabilidad de la instalación.

En los trabajos de referencia [1] y [2], se analizaron problemas de retorno de material transportado, por descarga tardía o prematura y en [2], se realiza una breve revisión al problema de la carga

Constructivamente, se propone una solución integral que contempla una inversión inicial mayor para la construcción del equipo, pero que se amortiza con los ahorros obtenidos por menores costos operativos, y de mantenimiento.

La metodología propuesta consiste en presentar variantes y hacer un análisis detallado de beneficios y perjuicios que causan cada una de ellas.

Como conclusión a este estudio se proponen instalaciones más seguras, más confiables y que trabajan a menores velocidades, dañando menos al producto transportado y logrando así alcanzar la vida útil para la capacidad de diseño.

Referencias:

[1] Gambarrota, F, Optimisation de efficacité d' unélévateur á godets, Revue INFOVRAC, 161, 73-75 (2008).

[2] Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 18, N°, pp 55-67, 2014.

Palabras Claves: *Elevadores – Cangilones – Transporte.*

1. INTRODUCCIÓN

Los elevadores a cangilones o norias discontinuos de descarga centrífuga, Figura 1 son los transportadores normalmente usados para elevar materiales a granel, con características tales como: baja humedad, granulometría homogénea, baja abrasividad, peso específico medio o liviano y buena fluidez, tal lo expresado en los trabajos referenciados.



Figura 1

Por tratarse de un proceso de elevación, existe un consumo de energía, que es proporcional al caudal del material transportado y a la diferencia de alturas entre los puntos de carga y de descarga.
Los problemas analizados en los trabajos de referencia, sólo se vinculan a inconvenientes producidos por una mala descarga, (que ocasiona retornos parciales de material transportado), porque la misma se produce a la máxima altura de elevación, lo que implica que ya se ha consumido la energía prevista para el transporte; por lo tanto todo retorno de material ocasiona una pérdida, no sólo energética sino también de la calidad de lo transportado. Este es el análisis al que nos referiremos en el presente trabajo.
Las referencias [1] y [2], basan el análisis en los problemas de retorno de material transportado, por problemas de defecto o exceso de fuerza centrífuga respectivamente al efectuar la descarga; dichos retornos se pueden producir por el ramal ascendente o cargado o por el espacio que queda entre la estructura y ramal descendente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los problemas mencionados generan costos adicionales, fundamentalmente cuando el retorno se produce por descarga prematura y el material desciende en oposición al ramal ascendente del transportador, que es el encargado de efectuar la elevación.



Figura 2

Los costos adicionales se los puede dividir en costos de operación, de mantenimiento y costos asociados a las pérdidas sufridas por los daños ocasionados al material transportado.
Los costos de operación son mayores porque el material que retorna, debe volver a elevarse.
Los costos de mantenimiento (adicionales), se deben a la abrasión producida por el material que retorna en caída libre y en forma caótica, impactando contra los laterales del elevador, contra los cangilones que elevan el material (caso de fuerza centrífuga excesiva) y contra el elemento de tracción. Todo reduciendo la vida útil de cada uno de dichos elementos y descargando parcialmente a los cangilones que efectivamente realizan el transporte. Esta es una causa por la que se observa mayor desgaste en la parte inferior del elevador, que es la más sensible desde el punto de vista estructural por soportar todo el peso de la instalación.

Los choques que se generan entre el ramal ascendente y el material que retorna en sentido inverso en caída libre producen roturas al producto transportado, afectando su calidad, a consecuencia su valor de venta y generando costos asociados a dichas perdidas.
Si el material a transportar es algún tipo de cereal y/u oleaginosa, la situación se agrava ya que al degradarse se producen polvos con alto contenido de celulosa, que si no son adecuadamente evacuados, aumentan el riesgo de explosión.
La metodología objeto de este estudio propone analizar variantes de diseño, estudiar el impacto que generan y la viabilidad de su implementación.

2. DESARROLLO

En el presente se analizará el caso de elevadores cuyo elemento de tracción, es una cinta flexible de material compuesto, de uso común en la industria actual.
Los primeros elevadores con esta modalidad de elemento de tracción, usaron cintas compuestas por telas de algodón o yute, cosidas con hilos para evitar la disgregación de la misma; con el avance de la tecnología, se desarrolló el procesamiento y vulcanización del caucho, permitiendo el surgimiento de cintas de tela y goma.

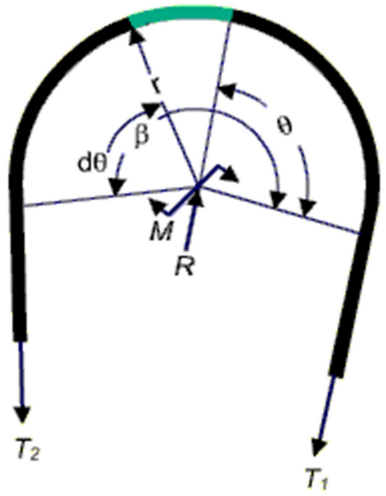
ISBN: 978-987-1676-63-7

Con posterioridad, nuevos desarrollos de materiales sintéticos para las fibras, permitieron construir cintas más resistentes y por consiguiente, para un mismo esfuerzo da como resultado, un espesor menor.
A la fecha, en el mercado comercial se encuentran cintas de tela orgánica y goma, cintas sintéticas y cintas que para soportar el esfuerzo de tracción, utilizan cables de acero. Estas últimas en general se usan para cintas transportadoras.

Teniendo en cuenta lo antes expresado, se analizan distintas situaciones.

Primer caso: reemplazo de cintas de tela y goma por cintas de tejidos sintéticos.

La transmisión de potencia de la unidad motriz a la cinta, figura 3, se produce por fricción entre esta y el tambor motriz. Dicha transmisión se modela matemáticamente a través de la Ecuación de Prony, donde la diferencia entre esfuerzos tangenciales a la entrada la salida de la cinta, del perímetro de tambor motriz, se relacionan con el coeficiente de rozamiento, al ángulo de abrace y con una constante "**e**", según la expresión:



$$\frac{T_2}{T_1} \leq e^{\mu\beta} \qquad (1)$$

Figura 3

Esta expresión deja ver que la potencia transmitida, no es proporcional al diámetro del tambor sobre el que se hace girar la cinta en su circuito cerrado, sino a su ángulo de abrace.
Como consecuencia, existe la tentación (y el hábito en la industria) de reducir al mínimo el diámetro del tambor de mando encargado de transmitir la potencia.
Si a esta condición se le agregan cintas de mayor tecnología, fabricadas con cordones de material sintético (más resistentes que las hechas con fibras de algodón y por ende de menor espesor), se observa que las mismas sufren menores tensiones de flexión al ser arrolladas sobre los mismos tambores sin variar los esfuerzos de tracción a la entrada y salida del tambor motriz, y por lo tanto permiten menores radios de curvatura
Esta línea de razonamiento induce a la elección de cintas cuyos componentes son materiales sintéticos, dado que permiten –inicialmente- utilizar tambores de menores dimensiones. Estos a su vez para operar a una misma velocidad tangencial, girarán a mayor número de revoluciones. De allí se deduce que resulta viable reducir la relación de transmisión entre el motor y el tambor motriz y finalmente como consecuencia reducir los tamaños del transportador y disminuir los costos totales de inversión inicial.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por otro lado, aumentar las revoluciones por minuto del tambor, implica aumentar la fuerza centrífuga generada sobre el material transportado y sobre todo el conjunto. Del mismo modo, la resultante de las fuerzas actuantes sobre el producto, impide que el material descargado impacte con el cangilón precedente. Esta condición de descarga con exceso de fuerza centrífuga, permite una menor separación de cangilones, lo que a priori implicaría un mayor caudal transportado con un elevador de dimensiones más reducidas.

Sin embargo y en contrapartida de los aparentes beneficios anteriormente citados, se pueden mencionar los siguientes perjuicios: (manteniendo la hipótesis de reducción del diámetro del tambor motriz anteriormente citada)

a) Para una misma velocidad tangencial (caudal transportado proporcional a esta magnitud), se obtiene una mayor fuerza centrífuga en el recorrido curvo sobre el tambor motriz de menor diámetro. Se genera entonces una descarga anticipada del material transportado y como consecuencia un alto grado de retorno al pie del elevador por el ramal ascendente. Así se ocasionan múltiples inconvenientes, como degradación del material transportado por impacto y descarga parcial de los cangilones. Sumado a ello, se surge el costo de volver a elevar el mismo material y el desgaste generado a las partes mecánicas por erosión e impacto durante su descenso.



Figura 4

La figura 4 muestra un Elevador de cangilones de descarga centrífuga real, de 80 Tn/h base trigo, con cangilones de 1,8 litros, velocidad 174 m/min y diámetro de tambor motriz de 520 mm, que efectúa descarga prematura y como consecuencia retorno, ocasionando los daños antes mencionados.

b) Como constructivamente resulta más simple y económico construir tramos de elevador de idénticas dimensiones (salvo el tramo de ajuste de altura), el tambor motriz y el tensor se realizan en diámetros iguales. Para el caso en que el tambor motriz sea también tensor, lo antes mencionado se refiere al tambor inferior, donde se produce la carga de los cangilones. Lógicamente, en éste caso y por continuidad, la velocidad del tambor inferior será igual a la del motriz.
Como se puede observar en el trabajo de referencia [2], en el extremo inferior del transportador, la acción del peso debida a la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga generada por la rotación, tienen la misma dirección y sentido. Por lo tanto, la resultante de fuerzas actuantes, que siempre es perpendicular a la superficie libre del material

ISBN: 978-987-1676-63-7

dentro del cangilón, hace que el mismo vea dificultado su llenado. Esto disminuye el coeficiente de llenado y como consecuencia la capacidad teórica de cada balde y finalmente, la del elevador.

c) También analizando el trabajo [2], se observa que al tener descarga prematura por exceso de fuerza centrífuga, se consume una cantidad de energía adicional elevando en exceso el material transportado, disipándose este exceso durante el impacto del material contra la carcasa superior del elevador. Síntoma de este fenómeno es la necesidad de proteger con materiales anti abrasión el interior de la cúpula del cabezal motriz. Técnicamente hablando, esta medida ésta en oposición a las normas del buen construir y del buen diseño.

d) Al ser los tambores propuestos de menor tamaño, el cangilón (que es rígido) trata de girar alrededor de la línea o líneas de fijación (según las filas de bulones requeridas). Por acción y efecto de su peso propio y de la fuerza centrífuga, el cangilón se inclina en forma relativa al eje determinado por la línea de fijación, desprendiendo parcialmente su dorso de la superficie de la cinta. Del mismo modo, la parte del material que descargó prematuramente, que rebotó en la carcasa superior, que no alcanzo el canal de descarga y que es arrastrado por el efecto ventilación, queda incrustado entre la cinta y el dorso del cangilón acumulándose en forma de cuña. Este defecto ocasionará, al reinicio del ciclo de carga y al dragar en el fondo del elevador, un efecto de arrancamiento de los bulones de fijación y un deterioro de la cinta provocado por el la arista delantera del cangilón contra la misma. Este efecto se ve agravado, sobre tambores de diámetro menor al óptimo, si el diseño recurre a cangilones de gran capacidad, que requieren doble hilera de tornillos para su fijación a la cinta.



Figura 5a

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 5b

Segundo caso: tambores motriz y tensor de distinto diámetro:

En este caso se comenzará con las desventajas.

a) El tambor superior al ser de mayor diámetro para una misma velocidad tangencial, será más pesado lo que implica una estructura de soporte más resistente y de mayores dimensiones. Además al tener el tambor motriz de mayor diámetro para una dada velocidad tangencial, la reducción de velocidad entre éste y el motor, será mayor y más costosa, lo que dará como resultado una mayor inversión inicial.
b) El tambor inferior o tensor de dimensiones mayores que el motriz, para minimizar el efecto de la fuerza centrífuga durante el dragado (carga), ocasionará una estructura como la esquematizada en la figura 6, que constructivamente es más onerosa al no ser iguales los tramos intermedios entre ambos tambores.

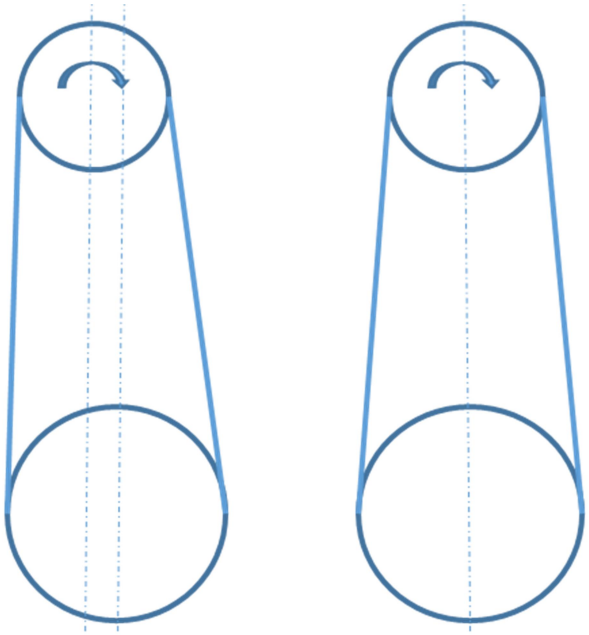


Figura 6

ISBN: 978-987-1676-63-7

En contrapartida este diseño permitirá tener menor retorno por mejorar la descarga, (sin exceso de fuerza centrífuga), menor costo de energía al no sobreelevar el material (por el exceso de fuerza centrífuga), menores daños a la cinta por esfuerzos de flexión inferiores, menor daño al material al no existir retornos y una mejor carga por minimizar el efecto de la fuerza centrífuga. Este conjunto de condiciones permitirá elegir una carcasa de cinta de especificación inferior, lo que también reduce los costos iniciales.

3. **Conclusión**

Si bien en primera instancia, la instalación es más voluminosa y constructivamente más compleja, en realidad el tamaño no resulta tan diferente, al no tener que volver a elevar el material que retorna en el modelo inicial. Esto también se traduce en una disminución del consumo de energía y en los costos de mantenimiento, dado que se evita el desgaste por erosión que ocasionaba el material que retornaba en su caída libre. A su vez por tener tambor de pie de mayor diámetro, se disminuye la fuerza centrífuga, obteniendo un mejor llenado de los cangilones y a resultando en una menor tendencia al desprendimiento de estos. Todo lo anterior combinado redunda en una mayor vida útil de la cinta debida a la reducción de los daños ocasionados por los cangilones y por menores tensiones de fatiga al flexionarse menos sobre tambores de mayores diámetros.

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SEGURIDAD E HIGIENE EN EL DISEÑO DE MÁQUINAS. UNA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y APLICACIÓN AL DESARROLLO DE UNA CORTADORA DE CAPULLOS DE SEDA

S. Meza[1], E. Fleytas[1], A. Vilas[3], Juan Szombach[2,3], A. Morrongielo[1], D. Martinez Krahmer[2,3]

[1] Cátedra de Higiene y Seguridad en el Trabajo – Universidad Nacional de Lomas de Zamora
correo-e: silalemz@yahoo.com.ar ; erikafleytas@yahoo.com.ar
[2] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora,
Camino de Cintura y Juan XXIII, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina
[3] Centro de Mecánica, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Avenida General Paz 5445,
Miguelete, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

La disminución y prevención de accidentes, es un factor relevante en la industria. Para esto se cuenta con legislación nacional, como la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo, que enmarca obligaciones que asumen las partes en distintos estamentos, incluyendo el diseño de máquinas. De todos modos, debemos contar con conocimientos más amplios, para planificar un diseño seguro.

Por lo tanto, hemos realizado una revisión en la normativa vigente para observar cuales son las cuestiones más importantes a considerar en el diseño de máquinas, y generar un proceso de diseño que contemple la minimización de riesgos.

Con el objeto de observar la aplicación práctica de las normativas existentes, se las han empleado en el desarrollo de un equipo realizado en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial para la industria sericícola. La máquina tiene como objetivo principal facilitar y agilizar el trabajo de corte de los capullos de seda y la separación de la pupa, proceso que actualmente se realiza de a uno por vez y en forma manual. El corte en el dispositivo se efectúa mediante una cuchilla circular ubicada entre dos platos giratorios concéntricos. Luego la maquina separa el capullo del gusano.

En el desarrollo se tuvo en cuenta un plan de trabajo que aportó herramientas para un “Diseño Seguro”, y junto con el equipo técnico se pudieron plantear las características de la máquina evaluando los riesgos emergentes en cada etapa y considerando el mal uso previsible de la misma.

También durante la actividad, y gracias a la evaluación de los riesgos, se observó que algunos no estaban presentes y en aquellos que sí, se buscó mitigarlos con medidas correctivas o preventivas.

Para finalizar, se diseñó y construyó la máquina en cuestión, se determinaron seis riesgos posibles, y para cada uno de ellos se proveyó una solución particular.

Palabras Claves: *Seguridad, Diseño, Maquinas, Riesgos.*

1. INTRODUCCION

Uno de los factores relevantes para el crecimiento de la industria, es lograr la disminución y prevención de accidentes que se producen por el uso de equipos y máquinas-herramientas empleadas por la industria y consumidores, a fin de mejorar la productividad y disminuir los costos.

Cabe destacar que la problemática de los accidentes no solo tiene efectos sobre el ámbito industrial-laboral, sino también sobre el médico-hospitalario y el judicial.

La ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo [1] enuncia en su artículo 6º "Las reglamentaciones de las condiciones de higiene de los ambientes de trabajo deberán considerar primordialmente: a) características de diseño de plantas industriales, establecimientos, locales, centros y puestos de trabajo, maquinarias, equipos y procedimientos seguidos en el trabajo"; y en su decreto reglamentario Nº351 [2] se indica en el artículo 103: "Las máquinas y herramientas usadas en los establecimientos, deberán ser seguras y en caso de que originen riesgos, no podrán emplearse sin la protección adecuada". También en el artículo 106 se enuncia que: "Las partes de las máquinas y herramientas en las que existan riesgos mecánicos y donde el trabajador no realice acciones operativas, dispondrán de protecciones eficaces, tales como cubiertas, pantallas, barandas y otras." Y en el artículo 107: "Frente al riesgo mecánico se adoptarán obligatoriamente los dispositivos de seguridad necesarios, que reunirán los siguientes requisitos:

a. Constituirán parte integrante de las máquinas.
b. Actuarán libres de entorpecimiento.
c. No interferirán, innecesariamente, al proceso productivo normal.
d. No limitarán la visual del área operativa.
e. Dejarán libres de obstáculos dicha área.
f. No exigirán posiciones ni movimientos forzados.
g. Protegerán eficazmente de las proyecciones.
h. No constituirán riesgo por sí mismos."

Por lo tanto, es necesario proporcionar estrategias que brinden conocimiento y sirvan para establecer herramientas de gestión, aportes legislativos y parámetros de trabajo, que hagan más seguros los procesos de fabricación y el uso de las máquinas.

Para poder incluir aspectos de seguridad en un diseño de máquina, comencemos viendo que información nos proporciona el material normativo vigente:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- La Norma ISO 12100:2010 [3]: "Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación y reducción del riesgo". Este documento nos provee los principales lineamientos sobre seguridad en máquinas para su diseño. El riesgo es evaluado siguiendo pasos y analizando los peligros emergentes en cada etapa. Los peligros derivan de las características de las maquinas, pudiendo ser eléctricos, térmicos, químicos, asociados a radiaciones, etc. Lo importante es evaluar el riesgo durante el diseño de la máquina, su elaboración, así como en su instalación.

En la Comunidad Europea se dispone de la DIRECTIVA DE MAQUINAS 98/37/CE [4] que define conceptos relevantes en esta investigación:

- «Máquina»: — conjunto de piezas u órganos unidos entre ellos, de los cuales al menos uno habrá de ser móvil, provisto de accionamientos, circuitos de mando y potencia, etc., asociados de forma solidaria para una aplicación determinada, como ser la transformación, tratamiento, desplazamiento y acondicionamiento de un material, — un conjunto de máquinas que, para llegar a un mismo resultado, estén dispuestas y accionadas para funcionar solidariamente, — un equipo intercambiable que modifique la función de una máquina, que se ponga en el mercado con objeto de que el operador lo acople a una máquina, o a una serie de máquinas diferentes, siempre que este equipo no sea una pieza de recambio o una herramienta;
- «Componente de seguridad»: aquel componente que no constituya un equipo intercambiable y que el fabricante, o su representante establecido en la Comunidad, ponga en el mercado con el fin de garantizar, mediante su utilización, una función de seguridad y cuyo fallo o mal funcionamiento ponga en peligro la seguridad o la salud de las personas expuestas.

Esta directiva enuncia en términos imperativos en el Artículo 21. …"sólo se pueden poner en el mercado y en servicio si no comprometen la seguridad ni la salud de las personas ni, en su caso, de los animales domésticos o de los bienes, cuando estén instalados y mantenidos "… y en su Anexo I plantea los requisitos esenciales de seguridad y de salud. Este anexo se basa en Principios de integración de la seguridad a saber:

- Por su misma construcción, las máquinas deberán ser aptas para realizar su función, regulación y mantenimiento, sin que las personas se expongan a riesgo alguno cuando las operaciones se lleven a cabo en las condiciones previstas por el fabricante. Las medidas que se tomen deberán ir encaminadas a suprimir los riesgos de accidente durante la vida útil previsible de la máquina…
- Al optar por las soluciones más adecuadas, el fabricante aplicará los principios siguientes, en el orden que se indica: a) eliminar o reducir los riesgos en la medida de lo posible…; b) adoptar las medidas de prevención y contención…; y c) informar a los usuarios de los riesgos residuales debidos a la incompleta eficacia de las medidas de

ISBN: 978-987-1676-63-7

protección adoptadas, indicando si se requiere una formación especial y señalar si es necesario un equipo de protección individual. Asimismo:

a) Al diseñar y fabricar la máquina y al redactar las instrucciones, el fabricante deberá prever, no solamente un uso normal, sino también aquel que de la máquina puede esperarse de forma razonable. Cuando el empleo anormal entrañe un riesgo, ésta deberá estar diseñada para evitar que se utilice de manera anormal. Entonces, en las instrucciones de empleo deberán señalarse las contraindicaciones de uso que, según la experiencia, pudieran presentarse.

b) En las condiciones previstas de utilización, habrán de reducirse al mínimo posible la molestia, la fatiga y la tensión psíquica (estrés) del operador, teniendo en cuenta los principios ergonómicos.

c) El fabricante, en la etapa de diseño y fabricación, tendrá en cuenta las molestias que pueda sufrir el operador por el uso necesario o previsible de equipos de protección individual (calzado, guantes, etc.).

d) La máquina deberá entregarse con todos los equipos o accesorios especiales y esenciales para que pueda ser regulada, mantenida y usada sin riesgos.

El Real Decreto 1644/2008 [5] establece normas para la comercialización y puesta en servicio de máquinas. En su anexo I se definen los principios generales de seguridad y de salud relativos al diseño y fabricación de máquinas:

- El fabricante de una máquina, o su representante autorizado, deberá garantizar la realización de una evaluación de riesgos con el fin de determinar los requisitos de seguridad y de salud que se aplican a la máquina. La máquina deberá ser diseñada y fabricada teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de riesgos. Mediante un proceso iterativo de evaluación y reducción de riesgos, el fabricante o su representante autorizado deberán: Determinar los límites de la máquina, lo que incluye el uso previsto y su mal uso razonablemente previsible,
- Identificar los peligros que puede generar la máquina y las correspondientes situaciones peligrosas, estimar los riesgos, teniendo en cuenta la gravedad de las posibles lesiones o daños para la salud y la probabilidad de que se produzcan. Valorar los riesgos, con objeto de determinar si se requiere una reducción de los mismos, con arreglo al objetivo de la Directiva 2006/42/CE,
- Eliminar los peligros o reducir los riesgos derivados de dichos peligros, mediante la aplicación de medidas preventivas.

En sus principios de integración de la seguridad enuncia:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Las máquinas se deben diseñar y fabricar de manera que sean aptas para su función.…
- Las medidas que se tomen deberán ir encaminadas a suprimir cualquier riesgo durante la vida útil previsible de la máquina, incluidas las fases de transporte, montaje, desmontaje, retirada de servicio y desguace.

Realizada entonces, una revisión del estado del arte referido a los aspectos a considerar en el diseño seguro, aplicaremos los conceptos desarrollados para realizar el diseño y prototipo de una máquina.

Entonces, se presentará el diseño de un equipo efectuado en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial para la industria sericícola. La finalidad fue diseñar y construir una máquina que permita optimizar la producción, y a su vez mejorar las condiciones de higiene y seguridad de los pequeños productores, preservando la salud de los mismos.

En este caso, se trata de una máquina destinada a cortar capullos de seda, que permita poder obtener la materia prima para su manufactura textil.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Descripción de la máquina prototipo

La máquina se diseñó en conjunto entre los Centros de Mecánica y Textiles, del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), estando sus aspectos de seguridad basados en los estudios de la normativa específica, realizados por los integrantes de la cátedra de Higiene y Seguridad en el Trabajo, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

Esta actividad interdisciplinaria tuvo por finalidad cumplimentar con una demanda no resuelta, de pequeños productores sericícolas, de alcanzar un proceso con asistencia mecánica, que facilite y agilice el trabajo de corte de los capullos de seda, así como la separación de la pupa, tarea realizada actualmente en forma manual y de a un capullo por vez, trabajo laborioso y lento, si se tiene en cuenta que un productor pequeño puede llegar a cultivar 20.000 capullos por campaña.

El corte en el dispositivo diseñado y construido, se realiza mediante una cuchilla circular ubicada entre dos platos giratorios concéntricos dotados de compartimientos para alojar los capullos, los cuales luego de ser seccionados en dos partes, caen sobre un plano inclinado, el cual es atravesado por una corriente de aire ascendente. Esto hace que, los gusanos, más pequeños y pesados, caigan por el plano inclinado, mientras que, los capullos de seda, más grandes y resistentes aerodinámicamente, sean elevados y desciendan a un compartimiento de acumulación (Figura 1).

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 1: Fotografía del equipo (izquierda) y renderizado de su interior

El trabajo se inició con los saberes adquiridos durante la lectura de la normativa y los conocimientos existentes sobre diseño en programas CAD, para generar un prototipo computarizado preliminar, que fácilmente puede ser modificado conociendo las capacidades del programa de diseño utilizado.

Para un mejor desarrollo del trabajo se crea un plan de trabajo que aporte herramientas para no perder de vista el "Diseño Seguro", y a la hora de sentarse con el equipo técnico y plantearse las características de la máquina, también se deben tener presentes los riesgos de cada etapa. Las tareas de investigación, desarrollo e innovación no deben perder de vista la higiene y seguridad en el diseño.

Para pensar en un "Diseño Seguro" debemos tener en cuenta los "factores de riesgo". Para ello es pertinente clasificar, en primer lugar, los diferentes agentes de riesgo: eléctrico, mecánico, químico y de usuario.

Estos riesgos se podrían resumir en la siguiente red conceptual:

ISBN: 978-987-1676-63-7

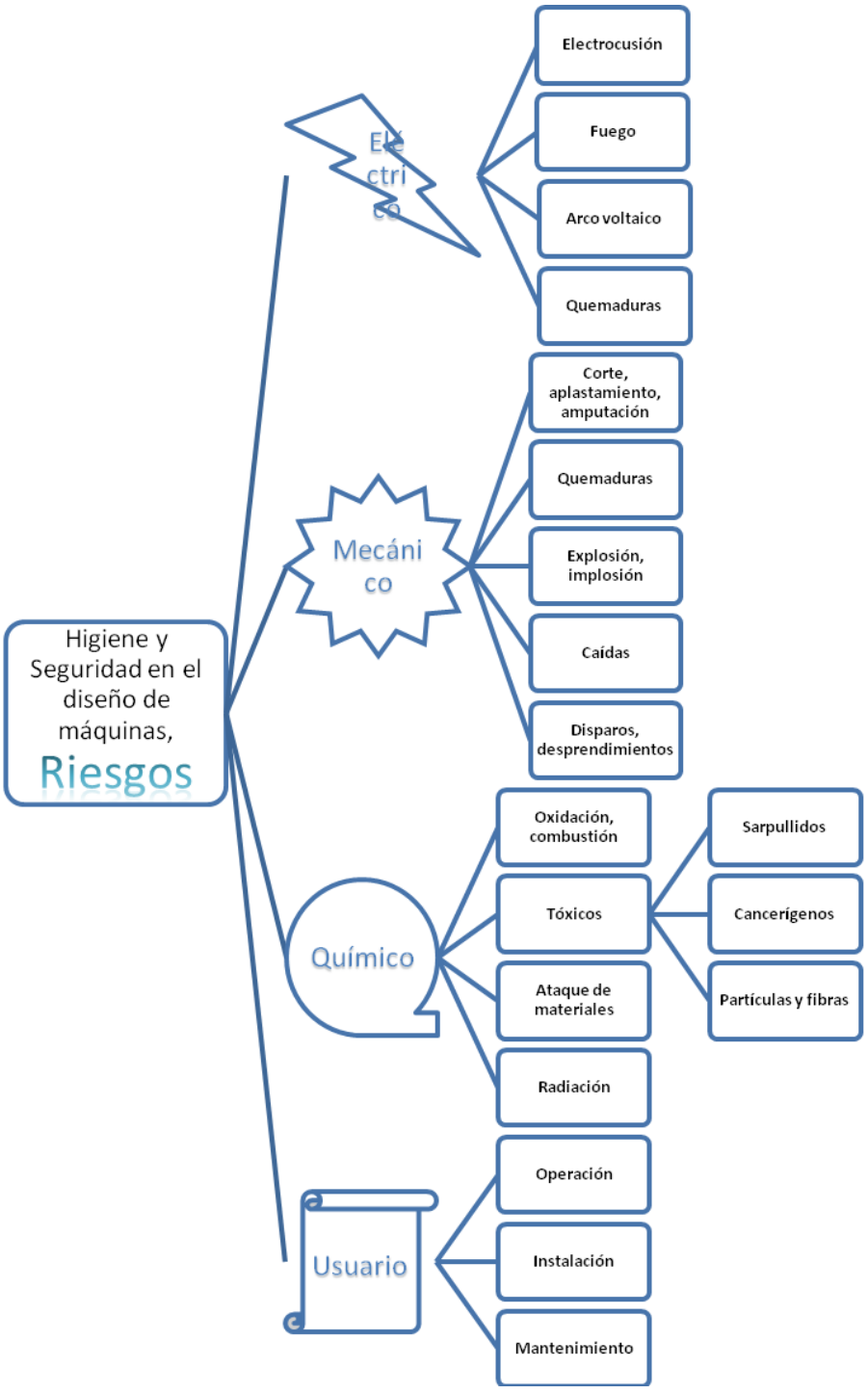


Figura 2: Red conceptual de agentes de riesgos

Los primeros factores abarcan riesgos provenientes del uso de la energía eléctrica para el funcionamiento de la máquina, entre ellos encontramos electrocución, fuego, arcos voltaicos y quemaduras. Los segundos implican los riesgos producidos por elementos con energía mecánica almacenada, ya sea cinética como potencial; entre ellos podemos encontrar cortes, quemaduras, caídas, disparos y explosiones. El riesgo químico se debe al uso de elementos

ISBN: 978-987-1676-63-7

reactivos o contaminantes que podrían generar intoxicación, combustión, ataque de materiales, radiación, etcétera. Y por último podemos ubicar los riesgos relacionados al usuario de la máquina o a aquellas personas que mantengan contacto con la misma; dentro de este tipo podemos destacar el uso indebido del equipo.

Comenzamos a pensar en los riesgos emergentes y establecemos aquellos que la máquina objeto del presente trabajo no posee. Son los siguientes:

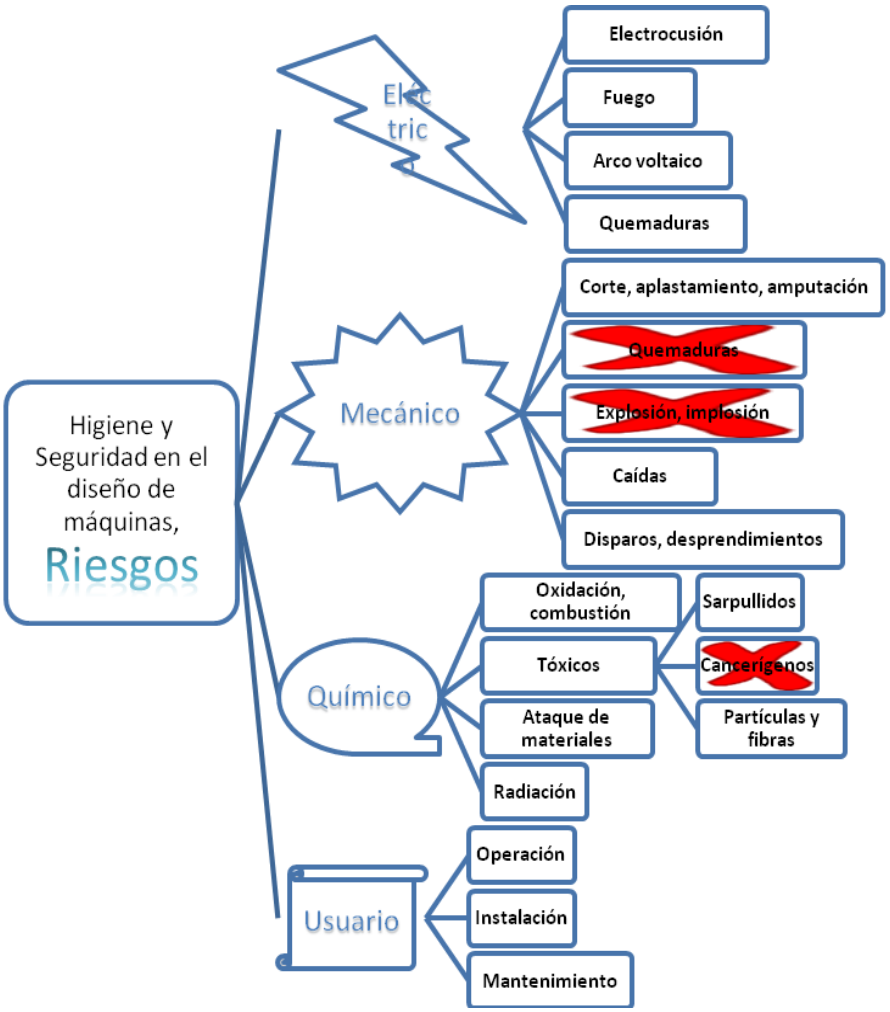


Figura 3: Red conceptual de agentes de riesgo no presentes en la máquina en estudio

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Riesgos identificados

Durante el diseño y la construcción del prototipo con la guía del mapa conceptual de los factores de riesgo, se identificaron los siguientes:

- Cortes y/o amputaciones de falanges por la cuchilla durante el funcionamiento.

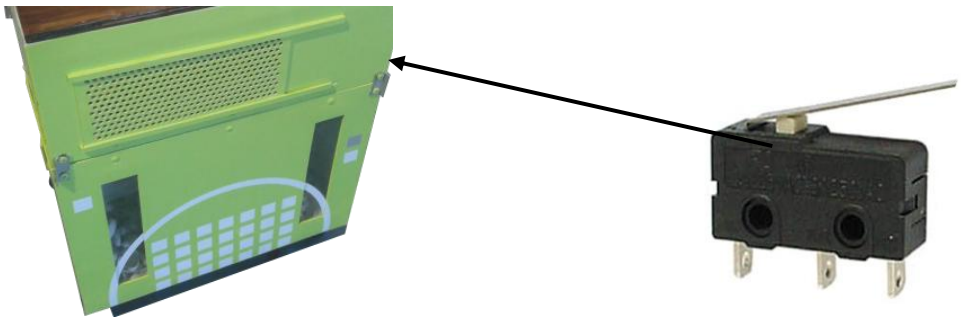
ISBN: 978-987-1676-63-7

- Atrapamientos de los dedos durante la carga.
- Cortes, amputaciones, atrapamientos, etcétera, por arranques repentinos durante el desarme, mantenimiento o armado de la máquina.
- Electrocución por la propia utilización de energía eléctrica para el funcionamiento.
- Incendio por cortocircuitos.
- Contaminación del ambiente de trabajo por el material utilizado.

3.2 Soluciones aplicadas en el prototipo

Las soluciones que se brindaron a los factores de riesgo se enumeran a continuación:

- Para resolver los primeros dos ítems se diseñó una tolva para cargar los capullos de manera solidaria al movimiento de los discos plásticos, y de forma horizontal a la mesa, con una apertura que no permite ingresar la mano hasta una posición cercana a la cuchilla, a menos que se desatornille la tapa de acrílico destinada a la observación del proceso. De esta manera, para que los dedos del operario alcancen la cuchilla, los mismos deben dar media vuelta alrededor del eje de los discos, brindando el tiempo suficiente para reaccionar antes de que ocurra el accidente. En este caso se plantea la posibilidad de incorporar en la tapa de la máquina, una parada de emergencia cercana a la posición de la tolva, con la cual se desconectaría el motor de la red eléctrica, frenando rápidamente el funcionamiento. Este concepto se verifica en la práctica, ya que el sistema de movimiento no acumula la energía cinética suficiente, reduciendo el riesgo.
- Para solucionar el tercer ítem fue contemplado el agregado de una cerradura electromecánica, que al momento de abrir la tapa frontal o la posterior, desconecte el sistema de la red eléctrica, impidiendo el arranque accidental de la máquina (ver figura 4). Este es uno de los sistemas de seguridad que evitan el uso indebido de la máquina, ya que se observó durante pruebas realizadas en el prototipo, atascamientos de capullos en la cuchilla, frenando el motor, lo que debía ser solucionado manualmente, y se efectuaba en ocasiones sin detener el motor, por mera comodidad.



ISBN: 978-987-1676-63-7

Figura 4: Interruptor cerradura, el motor se desconecta al abrir la tapa y activarse el switch (el mismo se coloca en el interior de la carcasa)

- El cuarto y quinto ítem tienen la particularidad de ser ajenos al propio diseño de la máquina, porque la instalación eléctrica donde se conecte la misma, debería poseer un interruptor diferencial y una llave termomagnética acorde (ver figura 5), cuestión que se debe mencionar en el manual de usuario. Sin embargo, podría adicionarse dentro de la máquina una llave termomagnética que se active al momento de enclavarse el motor.



Figura 5: Interruptor diferencial (izquierda), llave termomagnética

- Los gusanos muertos en el interior de los capullos son un foco de generación de microorganismos, situación que debe tenerse en cuenta al momento de ubicar la máquina en un ambiente donde se manejen productos alimenticios. Este es un factor de riesgo de muy alta complejidad para ser sensado y evitado por alguna protección electromecánica. Por esta razón deberá ser aclarado en el manual del usuario.

4. CONCLUSIONES

Durante la gestión de diseño de cualquier máquina salen a la luz gran cantidad de posibles factores de riesgo y maneras de mitigarlos, por lo tanto se debe tener en cuenta que, se requerirán mayor disponibilidad de horas de diseño. Se contemplará la incorporación de sistemas de seguridad, que pueden encontrarse disponibles en el mercado, y otras veces deberán ser diseñados especialmente.

La selección del tipo de protección dependerá de su factibilidad técnica y económica, por ejemplo:

- La posibilidad de usar guantes de malla de acero, cableados a un dispositivo de freno del motor, que en el momento de hacer contacto el guante con la cuchilla, se active y la frene, evitando el accidente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- Incorporar sensores de diversos tipos, teniendo en cuenta la complejidad del sistema de seguridad de la máquina y la influencia en los costos de la misma.

El desarrollo de una máquina que se comercializará en el mercado, además de las características propias de funcionalidad, uso y producción, requiere un valor agregado en cuanto a la higiene, seguridad y ergonomía para la exportación, debido a las normativas internacionales.

Para finalizar, al considerar un diseño seguro de máquinas, no se debe perder de vista que la ingeniería y el desarrollo deben ir a la par de la higiene, seguridad y ergonomía para poder fabricarlas de modo que cumplan con objetivos tales como:

- Reducir la accidentología,
- Disminuir las enfermedades profesionales,
- Aumentar la productividad, por la mitigación de los factores de riesgo.

5. **REFERENCIAS**

[1] Ley Nacional Nº19587. Higiene y Seguridad en el Trabajo. Argentina, 1972.

[2] Decreto Nacional Nº351. Reglamentario de la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo. Argentina, 1979.

[3] Norma ISO Nº 12100. Seguridad en máquinas: Principios generales de diseño, Evaluación de riesgos y reducción de riesgos; Internacional, 2012.

[4] Directiva de Máquinas Nº 98/37. Aproximación de legislaciones de los Estados miembros sobre máquinas. Unión Europea, 1998.

[5] Real decreto Nº 1644. Normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas. España, 2008.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE REDUÇÃO DE UM VEÍCULO BAJA SAE

Andrade, Rosalia Sousa1, Batista, Rilberson Silva²
[1] Centro de Ciências Tecnólogicas, – Universidade Estadual Do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, s/n - Tiririca, São Luís - MA, 65055-000, Brasil
Email: rosalia.s.andrade@gmail.com
[2] Centro de Ciências Tecnólogicas, – Universidade Estadual Do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI, s/n - Tiririca, São Luís - MA, 65055-000, Brasil
Email: rilberson1@hotmail.com

RESUMO

Esse artigo tem como propósito principal a explicação do aprimoramento do veículo Baja SAE, participante da competição SAE Brasil, a partir da substituição da coroa, corrente e pinhão por engrenagens de dentes retos. Assim, tendo como principais parâmetros o peso e volume final da transmissão. Além das engrenagens de dentes retos, também será considerada a opção da caixa de redução composta por dentes helicoidais. Utilizando uma abordagem metodológica do tipo estudo de caso, foi realizada uma observação direta no sistema de redução coroa, corrente e pinhão, para o uso de engrenagens. Logo, com o auxílio de uma matriz de decisão pôde ser avaliado e estabelecido que a utilização do sistema de redução composto por engrenagens de dentes retos desenvolveu uma evolução relevante do veículo.

Palavras-chave: *Sistema de redução, Otimização, Engrenagens, Veículo Baja SAE..*

1. INTRODUÇÃO

Uma caixa de redução faz parte de um sistema do veículo de vital importância, já que este elemento é responsável pelo deslocamento do veículo e seu desempenho. No caso dos Bajas na competição SAE Brasil, o motor utilizado é padrão, Briggs&Stratton 10hp, e o torque produzido por este, mesmo com o uso de uma CVT (Continuos Variables Transmision), não é o suficiente para vencer os obstáculos encontrados nas provas de até 45º. Desta forma, se evidência a necessidade de uma redução ou mais para que o veículo possa ter um melhor desempenho.

Diante dessa circunstancia a equipe deve optar por um tipo de caixa de redução utilizada para compor seu veículo. A escolha pelo sistema de coroa, corrente e pinhão é bastante comum dentre as equipes iniciantes, devido a sua relação custo e benefício, e o seu fácil acesso perante o mercado, já que são adeptos de componentes de motocicletas. Porém, o volume e peso são inimigos para um bom desempenho, principalmente porque é necessário a utilização de mancais (ferro fundido) nestes sistemas, fazendo com que o veículo possua um peso elevado. Além de possuir um volume excessivo, ocupando espaços preciosos na região traseira do Baja, podendo ainda sofrer impactos diretos com as irregularidades do solo, e assim, causar problemas maiores para equipe.

O propósito é a aperfeiçoar esse sistema e com isso vem a necessidade de mudança na transmissão. A opção de melhoria será tradada com a utilização de redução por engrenagens no lugar de coroa, corrente e pinhão. Porém, antes de dimensionar, deve-se analisar qual tipo de engrenagens utilizarem.

1.1. Sistema

Inicialmente a análise é realizada a partir dos sistemas escolhidos, no caso: coroa, corrente e pinhão de engrenagens composta por dentes retos e engrenagens composta por dentes helicoidais.

1.1.1 Coroa, corrente e pinhão

O sistema de redução composto por coroa, corrente e pinhão é um conjunto adaptado por componentes de motocicleta. Diante disso, há uma disponibilização notável no mercado para a fabricação desse tipo de caixa de redução. Assim, a equipe poderá ter mais liberdade no dimensionamento dos componentes, já que os mesmos possuem para venda.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A utilização de correntes Reynolds para o acionamento da coroa e pinhão faz com que haja a perda de energia potencial, o que em qualquer tipo de transmissão é inevitável. Porém, é um fator a se considerar, pois, em alguns sistemas essa perda é maior e em outra menor. Essa transformação de energia pode ser gerada pelo atrito estre os componentes, pelo sistema lubrificante utilizado e até mesmo pelo escorregamento.

No quesito de fixação do eixo-árvore, há a necessidade do uso de mancais a este sistema, seja este de deslizamento ou elementos rolantes. A.G.M. Michell, um pioneiro na teoria de mancais e projeto, e um dos inventores do mancal de acolchoado inclinado, uma vez definiu o que se deseja de um rolamento da seguinte maneira: Para o projetista de uma máquina, todos os mancais são claramente apenas males necessários, não contribuindo em nada para o produto ou a função da máquina; e quaisquer virtudes que possam ter são apenas de valor negativo. O mérito deles consiste em absorver a menor potência possível, desgastando-se o mais devagar possível, ocupando o menor espaço possível e custando o menos possível [1]. Geralmente os mancais de deslizamento são de ferro fundido, fazendo com que, o peso deste seja bem elevado, na busca pela resistência e dureza necessária. Além disso, é indispensável um alinhamento preciso, pois caso contrário, o sistema trabalhará em um regime forçado e assim provocará danos.

A proteção para o conjunto coroa, corrente e pinhão também é indispensável, para a própria preservação da mesma. Uma caixa de proteção recomendável para mediar tanto nos choques mecânicos que possam existir, quanto na lubrificação que é de vital importância para a vida útil e desempenho dos componentes. Porém, o volume ocupado por essa proteção ocupara um volume relevante dependendo da distância da coroa e pinhão, e seus números de dentes.

1.1.2 Transmissão com engrenagens

A utilização de engrenagens teve início há bastante tempo, desde os tempos bíblicos. Porém, apenas elas só foram obter uma forma mais aprimorada com a revolução industrial. As engrenagens de dentes retos cilíndricas são as mais simples, apresentando dentes paralelos ao eixo [2]. Porém, para este estudo de caso analisado, a transmissão possuirá o engrenamento de tipo externo com os eixos trabalhando em paralelo. Já, na caraterística geométrica, apesar destas serem classificadas como a engrenagem maior: coroa; e a engrenagem menor: pinhão; há grandes diferenças no sistema mencionado anteriormente, sendo que, as engrenagens possuem grande terminologia especializada, nas quais, é necessário o projetista responsável pelo dimensionamento da caixa saber. Ainda, é importante também ressaltar a relevância de possuir conhecimento sobre a AGMA (American Gear Manufacturers Association) para a metodologia do projeto, pois esta possui padrões para projeto, manufatura e montagem.

ISBN: 978-987-1676-63-7

1.1.3 Dentes retos

Uma engrenagem cilíndrica de dentes retos é um modelo utilizado para realizar a transmissão de um movimento realizado em círculos de maneira contínua, toda essa movimentação acontece entre linhas paralelas simplificadas [3].

As engrenagens selecionadas foram de material aço SAE 4340, devido a sua propriedade. Esse material reage de forma adequada às tensões dinâmicas, possui uma relação de harmonia entre a resistência mecânica e resistência à fratura, é altamente resistente à fadiga, homogêneo ao longo da seção em relação à dureza e possui uma boa relação peso e ao volume ocupado. Assim, o processo de fabricação foi realizado por usinagem, devido a melhor precisão e acabamento para a confecção das engrenagens. Logo, o rendimento de transmissão por engrenagens usinadas são mais elevados (Tabela 1).

Tabela 1. Relação de tipo de transmissão e rendimento

Tipos de Transmissão	Rendimento
Transmissão por Correias	
Correias Planas	$0,96 \leq \eta_c \leq 0,97$
Correias em V	$0,97 \leq \eta_c \leq 0,98$
Transmissão por Correntes	
Correntes Silenciosas	$0,97 \leq \eta_{cr} \leq 0,99$
Correntes Renold	$0,95 \leq \eta_{cr} \leq 0,97$
Transmissão por Rodas	
De atrito	$0,95 \leq \eta_{ra} \leq 0,98$
Transmissão por Engrenagens	
Fundidas	$0,92 \leq \eta_e \leq 0,93$
Usinadas	$0,96 \leq \eta_e \leq 0,98$

A caixa de proteção de material 6061 T6 com elevada dureza, resistente a corrosão, excelente polimento e brilho, comporta os componentes da transmissão e retém o lubrificante das engrenagens. Estas, que foram projetadas para serem lubrificadas a óleo com desempenho API GL-5. Desta forma, a escolha de viscosidade é 85W/140 evitando assim o desgaste e corrosão.

O projeto do sistema de redução por engrenagens consiste por dois pinhões de 20 dentes e uma coroa com 60 e outra com 64 dentes. Possuindo uma relação de transmissão 9,6, o veículo conta

com um torque máximo de 427,46 N.m, força máxima de 5281,14 N e uma velocidade final de 55 km/h.

1.1.3 Dentes helicoidais

As engrenagens de dentes helicoidais possuem diferenças importantes em relação aos de dentes retos apesar de serem similares. Inicialmente é importante ressaltar que o grau de complexidade se torna maior com seu uso em um projeto. Porém, estas também existem vantagens que foram analisadas e consideradas. De forma objetiva a diferença visual e/ou física entre as duas engrenagens é a inclinação dos dentes desta em relação ao seu eixo de rotação, que forma ângulos de hélice que podem chegar 10 a 45º.

Dentre os pontos positivos para a escolha de um sistema composto por engrenagens de dentes helicoidais, o principal seria a quantidade de ruído reduzido produzido por essas engrenagens, já que seus dentes possuem formato com ângulos de hélice, além disso, com esse sistema pode-se utilizar eixo tanto paralelo quanto cruzado. Porém, a sua facilidade de usinar e eficiência são reduzidas quando comparados aos dentes retos, que não sofrem com esforços axiais, nos quais podem acabar gerando desgastes extras nos rolamentos.

Ainda sim, existe outro ponto crucial e determinante para a escolha de algo em um projeto, o custo. Se comparado os dois tipos de engrenagens, as de dentes retos possui o menor valor do mercado. Logo, sendo mais barato que as engrenagens de dentes helicoidais.

2. SELEÇÃO

A partir da análise baseada em conhecimentos literários e práticos, em cima de um estudo de caso, a comissão responsável tem que realizar a decisão sobre qual tipo de sistema de redução utilizar para seu veículo. Porém, esta decisão tem que trazer progresso e vantagens em pontos que são mais importantes para o veículo e a equipe, como, peso, volume ocupado, custo, manutenção e fabricação. Para isto, foi realizado um modo de auxílio para o método de escolha, denominado matriz de decisão.

2.1. Sistema

Essa matriz é composta por peso, distribuído segundo a importância do quesito para a equipe, e as notas, que são medidas segundo o valor perante o cenário. Ainda, como se pode ver na Tabela 2, existe a ponderação, que é o a multiplicação do peso com a nota.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 2. Matriz de decisão.

Matriz de Decisão							
Índice de Mérito	**PESO**	***Engrenagem Dentes Retos***		***Engrenagem Dentes Helicoidais***		***Pinhão, Corrente e Coroa***	
		NOTA	Ponderação	NOTA	Ponderação	NOTA	Ponderação
Custo	2	2	4	1	2	3	6
Peso	3	3	9	3	9	1	3
Manutenção	1	3	3	3	3	1	1
Fabricação	1	2	2	1	1	3	3
Volume ocupado	3	3	9	3	9	1	3
Total	1	13		11		9	

De acordo com a matriz de tomada de decisão foi observado que a engrenagem de dentes retos obteve uma nota final superior às demais. Assim, escolheu-se projetar uma caixa de redução composta por engrenagens de dentes retos. Porém, é importante evidenciar que o ruído não foi considerado, já que este não era um fator determinante e posteriormente ira notar-se que mesmo com os dentes retos não houve um desconforto notável em relação a este ponto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da escolha da caixa de redução composta por engrenagens de dentes retos foi realizado um dimensionamento e simulações, posteriormente a caixa foi confeccionada, e assim, pode-se observar resultados importantes no quesito peso e volume (Tabela 3).

Tabela 3. Características de massa e volume da transmissão

Transmissão					
Massa			Estimado (%)	Melhoramento (%)	Quanto a cima do esperado (%)
Coroa, corrente e pinhão	12,7	Kg	30	40,16	10,16

ISBN: 978-987-1676-63-7

Engrenagens Dentes Retos	7,6	Kg			
Volume			Estimado (%)	Melhoramento (%)	Quanto a cima do esperado (%)
Coroa, corrente e pinhão	8062810	mm³	30	79	49

Analisando que a grande vantagem na substituição do sistema foi na massa e no volume. A caixa de redução obteve uma redução de peso de 5,1kg e de volume 6370457,11mm³. A substituição do sistema coroa, corrente e pinhão pelo uso de engrenagens de dentes retos, não só proporcionou ao veículo leveza e uma diminuição de volume ocupado excessivo, como também proporcionou, torque, estética, eficiência e, ainda assim, um baixo ruído.

Comparando percentualmente o valor esperado com o efetivo, percebemos que as expectativas da equipe foram superadas principalmente no volume, tendo melhoras de quase 50% para o peso e 80% para o volume. Estes são ganhos altamente importantes quando se busca melhoramento na performance e dinâmica veicular. Além disso, aumenta-se uma economia de espaço considerável com valores significativos que proporcionou maior liberdade para o desenvolvimento e manutenção da parte traseira, juntamente com os componentes do protótipo.

4. CONCLUSÃO

A transmissão obsoleta, porém, eficiente pelo “custo e benefício”, coroa, corrente e pinhão, substituída pelas engrenagens de dentes retos, é um investimento com um custo mais elevado. Entretanto, o engrenamento na caixa de redução traz resultados vantajosos e de vital importância para a evolução do veículo Baja SAE.

5. REFERENCIAS

[1] Norton, Robert L. *Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada*. 4. Ed, Porto Alegre: Bookman, 2013.

[2] Junior, Auteliano Antunes dos Santos. *Engrenagens cilíndricas de dentes retos*. UNICAMP, Campinas, Fevereiro de 2003.

[3] Melconian, Sarkis. *Elementos de Máquinas*. 9 Ed. São Paulo: Editora Érica, 2015.

[4] Collins, Jackie. *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: uma perspectiva de prevenção de falhas*. 1. Ed, Rio de Janeiro: LTC, 2012.

[5] Engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais. <http://www.fem.unicamp.br/~lafer/es690/arquivos/Engrenagens_Helicoidais.pdf> Acesso em: 28 de Abril de 2016.

Agradecimentos

Os autores agradecem, imensamente, a Equipe Bumba Meu Baja, por permitir o estudo do seu veículo em busca do aprimoramento do mesmo, além da instituição de ensino (UEMA) por possibilitar a existência desse projeto pedagógico. Agradecem ainda aos professores e pessoas que colaboram direta ou indiretamente na construção desse trabalho.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISENO Y FABRICACION DE UNA TURBINA EOLICA DE EJE VERTICAL IMPULSADA POR DRAG

Esteban Tacca[1], Lucas Spies[1], y Alejandro Albanesi [1,2]

[1]Laboratorio de Flujometría (FLOW) - Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Lavaise 610, (3000) Santa Fe, Argentina
correo: flow@frsf.utn.edu.ar

[2]Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) – UNL/CONICET
Predio "Dr. Alberto Cassano", Ruta 168, Paraje El Pozo, 3000) Santa Fe, Argentina
correo: aalbanesi@cimec.santafe-coniet.gov.ar

RESUMEN

En este trabajo se presentara el proceso de diseño y fabricación de una turbina eólica de eje vertical impulsada por drag, diseñada para operar en la zona urbana de la ciudad de Santa Fe, Argentina (latitud 31 ◦ 38'S, longitud 60 ◦ 42'W, altitud 25 m.a.s.l.). Esta turbina experimental carga un banco de baterías mediante un generador de electricidad, y esta carga se utiliza para poner en funcionamiento luminarias de luces tipo led.

Es conocida la capacidad de las turbinas de eje vertical para aprovechar vientos que inciden desde cualquier dirección, y son las ideales para operar en zonas urbanas y con edificación existente.

Se presentarán los estudios aerodinámicos realizados mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), y los estudios estructurales realizados mediante el método de los elementos finitos (FEM). Además, se explicará el proceso de fabricación de la turbina con materiales compuestos, quedando para una etapa posterior el ensayo para validar el funcionamiento, mejorar la puesta en marcha y parada ante vientos excesivos, y para optimizar el sistema de control de carga de la batería.

Palabras Claves: *Turbina de eje vertical, Energía eólica, Energía renovable, FEM, CFD.*

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de desarrollo tecnológico que surge en el ámbito académico. Tiene como objetivo el desarrollo, diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de baja potencia, a instalar en el techo de la torre administrativa de la UTN- Facultad Regional Santa Fe.

Es de público conocimiento que en los últimos años el uso de energías renovables se encuentra en un pico de demanda, debido entre otras cosas, a la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles, para disminuir la emisión de gases contaminantes a la atmosfera y cuidar el planeta para futuras generaciones. En esta situación se recurre a la energía eólica, que utiliza la energía cinética disponible en las masas de aire en movimiento para generar energía eléctrica [1].

2. DISEÑO GEOMÉTRICO DEL AEROGENERADOR

2.1 Consideraciones previas

Dentro de la generación de energía eólica, podemos encontrar dos grandes grupos de turbinas empleadas: Las de eje horizontal, y las de eje vertical. Las primeras son ampliamente usadas, debido a su alto rendimiento aerodinámico y posibilidad de lograr grandes potencias, pero requieren constancia en la dirección del viento. En cambio las de eje vertical, son independientes de la dirección del viento, pero su rendimiento aerodinámico es bajo en comparación con las primeras [2].

A su vez, entre las turbinas de eje vertical, existe también una clasificación interna, debido a las fuerzas aerodinámicas utilizadas por la misma para producir energía. Unas son las del tipo arrastre (drag), y otras del tipo sustentación (lift).

Las turbinas del tipo arrastre, son conocidas como del tipo Savonius, trabajan a velocidades de viento bajas, poseen alto torque de arranque y bajo rendimiento aerodinámico en comparación a las de sustentación.

Por las características de la ciudad de Santa Fe, donde los vientos promedios son bajos y cambian de dirección constantemente (debido a los edificios urbanos), se elige diseñar una turbina del tipo Savonius.

2.2 Principio de funcionamiento

Estos aerogeneradores poseen el eje en posición vertical y presentan una geometría tal que existe una diferencia entre las fuerzas de arrastre [3] que aparecen en el perfil a un lado del eje, con

ISBN: 978-987-1676-63-7

respecto al perfil del lado opuesto. Dichas fuerzas están ubicadas a una distancia del eje, por lo que se obtiene un torque resultante (Figura 1).

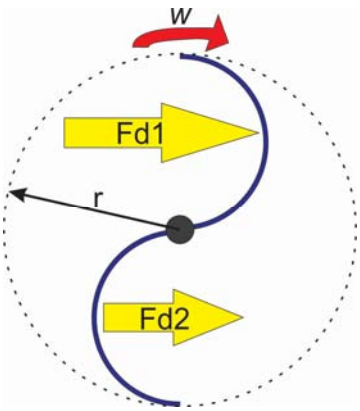


Figura 1. Fuerzas de arrastre en turbina tipo Savonius.

La diferencia de las fuerzas es debido a la geometría de los perfiles, y como estos presentan mayor o menor cambio en la cantidad del movimiento del fluido que atraviesan.

En cuanto al diseño aerodinámico óptimo o deseado, en este caso debe ser una geometría que aumente la fuerza de arrastre del perfil de cara al viento, y que de manera opuesta, genere la menor resistencia al mismo. De esta forma la diferencia de fuerzas a los lados del eje es mayor, y aumenta el torque generado.

El cociente entre la velocidad tangencial de la turbina y la velocidad de incidencia del viento se denomina “relación de velocidad” o TSR y es una característica de funcionamiento de la turbina.

El cociente entre potencia de la turbina y potencia disponible del viento se denomina coeficiente de potencia Cp y es una forma de medir el rendimiento aerodinámico de la geometría.

2.3 Optimización de parámetros

La geometría aerodinámica adecuada de los álabes para este tipo de turbinas, son aquellos que poseen un coeficiente de potencia aceptable, y a su vez contempla facilidad de construcción. Un tipo de geometría que cumple con estas características son alabes semicilíndricos con tapas planas en los extremos [4]. Para obtener la forma final de la turbina se realizaron simulaciones computacionales de turbinas con alabes semicilíndricos y distintas relaciones de tamaño y cantidad de alabes respecto al diámetro de la turbina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3.1 Geometrías simuladas

Se utilizaron geometrías de 2, 4 y 8 palas. Para cada cantidad de palas se modificó la relación entre diámetro de alabes y diámetro de la turbina, dando como resultado las geometrías que se observan en la figura 2.

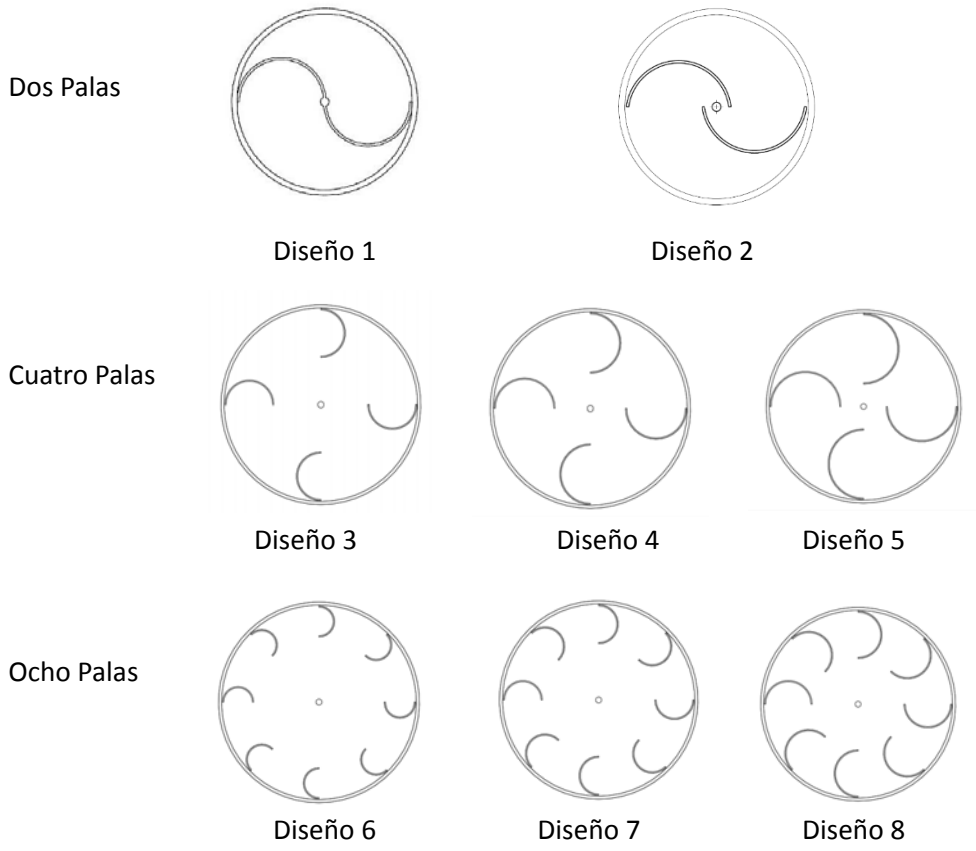


Figura 2. Geometrías simuladas.

2.3.2 Modelo computacional

Las simulaciones se realizaron con un software de cálculo de dinámica de fluidos computacional (conocido por sus siglas en inglés como CFD por *computational fluid dynamics*) [3] en donde se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes en el dominio dentro del cual se encuentra la turbina, la cual está sometida a una corriente de aire con una velocidad conocida, y se miden los valores de torque dinámico (con la turbina girando) a distintos ángulos de posición de la misma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El tamaño del dominio computacional, los tamaños de los volúmenes finitos con los que se discretizó el mismo y las condiciones de borde se presentan en las Figuras 3 y 4. Se utilizó una malla de aproximadamente 1,5 millones de volúmenes finitos. Las simulaciones se realizaron teniendo como criterio de convergencia un error RMS (promediado) por debajo de 1x10-5, o al alcanzar 300 iteraciones. Cada simulación requiere un tiempo de cálculo de 2 hs aproximadamente.

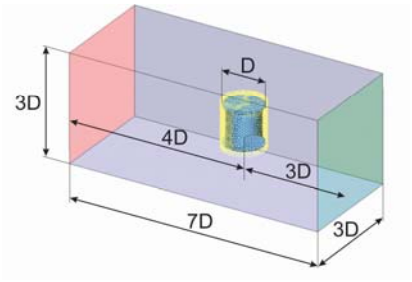


Figura 3. Dimensiones del dominio simulado.

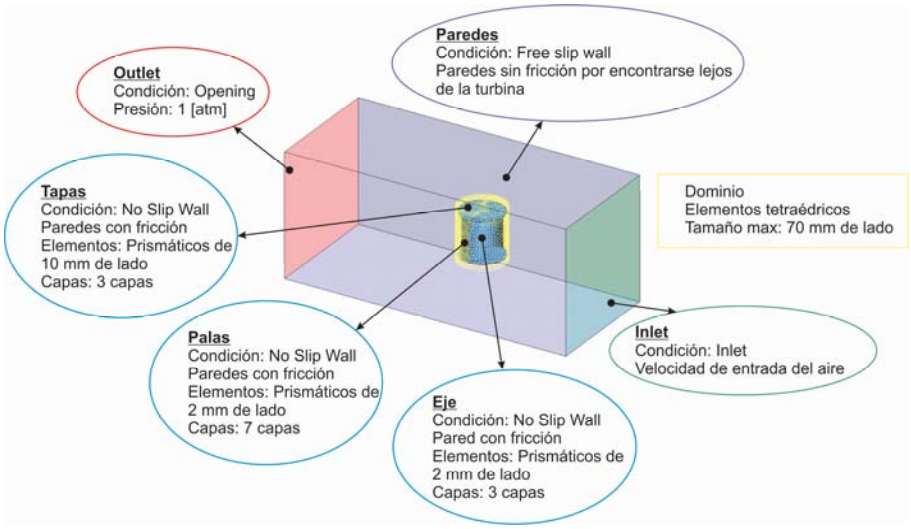


Figura 4. Condiciones de borde y tamaños de elementos empleados.

2.3.2 Resultados de las simulaciones

Para cada geometría, se realizaron simulaciones a distintas velocidades de giro, ya que cada una de ellas tiene el mayor coeficiente de potencia (Cp) a una relación de velocidad (TSR) distinta. Los mejores resultados de Cp para cada geometría se encuentran en la tabla 1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Mejor resultado de Cp para cada geometría simulada

Geometría	Descripción	Cp Optimo	Lambda Optimo
2 palas	Diseño 1	0,082	0,6
2 palas	Diseño 2	0,144	0,6
4 palas	Diseño 3	0,188	0,5
4 palas	Diseño 4	0,18	0,5
4 palas	Diseño 5	0,1	0,4
8 palas	Diseño 6	0,208	0,4
8 palas	Diseño 7	0,215	0,4
8 palas	Diseño 8	0,162	0,4

En la figura 5 se muestra la variación del torque para modelos de 2, 4 y 8 palas, seleccionando dentro de cada una, la de mejor rendimiento. La velocidad de viento incidente utilizada en las simulaciones es de 5 m/s y las dimensiones de las turbinas son 1,6 m de diámetro por 2 m de alto.

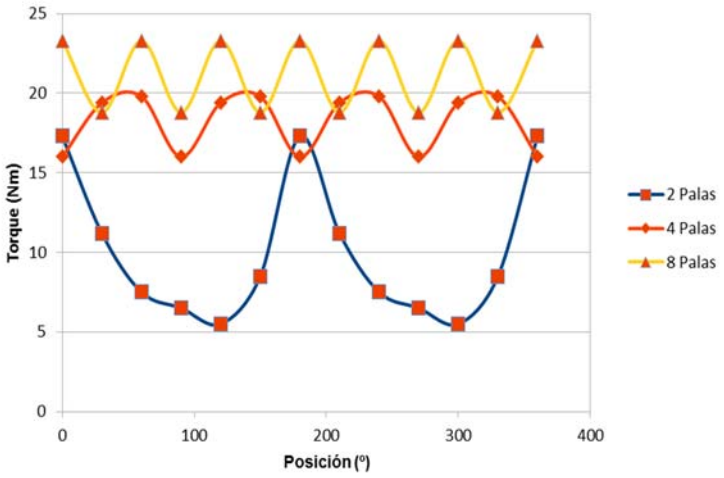


Figura 5. Condiciones de borde y tamaños de elementos empleados.

Se concluye que a mayor cantidad de palas aumenta el rendimiento aerodinámico, el torque en la turbina tiene mayor frecuencia pero menor amplitud, y la relación de velocidades optima disminuye. En base a este estudio se optó por realizar la geometría de ocho palas.

2.4 Elección de escala

Para seleccionar el tamaño final del prototipo, se tuvieron en cuenta varios factores, dentro de los cuales podemos mencionar el lugar de emplazamiento, el proceso de montaje, método de fabricación y potencia generada.

ISBN: 978-987-1676-63-7

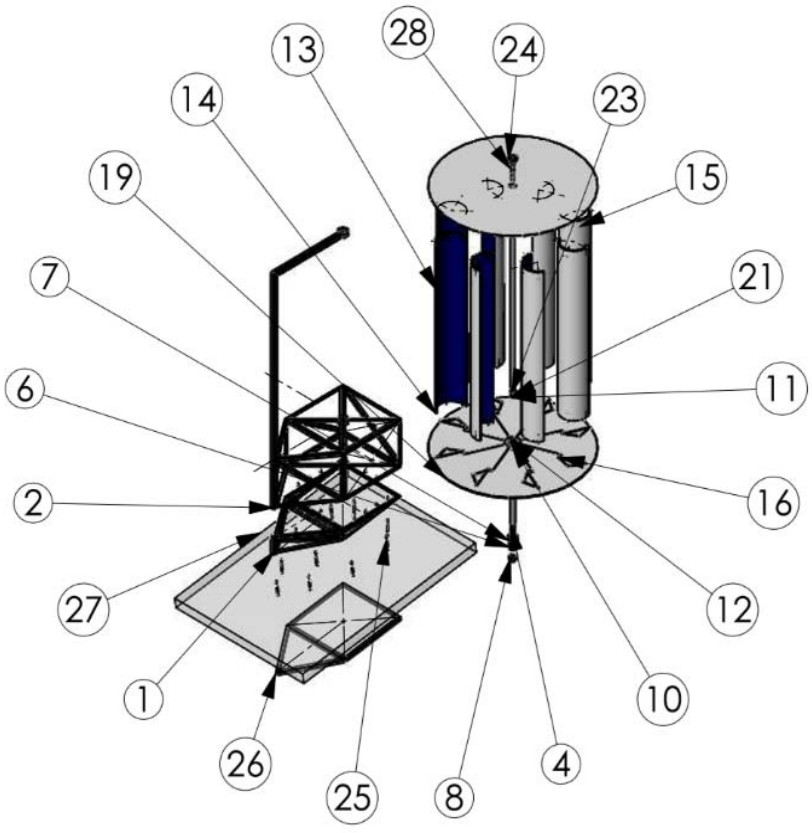
Al ser el lugar de emplazamiento la torre administrativa de la facultad, se tuvo en cuenta que todas las partes componentes y piezas de la turbina puedan ser transportadas al lugar, y quepan por las puertas de acceso a la terraza. De esta forma el diámetro de las tapas de la turbina no debe ser mayor que la diagonal de las puertas.

Las dimensiones finales son de 2 metros de diámetro y 2,5 metros de altura, siendo la última medida consecuencia de mantener la relación de aspecto con la geometría utilizada en los estudios.

3. DISEÑO MECÁNICO DEL AEROGENERADOR

3.1 Partes y componentes

En la figura 6 se muestra un esquema con los componentes estructurales de la máquina, los cuales se encuentran distribuidos en tres grupos principales:



Item N°	Nombre de la pieza	Cant.
1	Estructura cuña	1
2	Caja metálica	1
3	B18.2.3.2M - Bulon M12 x 1.75 x 30	14
4	Eje inferior	1
5	Brida inferior	1
6	Rodamiento cónico SKF - T2EE 060	1
7	Rodamiento cónico SKF - T7FC 065	1
8	B18.2.4.6M -Tuerca pesada, M56 x 5.5	1
9	B18.2.4.1M - Tuerca M12 x 1.75	14
10	Masa inferior_parte 1	1
11	Masa inferior_parte 2	2
12	Varilla refuerzo 8 mm	8
13	Álabe cubierta	8
14	Álabe Foam	8
15	Esparrago M10 x 130	48
16	Placa apoyo álabes	8
17	Masa superior_parte1	1
18	Varilla refuerzo 6 mm	8
19	Tapa fibra inferior	4
20	B18.2.4.1M - Tuerca M10 x 1.5	3
21	Camisa	1
22	Camisa	1
23	Eje superior	1
24	Rodamiento a bolas SKF - 6409	1
25	Varilla roscada M20X220	10
26	Contracuña	1
27	Losa	1
28	Extension eje superior	1

Figura 6. Componentes de la turbina.

1. La turbina propiamente dicha, fabricada en fibra de vidrio con refuerzos de acero en las tapas.

2. La estructura soporte, compuesta por perfiles ángulo, y un travesaño herradura de caño cuadrado estructural.

3. Cuña vinculo de la estructura que soporta la turbina con la losa del techo de la torre de emplazamiento, también compuesta de perfiles ángulos.

3.2 Verificación de las partes componentes.

Utilizando el reglamento CIRSOC 102/2005 [5], se obtiene la velocidad de viento a la cual se debe verificar la turbina y su estructura completa. Para la condición planteada (lugar geográfico, altura y condiciones del entorno) dicha velocidad es de 183 km/h. Esto da como resultado, una carga transversal equivalente de 1000 kg.

3.2.1 Modelo para simulación por elementos finitos

Para realizar la verificación, se utilizó el complemento *Simulation* de Solidworks. El modelo se obtuvo unificando todo el diseño de caja, eje, masas, rayos y planchas de apoyo para los alabes, en un solo modelo sólido. Junto con dicho sólido, se utilizaron las tapas superior e inferior, y los alabes, representados en la simulación como elementos de placa. Los componentes mencionados se pueden observar en la figura 7.

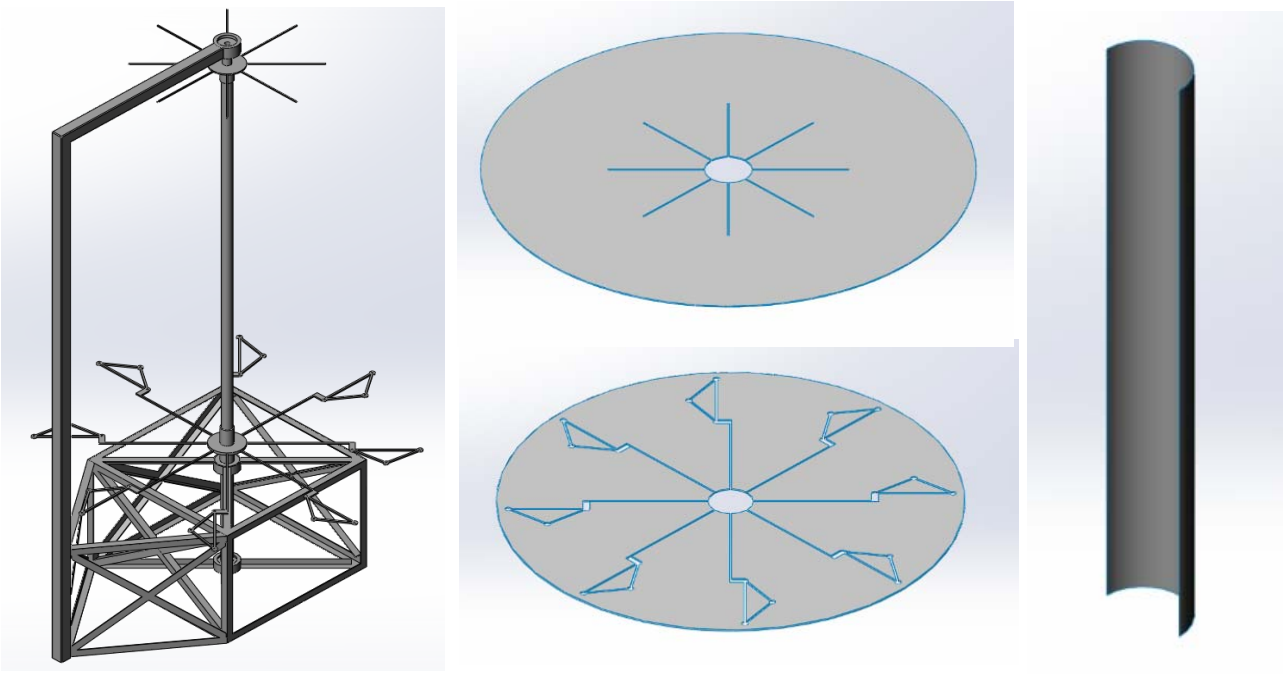


Figura 7. Piezas utilizadas para el modelo en Solidworks

ISBN: 978-987-1676-63-7

La simulación se realizó en estudios no lineales, debido a que la estructura sometida a la carga determinada sufre grandes deformaciones, y en el estudio lineal, los resultados pueden ser exagerados, por no tener en cuenta la variación de la rigidez debida a cambios de forma, o de tensiones cercanas a los límites de fallo de cada material sometido a deformaciones importantes.

El modelo de elementos finitos logrados es mixto (cuenta con elementos de placa en las tapas y alabes, y elementos sólidos tetraédricos en la estructura que representa los ejes y caja soporte de la turbina).La malla es conformada por 932.676 elementos, y tiene 1.928.300 nodos, donde el tamaño global del elemento es de 12 mm, utilizándose en la tapa inferior elementos de 10 mm de tamaño, para evitar errores numéricos que deriven en concentración de tensiones.

Se cargan los alabes frontales en la condición más desfavorable, empotrando la base de la estructura, vinculada por uniones abulonadas y soldadas a la cuña, que al mismo tiempo será fijada a la losa por varillas roscadas y tuercas pesadas. Se puede observar el modelo en la figura 8

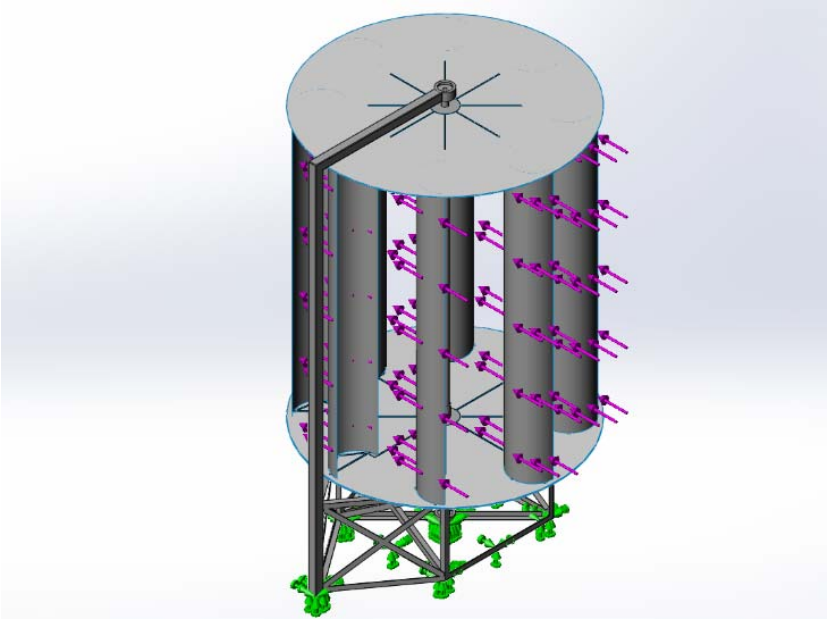


Figura 8. Modelo de Solidworks Simulation con condiciones de borde.

3.2.2 Resultados de simulaciones

Los resultados obtenidos en la simulación no lineal de Solidworks son los que se aprecian en las figuras 9 y 10, las cuales muestran las deformaciones (exagerada con respecto a la escala real en un factor de 10) y tensiones en la estructura respectivamente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

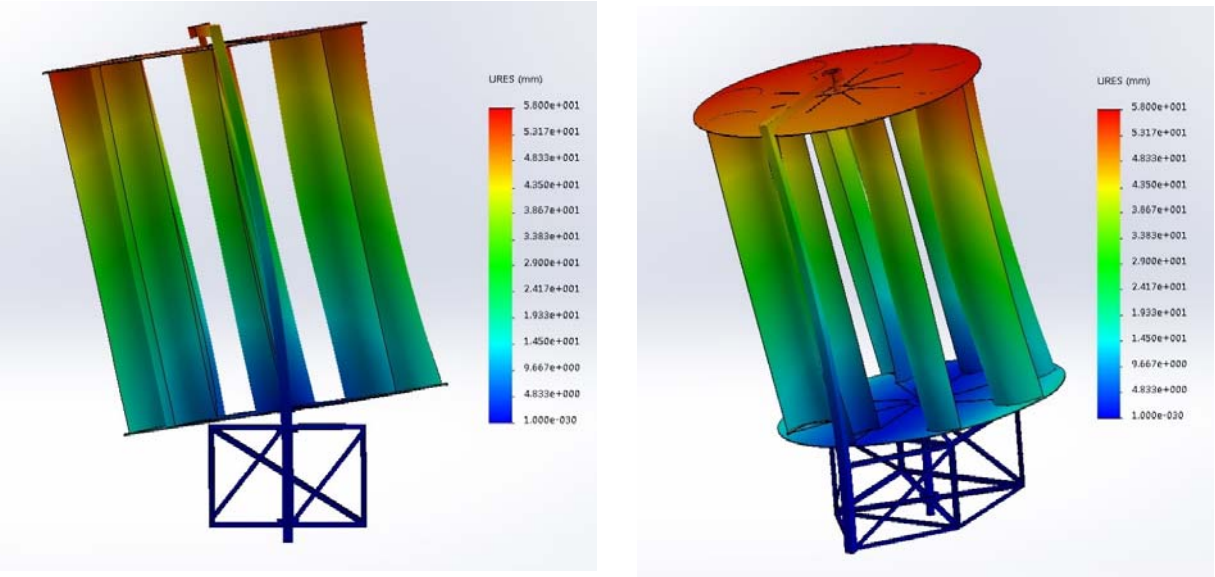


Figura 9. Resultado de desplazamientos obtenidos de la simulación (Factor: 10).

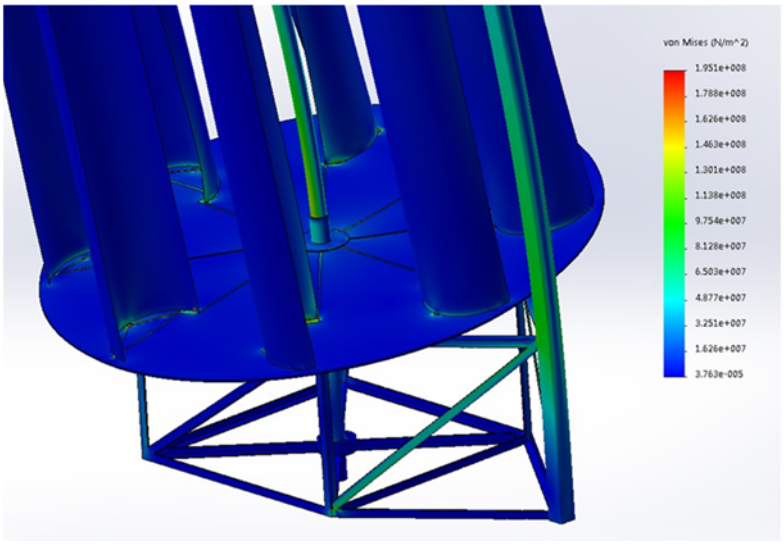


Figura 10. Resultado de tensiones obtenidas de la simulación.

4. FABRICACIÓN

Actualmente se encuentra en etapa de fabricación, la parte más avanzada es la turbina. En la Figura 11 se aprecia el tamaño de los alabes a la izquierda, y a la derecha el proceso de fabricación de la tapa y el lugar de emplazamiento.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 11. Proceso de fabricación y lugar de emplazamiento.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un diseño propio de aerogenerador para la ciudad de Santa Fe, lo cual represento en todas las etapas del proyecto (investigación, desarrollo, diseño y fabricación.) un desafío de ingeniería multidisciplinario, abarcando tanto el ámbito académico, como el privado. Como trabajo futuro se verificara el funcionamiento de la turbina, para comparar con los obtenidos en simulaciones.

6. REFERENCIAS

[1] Boyle G. *Renewable Energy; Power for a sustainable future*. Oxford. 2006

[2] Hau E. *Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer. 2005

[3] Fox R., McDonald A. *Introduction to Fluid Mechanics 4* ed.,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1992.

[4] Tacca E., Spies L. *Estudio aerodinámico de turbinas eólicas Savonius mediante simulación computacional.* JIT 2015, Venado Tuerto, 2015

[5] CIRSOC 102. Acción del viento sobre las construcciones. INTI. 2005.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con financiación de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF), del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la fundación Banco Santa Fe, a través del programa Becas para Proyectos de Innovación Tecnológica.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN DOSIFICADOR DE SEMILLAS DE PRECISIÓN

Gastón Bourges [1], Sebastián Rossi [2], Jorge J. Eliach [3], Mabel A. Medina[4]

[1,2,3] Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Ocampo y Esmeralda. 2000 Rosario, Argentina
[1] gbourges@inti.gob.ar.
[2] srossi@inti.gob.ar.
[3] jeliach@inti.gob.ar.
[4]Esc.Formación Básica. FCEIA-UNR. CIUNR, Pellegrini 250. 2000 Rosario, Argentina.
mmedina@fceia.unr.edu.ar.

RESUMEN

El presente trabajo se describen los ensayos realizados sobre un dosificador de semillas neumático por vacío, para siembra de precisión. Los ensayos se basan en la norma ISO 7256-1 [1]. Los ensayos se llevan a cabo en las instalaciones de INTI – Centro Regional Rosario, en un banco específicamente diseñado para emular el comportamiento de un dosificador. Las pruebas se realizan utilizando semillas de soja y girasol. Se evalúan los siguientes factores en la distribución espacial en línea de semillas:

- Nivel de semillas en tolva de alimentación del dosificador.
- Velocidad de avance de la sembradora: Dado que el banco de ensayos es estacionario, se emula la velocidad de avance de la sembradora con la velocidad de rotación del plato dosificador, modificándose esta última en función de cada velocidad de avance analizada.

La detección de semillas se realiza por medio de un sistema de censado de impacto. Cada vez que una semilla impacta sobre una placa de censado, se registra el instante temporal. Luego, la diferencia entre tiempos de aparición de cada semilla, afectada por la velocidad de avance de la máquina sembradora, define la distancia lineal entre ellas.

Palabras Claves: *Dosificador, siembra de precisión, ISO 7256, detección de semillas.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado actual del conocimiento

La forma en que se dosifican los granos en la tierra puede ser mediante sistemas de siembra de precisión y de siembra a chorrillos. El primero de ellos es utilizado principalmente en cultivos en los cuales se requiere una separación mínima entre plantas, como por ejemplo los cultivos de maíz, sorgo, girasol, entre otros, y se caracterizan por un manejo de las semillas una por cada vez (dosificadores monograno). En el segundo sistema, la siembra a chorrillos en línea, se aplica a cultivos en los cuales la distancia entre plantas no es un factor decisivo, y una menor distancia entre las mismas se compensa con un menor tamaño de las mismas. Como ejemplo de cultivos que utilizan el sistema de siembra a chorrillos se pueden nombrar el trigo, el arroz, el centeno entre otros [2].

Las llamadas sembradoras de precisión, o plantadoras, permiten la ubicación con relativa exactitud de semillas equidistantes en el surco. En [3] se mencionan cuatro funciones básicas de las sembrados de precisión: apertura de surco de profundidad controlada, dosificación de semillas en intervalos uniformes en el surco, tapado del surco y afirmar el suelo sobre las semillas. Uno de los métodos más comunes de dosificación de precisión de semillas, es con el uso de platos circulares. Estos últimos contienen orificios, ubicados a una distancia determinada del centro del plato y equis-espaciados entre sí, donde se colocan las semillas. El tamaño y forma de los orificios depende del tipo y característica de la semilla dosificada. En todos los casos, el objetivo de los dosificadores de placas es que cada orificio sea ocupado por una sola semilla y, a medida que el plato gira, las mismas son liberadas al surco desde un sector específico del mecanismo. Es importante que las semillas lleguen al surco manteniendo la misma secuencia que en el dosificador. Se pueden distinguir dos tipos de sistemas de dosificadores de semillas de precisión [4]: Dosificadores mecánicos y Dosificadores de precisión neumáticos. Estos últimos puede trabajar tanto con presión de aire positiva como negativa (por vacío). Los dosificadores asistidos por aire demandan menor precisión en sus componentes que los mecánicos, y tienen su fuerte en el uso de semillas de formas irregulares y no esféricas.

En los últimos años, muchos estudios se han realizado sobre el rendimiento de sembradoras de precisión. Estos estudios, en su mayoría experimentales, han revelado información acerca de las actuaciones de sembradoras, tanto en laboratorio y pruebas de campo. Según [5] el objetivo principal la siembra es ubicar las semillas a una determinada distancia y profundidad en la cama de siembra. Para ello, las sembradoras de precisión ubican las semillas en los lugares requeridos, otorgando a cada semilla una adecuada superficie disponible. [6] mencionan que las sembradoras

ISBN: 978-987-1676-63-7

de precisión por vacío cuentan con las siguientes ventajas: mejor calidad de trabajo, calibración de densidad de siembra más precisa con una menor tasa de daño de semillas, mayor simplicidad en el control, menor mantenimiento, menor dispersión de semillas y amplio espectro de aplicabilidad. Las prestaciones de estos equipos, en términos de calidad de distribución, son afectadas por diversos factores entre los cuales puede mencionarse: la velocidad de siembra, el tipo de dosificador, el mantenimiento y operación de la máquina, el régimen de giro de la placa de siembra, el nivel de vacío en sembradoras neumáticas, el tamaño y forma de los alvéolos, la agresividad del enrasador, la altura de descarga de la semilla respecto del fondo del surco, la geometría del tubo de bajada, los tratamientos sobre la superficie de la semilla, la uniformidad de la semilla y el tipo de abresurco [7]. En [8] evaluaron cinco configuraciones de plantadoras, para uniformidad espacial de semillas a tres velocidades de funcionamiento, utilizando un método de localización semilla en el campo y un método de laboratorio con sistema de sensor opto-electrónico. En su trabajo, sostienen que la variabilidad en la ubicación de la semilla puede estar dada por la falta de entrega, la entrega múltiple, la caída fuera del surco, el desplazamiento dentro del surco por rodado o el movimiento cuando son cubiertas con suelo.

En cuanto a métodos de ensayo y evaluación para sembradoras monograno, la norma ISO 7256/1 [1] describe los conceptos de entregas múltiples, cuando el espaciamiento entre semillas es inferior al cincuenta por ciento de la distancia teórica (o de referencia), y fallas o pérdidas, cuando la distancia entre semillas es superior al cincuenta por ciento de la distancia teórica, y aceptables cuando la distancia entre semillas se encuentra entre esos valores límites. En un cultivo, la densidad poblacional estará condicionada a la relación entre las entregas múltiples y las fallas que se registren. Una mayor proporción de una u otra determinará un incremento o una disminución de la densidad del cultivo respectivamente [7]. Entonces, la des-uniformidad en la línea de siembra estará condicionada por la dispersión respecto de la distancia de referencia, lo cual implica que una situación de acercamiento y/o de distanciamiento entre plantas la incrementará [9]. [7] concluye en su trabajo que, la variación de rendimiento por efecto de la calidad de distribución de plantas en la línea de siembra, es mejor explicada por la proporción de fallas y duplicaciones que por el desvío estándar de los distanciamientos en la línea de siembra. Por otro lado, [10] afirman que con la mejora en la uniformidad en el espaciamiento entre plantas, en un mismo surco, es de esperar una reducción en la competencia entre plantas, y el aumento del rendimiento a través de un uso más eficiente de la luz disponible, el agua y los nutrientes por las plantas.

Los autores de [11] desarrollaron un modelo matemático de un dosificador de semillas de precisión, por vacío, usando propiedades físicas de las semillas. El propósito de ese trabajo es encontrar la presión de vacío óptima. [12] investigó tanto numérica como experimentalmente el comportamiento de un dosificador de precisión por vacío para semillas de colza. En [13] se utiliza

ISBN: 978-987-1676-63-7

una cámara de alta velocidad de obturación para evaluar la uniformidad en el espaciamiento entre semillas, y su velocidad de caída. En ese trabajo, los autores afirman que uno de los criterios más importantes de evaluación de las prestaciones de una sembradora de precisión es la uniformidad lograda en los distanciamientos entre semillas de la misma línea.

En [14] se realizaran ensayos sobre un dosificador neumático de presión positiva, utilizando semillas de soja. En las pruebas se utilizan una cámara de alta velocidad para estudiar las trayectorias de las semillas a lo largo del tubo de descarga. Estos datos se comparan con modelos numéricos de trayectorias de semillas. En un trabajo posterior [15], los autores realizaron ensayos sobre un dosificador neumático por vacío, analizando las trayectorias a lo largo del tubo de descarga, utilizando filmación con cámara de alta velocidad.

1.2.- Objetivo del presente trabajo

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento a nivel de laboratorio de un dosificador de semillas para siembra de precisión comercial, sometiéndolo a los ensayos definidos en la norma ISO 7256-1 [1]. Para los ensayos se utilizan semillas de soja y girasol.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del experimento

Los ensayos se llevan a cabo en las instalaciones de INTI – Centro Regional Rosario, en un banco específicamente diseñado para emular el comportamiento de un dosificador en el cuerpo de siembra de una sembradora (Figura 1).

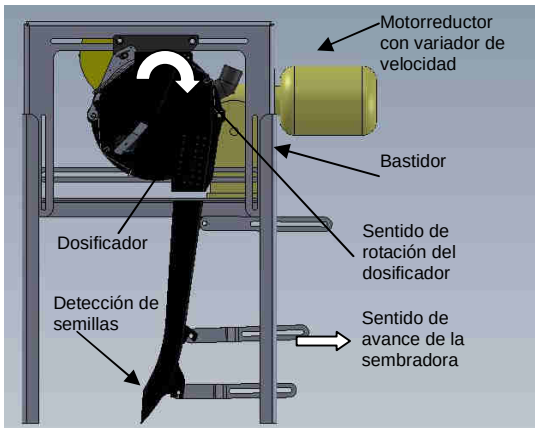


Figura 1: Banco de pruebas de dosificadores.

Se evalúa el comportamiento del dosificador en cuanto a la incidencia de los siguientes factores en la distribución espacial en línea de semillas:

- Nivel de semillas en tolva de alimentación del dosificador: La norma ISO 7256-1 establece que se debe verificar el comportamiento del equipo dosificador con diferentes niveles de carga de semillas en su tolva de alimentación. Para las semillas evaluadas, soja y girasol, se realizan pruebas con tres niveles de tolva (Tabla 1): 100 mm, 150 mm y 200 mm.
- Velocidad de avance de la sembradora: Dado que el banco de ensayos es estacionario, se emula la velocidad de avance de la sembradora con la velocidad de rotación del plato dosificador (en r.p.m.), modificándose esta última en función de cada velocidad de avance analizada (en km/h) como se muestra en Tabla 1.

Los ensayos se realizaron de acuerdo lo planteado en la norma ISO 7256-1 con la siguiente secuencia:

Tablas 1. Secuencia de ensayos de cada una de las semillas evaluadas.

Altura de tolva	Soja	Girasol
100 mm	35.7 r.p.m. *(10 km/h)*	12.5 r.p.m. *(6 km/h)*
150 mm	28.5 r.p.m. *(8 km/h)*	10.5 r.p.m. *(5 km/h)*
150 mm	35.7 r.p.m. *(10 km/h)*	12.5 r.p.m. *(6 km/h)*
150 mm	46.4 r.p.m. *(13 km/h)*	16.6 r.p.m. *(8 km/h)*
200 mm	35.7 R.P.M. *(10 km/h)*	12.5 R.P.M. *(6 km/h)*

Se realizaron 3 mediciones por cada uno de los experimentos planteados, promediando las mediciones de cada ensayo.

Para cada variedad de semillas se fija la distancia de referencia entre semillas y 3 velocidades de avance. Con el objetivo de emular las velocidades de avance de la sembradora sobre el banco de ensayo, para cada una de ellas se modifica la velocidad de rotación del plato del dosificador, con el fin de mantener constante la distancia de referencia. Estas distancias son de aproximadamente 33,33 cm para el girasol (equivalente a 3 semillas por metro) y 5,55 cm para soja (18 semillas por metro).

2.1.1 Descripción de banco de ensayos y método de detección de semillas

El banco de ensayos de dosificadores (Figura 1) consiste en una estructura de chapa plegada, que permite la sujeción del equipo dosificador. El banco cuenta con un motorreductor eléctrico que permite la rotación del plato de dosificación. La variación en la velocidad de rotación del plato dosificador se realiza por medio de un variador de frecuencia. La detección de semillas, y su

ISBN: 978-987-1676-63-7

correspondiente espaciamiento entre sí, se registra por medio de sistemas de placa de impacto. Las diferencias temporales entre cada detección de semilla es proporcional al espaciamiento longitudinal entre semillas que habría en el surco, según la siguiente relación:

$$D_{\text{semillas}} = V_{\text{avance}} \times \Delta t \quad (1)$$

Dónde:

D_{semillas} es la distancia entre semillas expresada en metros (m).

V_{avance} es la velocidad de avance de la sembradora, en m/s.

Δt es la diferencia temporal entre cada detección de semillas, en segundos.

De este modo, definiendo una velocidad de avance de la sembradora para cada ensayo, puede obtenerse la distancia entre semillas en el surco. Del mismo modo, el equivalente a la distancia total de ensayo se obtiene multiplicando la duración del ensayo por la velocidad de avance, es decir:

$$L_{\text{Toral Ensayo}} = V_{\text{avance}} \times T_{\text{ensayo}} \quad (2)$$

Las distancias entre semillas calculadas fueron procesadas de acuerdo a lo establecido en la Norma ISO 7256/1. En la misma, se establece una distancia de referencia (X_{ref}) definida por el fabricante del dosificador. Esta distancia de referencia, asociada a la velocidad de avance, da como resultado un tiempo de referencia (T_{ref}). Con los registro de tiempo obtenido mediante la placa de impacto se determinan las diferencias temporales entre impactos, que en adelante llamaremos delta de tiempo (ΔT). A través del cociente entre delta de tiempo y el tiempo de referencia se obtiene un valor adimensional $X_i = \frac{\Delta T_i}{T_{\text{ref}}}$ que la norma clasifica de la siguiente manera:

$0 \le x_i < 0.5 \Rightarrow$ Semillas dobles

$0.5 \le x_i < 1.5 \Rightarrow$ Semillas simples

$1.5 \le x_i < 2.5 \Rightarrow$ Semillas perdidas

$2.5 \le x_i < 3.5 \Rightarrow$ Semillas perdidas dobles

$3.5 \le x_i < \infty \Rightarrow$ Semillas perdidas triples

La sumatoria de eventos se realiza con el siguiente criterio:

$$n'_1 = \sum n_i \left(x_i \in \{0 \text{ a } 0.5\}\right) \quad (3.1)$$

$$n'_2 = \sum n_i \left(x_i \in \{> 0.5 \text{ a } \le 1.5\}\right) \quad (3.2)$$

$$n'_3 = \sum n_i \left(x_i \in \{> 1.5 \text{ a} \leq 2.5\}\right) \quad (3.3)$$

$$n'_4 = \sum n_i \left(x_i \in \{> 2.5 \text{ a} \leq 3.5\}\right) \quad (3.4)$$

$$n'_5 = \sum n_i \left(x_i \in \{> 3.5 \text{ a} \leq \infty\}\right) \quad (3.5)$$

Los índices se calculan de la siguiente manera:

$$N = n'_1 + n'_2 + n'_3 + n'_4 + n'_5 \quad (4)$$

N es el número de distanciamientos totales

$$N' = n'_2 + 2n'_3 + 3n'_4 + 4n'_5 \quad (5)$$

N' es el número de distanciamientos

$$D = \frac{n'_1}{N'} \times 100 \quad (6)$$

D es el índice de semillas dobles

$$M = \frac{n'_3 + 2n'_4 + 3n'_5}{N'} \times 100 \quad (7)$$

M es el índice de semillas perdidas

$$A = \frac{N - 2n'_1}{N'} \times 100 \quad (8)$$

A es el índice de calidad de alimentación

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i X_i^2}{n'_2} - \overline{X}^2} \qquad \text{para} \qquad X_i \in \{0.5 > a \leq 1.5\} \quad (9)$$

σ es la desviación estándar

$$\overline{X} = \frac{\sum n_i X_i}{n'_2} \qquad \text{para} \qquad X_i \in \{0.5 > a \leq 1.5\} \quad (10)$$

El espaciamiento promedio, y

$$C = \sigma \times 100 \quad (11)$$

C es el coeficiente de variación.

Los resultados y comparaciones se expresaran en función a estos 4 índices, [A], [C], [D] y [M].

3.- RESULTADOS

3.1 Variación de nivel de semillas en tolva

Para evaluar la incidencia del nivel de semillas en la tova de alimentación de semillas, se realizaron ensayos con dos niveles de tolva: un nivel mínimo de 100 mm, y un nivel máximo (200 mm).

3.1.1 Soja

Tablas 2. Resultados obtenidos con variación de nivel de tolva en soja.

	Nivel de tolva	
Parámetros	**100 mm**	**200 mm**
[A] Índice de calidad de alimentación	81,42%	81,30%
[D] Índice de semillas múltiples	12,40%	12,00%
[M] Índice de calidad de perdidas	6,18%	6,70%
[C] Coeficiente de variación	24,42%	24,36%

Los resultados de los ensayos realizados con dos niveles de semillas de soja en tolva no muestran cambios significativos en los resultados. Puede concluirse que el nivel de semillas en la tolva no incide en las variables analizadas.

3.1.2 Girasol

Tablas 3. Resultados obtenidos con variación de nivel de tolva en girasol.

	Nivel de tolva	
Parámetros	**100 mm**	**200 mm**
[A] Índice de calidad de alimentación	86,17%	81,30%
[D] Índice de semillas múltiples	9,92%	12,00%
[M] Índice de calidad de perdidas	3,91%	6,70%
[C] Coeficiente de variación	23,44%	24,36%

Al igual que el caso de la soja, los resultados de los ensayos realizados con dos niveles de semillas de girasol en tolva, no muestran cambios significativos en los resultados. Puede concluirse que el nivel de semillas en la tolva no incide en las variables analizadas.

3.2 Variación R.P.M.

Estas pruebas se realizan utilizando un nivel inicial de tolva fijo. Se adopta un nivel intermedio entre los utilizados en los ensayos anteriores, es decir, 150 mm.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.2.1 Soja

Tablas 4. Resultados obtenidos con variación de régimen (v/min) y nivel de tolva de 150mm en soja

Parámetros	28,5 R.P.M.	35,7 R.P.M.	46,4 R.P.M.
[A] Índice de calidad de alimentación	86,17%	81,30%	76,40%
[D] Índice de semillas múltiples	9,92%	12,00%	13,60%
[M] Índice de calidad de perdidas	3,91%	6,70%	10,00%
[C] Coeficiente de variación	23,44%	24,36%	24,94%

Como puede visualizarse en la Tabla 4, disminuye el índice de calidad de alimentación [A] con el aumento de la velocidad de dosificación. Por el contrario, los índices [D] y [M] y coeficiente de variación [C] aumentan con el aumento de las R.P.M de dosificación. Es decir, el aumento de la velocidad de dosificación deteriora los parámetros evaluados, siendo más notorio para la velocidad máxima (46,4 R.P.M) donde el índice [A] disminuye cerca de 10%, el índice [D] aumenta un 37%, y el índice [M] aumenta más del 150% respecto a las pruebas con velocidad mínima. El coeficiente de variación [C], si bien aumenta su valor con el aumento de velocidad, no refleja el deterioro que sufren el resto de los índices analizados.

3.2.2 Girasol

Tablas 5. Resultados obtenidos con variación de R.P.M. y nivel de tolva de 150mm en girasol.

Parámetros	10,4 R.P.M.	12,5 R.P.M.	16,6 R.P.M.
[A] Índice de calidad de alimentación	97,63%	97,27%	96,48%
[D] Índice de semillas múltiples	1,11%	1,28%	0,97%
[M] Índice de calidad de perdidas	1,25%	1,45%	2,54%
[C] Coeficiente de variación	9,29%	9,77%	10,97%

En la Tabla 5 no se observan cambios significativos en los parámetros analizados. Existe una pequeña mejoría en el índice de alimentación [A], y disminución de los parámetros [C], [D] y [M] cuando la velocidad de rotación es la menor (10.4 R.P.M), pero en ningún caso esa variación es superior al 1%. De este modo podemos inferir que en el caso del girasol, la variación de la velocidad de dosificación dentro del rango evaluado, no tiene incidencia significativa en la dosificación de semillas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4.- CONCLUSIONES

4.1 Altura de tolva

Los ensayos realizados fueron realizados con dos niveles de semillas en tolva: 200 mm y 100mm. Los dos tipos de semillas ensayadas con esos niveles no muestran cambios significativos en los resultados. Puede concluirse que el nivel de semillas en la tolva, para el modelo de dosificador ensayado y el tipo de ensayos realizados, no incide en las variables analizadas.

4.2 Variación velocidad de dosificación (R.P.M.)

El aumento de la velocidad de dosificación (R.P.M.) en los ensayos arroja las siguientes conclusiones:

- El mayor detrimento de los parámetros [A], [C], [D] y [M] se registra en la soja, comparando los resultados de los ensayos para la velocidad máxima de 46.4 R.P.M y mínima de 28.5 R.P.M., donde las variaciones más notorias son: una disminución de casi el 10% en el índice [A] y aumento superior al doble en el caso del índice [M]. En el caso de la soja, las R.P.M fueron casi el triple de las utilizadas en el girasol.
- Para el girasol no se observan cambios significativos en los parámetros analizados cuando se aumentan las R.P.M.

5. REFERENCIAS

[1] International Standard for Organization. ISO 7256/1. *Sowing equipment - Test methods - Part 1: Single seed drills (precicion drills)*. Suiza: International Standard for Organization. 1984

[2] Maroni, J. *Un concepto diferente en sembradoras: las AIR DRILL*. (F. d. Agrarias, Ed.) *Agromensajes, 4*(5). 2001.

[3] Srivastava, A. K., Goering, C. E., Rohrbach, R. P., & Buckmaster, D. P. *Engineering Principles of Agricultural Machines* (2 ed.). (P. McCann, Ed.) St. Joseph, Michigan, EEUU: American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2006.

[4] Billot, J. F., & Heege, H. Plant Production Engineereing. CIGR, A. Stout, & B. Cheze (Edits.), CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol. 3, págs. 217-240. St. Joseph, Michigan, EEUU: ASAE. 1999.

[5] Ôzmerzi, A., Karayel, D., & Topakci, M. *Effect of Sowing Depth on Precision Seeder Uniformity*. *Biosystems Engineering, 82*(2), 227–230. 2002.

[6] Soos, P., & Szule, Z. S. A comparative evaluation of modern sugar beet drills. *Bulletin of the University of Agricultural Science, Gödöllö*(1), 166-170. 1989.

[7] D´Amico, J. P. *Desuniformidad de distribución espacial: Caracterización de su impacto sobre el rendimiento de maíz (Zea mays L.).* Tesis de Magister Scientiae en Mecanización Agraria,

Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales , La Plata. 2012.

[8] Panning, J. W., Kocher, M. F., Smith, J. A., & Kachman, S. D. *Laboratory and field testing of seed sparcing uniformity for sugarbeet planters.* Transactions of the ASAE, 16(1), 7-13. 2000.

[9] Liu, W., Tollenaar, M., Stewart, G., & Deen, W. *Within-Row Plant Spacing Variability does not Affect Corn Yield.* (J. Guretzky, & E. Guertal, Edits.) Agronomy Journal, 96(1), 275-280. 2004.

[10] Shubeck, F. E., & Young, H. G. (1970). *Equidistant corn planting*. Crops Soils Magazine, 22(6), 12-14. 1970

[11] Karayel, D., Barut, Z. B., & Ôzmerzi, A. *Mathematical Modelling of Vacuum Pressure on a Precision Seeder*. Biosystems Engineering, 87(4), 437-444. 2004.

[12] Zhan, Z., Yaoming, L., & Lizhang, X. *Numerical analysis and laboratory testing of seed spacing uniformity performance for vacuum-cylinder precision seeder*. Biosystems Engineering, 106(4), 344-351. 2010.

[13] Karayel, D., Wiesehoff, M., Ôzmerzi, A., & Mûller, J. *Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seed using high-speed camera system.* Computers and electronics in agriculture, 50(2), 89-96. 2006.

[14] Bourges G., Nardón G., Medina M. 2011. *Evaluation of Seed Trajectories in a Pneumatic Dosage System.* XXXIV CIOSTA CIGR V Conference 2011. BOKU, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria. ISBN 978-3-200-02204-1.

[15] Bourges G., Nardón G., Medina M. 2012. *Laboratory study of the operation of a monograin vacuum metering system.* CIGR- AgEng. ISBN - 10 84-615-9928-4 / 13 978-84-615-9928-8. Valencia, España. 2012.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SISTEMAS DE FRENADO Y TÉCNICAS DE REGENERACIÓN DE ENERGÍA POR FRENO DINÁMICO

Leandro Rafael Vicini [1], **Jorge Petroni** [2], **Carmelo Nocera** [3] **y Leonardo Plaun** [4]

[1,2,3,4] Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional -FRBA
Av. Medrano 951, C1179AAQ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
correo-e: lplaun@frba.utn.edu.ar.

RESUMEN

En el presente trabajo, realizado en la Asignatura Electiva del cuarto nivel de la Carrera de Ingeniería Mecánica de nuestra facultad: “Introducción a las Tecnologías Ferroviarias”, se exponen las características principales de los sistemas de frenado utilizados en los materiales rodantes, del sistema de ferrocarriles, incluidos los mecanismos de accionamientos más comunes.

Una vez realizada la caracterización de dichos mecanismos, se pasa al análisis de la implementación de los sistemas de regeneración y recuperación de energía en los sistemas ferroviarios eléctricos, por acción del frenado dinámico.

Las más frecuentes aplicaciones se encuentran precisamente destinadas a ferrocarriles accionados por medio de sistemas eléctricos de corriente continua, dada su amplia difusión en zonas metropolitanas. Las mismas corresponden tanto a trenes como subterráneos, así como a servicios interurbanos.

Se define el concepto de “receptividad” de los sistemas por ser de gran importancia en la aplicación de la regeneración y recuperación.

Como parte de las opciones en este trabajo, se presentan y desarrollan dos posibilidades, a saber: la de devolver energía a la red (subestaciones reversibles) por un lado y almacenar la energía recuperada, por otro.

Finalmente se agregan los resultados de la simulación de dichas implementaciones en un sistema ferroviario metropolitano para luego finalizar con las conclusiones del caso.

Palabras Claves: *Frenos, energía, receptividad, regeneración, recuperación.*

1. INTRODUCCIÓN

Previamente al análisis del sistema de frenado recuperativo y su aplicación a ferrocarriles, presentaremos una clasificación de los sistemas utilizados en vehículos ferroviarios. Los accionamientos, pueden ser neumáticos, hidráulicos, electro- neumáticos o electromagnéticos.

I. Frenos por zapatas radiales.

II. Frenos a discos y calipers.

III. Freno Motor reostático.

IV. Freno Motor regenerativo.

V. Frenos Hidráulicos.

VI. Frenos por Corriente de Foucault.

VII. Frenos aerodinámicos.

En el presente trabajo al hacer referencia a sistemas de frenado, lo haremos considerando que las partes mecánicas propiamente dichas posibilitan la reducción progresiva de la velocidad de los trenes.

Un sistema de frenado debe garantizar las siguientes condiciones:

1.1 Lograr la detención del vehículo ferroviario frente a las estaciones, delante de las señales, además de permitir la detención rápida frente a cualquier imprevisto u obstáculo.

1.2 Impedir la marcha a la deriva de cualquier coche que quede desvinculado de la tracción por rotura del enganche u otro desperfecto.

1.3 Moderar la marcha al acelerarse el tren en una pendiente por efectos de la gravedad o frente a señales de precaución.

En todos los casos antes mencionados, debido a la elevada inercia, se produce una gran disipación de energía en cortos periodos de tiempo. Dicha circunstancia lleva a requerir la mayor cantidad de ruedas, puestas en juego, como si todas fuesen motrices al aplicar el esfuerzo de frenado (desaceleración o tracción negativa), de modo de lograr la máxima adherencia disponible. De acuerdo a la experiencia, los valores de frenado cercanos al resbalamiento ($2{,}5 m/s^2$) {1}, producen reacciones indeseadas dentro del tren sobre los pasajeros. Esto determina una solución de compromiso entre el confort de los pasajeros y una relación distancia /tiempo apropiada para el frenado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. FRENOS REGENERATIVOS

Un freno regenerativo es un sistema de recuperación de energía cinética, conocido por su sigla en inglés *KERS* (kinetic energy recovery system. Dicho dispositivo, permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. Esta energía eléctrica es almacenada para su uso futuro, en general se emplean hasta pocos segundos luego de dicho almacenaje (hasta 29s en los nuevos motores de 400CV de los coches de Formula uno).

El freno regenerativo en trenes eléctricos alimenta la fuente de energía del mismo. En vehículos de baterías y vehículos híbridos, la energía se almacena en un banco de baterías o un banco de capacitores para un uso posterior.

El freno regenerativo es un tipo de freno dinámico. Otro tipo de freno dinámico es el freno reostático, mediante el cual la energía eléctrica generada en la frenada es disipada en forma de calor.

Los sistemas eléctricos ferroviarios juegan un papel protagonista en los sistemas de transporte de los países desarrollados. La eficiencia energética de estos sistemas es elevada en comparación con otros modos de transporte. Además, como ya se explicó brevemente en el apartado de frenos regenerativos, el frenado regenerativo de los trenes permite devolver energía a la red, con lo que se puede reducir notablemente el consumo energético de los mismos.

Sin embargo, en los sistemas electrificados en corriente continua (CC) se presentan inconvenientes que hacen que no se aproveche todo el potencial del frenado regenerativo. A continuación, se citarán los aspectos fundamentales relacionados con la eficiencia energética de un sistema ferroviario CC, haciendo hincapié en el aprovechamiento de la energía del frenado. Seguidamente, se expondrán las diferentes técnicas aplicables a la infraestructura de dichos sistemas que permiten mejorarlos. Por último, las técnicas principales (subestaciones reversibles y almacenamiento de energía) se aplican a un caso ejemplo en el que se muestran las características de su funcionamiento y su potencial para el ahorro de energía.

En la Figura 1, que se presenta al final de la página, se puede observar el potencial del frenado regenerativo para la reducción del consumo en sistemas eléctricos ferroviarios. En ella se muestra la potencia en pantógrafo y el perfil de velocidad de un tren de tipo metropolitano que recorre el trayecto entre dos estaciones separadas 1.4km sin ningún desnivel y empleando el mínimo tiempo posible (acelerando o frenando lo más rápido que sea posible, también se suele denominar como marcha tendida). Se distinguen tres fases distintas en la marcha del tren: una primera en la que, con un determinado rendimiento, la potencia consumida se emplea en acelerar el vehículo; una segunda fase en la que el consumo se emplea en mantener la velocidad; y la última fase en la que se frena el tren y en la que se podría devolver una determinada fracción de la energía cinética almacenada en el mismo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

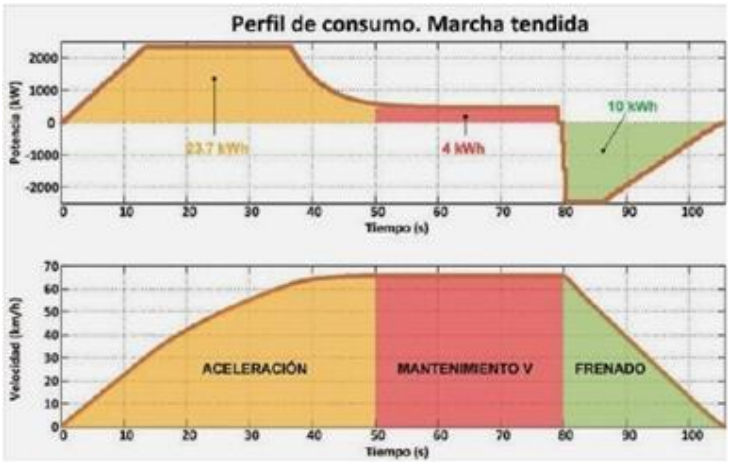


Figura 1: Perfil de consumo de energía

Los consumos durante las tres fases mencionadas en el ejemplo son de 23.7kWh, 4kWh y 10kW respectivamente. La energía devuelta durante la fase de frenado representa el 44% de la energía consumida para acelerar el tren y el 38% de la empleada en las dos fases en las que el tren es consumidor de potencia. Respecto al anterior análisis, se podría agregar, además, que si otro tren se encontrará en el mismo cantón eléctrico que el analizado realizando una marcha con el mismo perfil de consumo y en la que coincidiera la etapa de tracción con la de frenado, no debería consumir toda la potencia de las subestaciones del sistema.

De hecho, despreciando perdidas, el consumo de subestaciones para suministrarle la potencia requerida podría llegar a ser un 38% menor gracias al frenado regenerativo. Estos resultados muestran el enorme potencial de ahorro que representa este tipo de frenado en el consumo de sistemas ferroviarios. Como se dijo, estos valores son aproximados, despreciando las perdidas por efecto Joule sobre los conductores y despreciando el rendimiento de las conversiones al pasar de una corriente continua CC a una de corriente alterna CA para devolverla a la red. También hay que considerar que el tren en cuestión deberá contar con reóstatos, para que en caso de que la tensión aumente a niveles inadmisibles sobre los pantógrafos (debido a la regeneración de potencia), se pueda disipar el exceso y evitar sobretensiones.

Antes de continuar con la aplicación de la regeneración se deben explicar ciertas problemáticas que se dan en los sistemas ferroviarios eléctricos de corriente continua como por ejemplo el tema de la *receptividad*., que pasaremos a tratar a continuación.

2. CONCEPTO DE RECEPTIVIDAD

En un sistema ferroviario se define como *receptividad* a la capacidad del sistema eléctrico ferroviario para aceptar la energía regenerada en cada frenada de los trenes.

Las redes eléctricas ferroviarias pueden ser de dos tipos:

ISBN: 978-987-1676-63-7

a) REDES DE CORRIENTE ALTERNA (CA)
b) REDES DE CORRIENTE CONTINUA (CC)

En las redes de Corriente Alterna, la tensión de la catenaria puede alcanzar valores del orden de 25kV, por lo que las pérdidas por transporte de la energía son más bajas (son función del cuadrado de la corriente). La conexión de las catenarias con la red eléctrica exterior se realiza mediante transformadores de potencia que son bidireccionales. Por lo tanto, la energía excedente recuperada durante la frenada del tren, puede ser entregada a la red eléctrica externa. En general, se argumenta que la receptividad de las redes ferroviarias de CA es buena.

En las redes de CC, la tensión en la catenaria suele ser del orden de 3kV como valor máximo, por lo que los elementos aislantes están diseñados para soportar menores tensiones que los sistemas de CA.

Además, estos sistemas de CC, se conectan a la red eléctrica exterior a través de rectificadores (convertidores CA/CC) los que funcionan en su mayoría con diodos. Estos, son unidireccionales ya que permiten la circulación de energía en un solo sentido, desde la red hacia la catenaria. Podemos afirmar, entonces, respecto de la regeneración de energía, que los rectificadores aíslan la red eléctrica ferroviaria de la red eléctrica.

Si la energía regenerada en la frenada no se consume por otro tren o se almacena en acumuladores en el mismo momento que se produce (o es mayor que la consumida o almacenada), se producirá una elevación de tensión en la catenaria, pudiéndose sobrepasar la máxima tensión admitida en la línea. Como consecuencia de ello, parte de la energía regenerada debería consumirse a través de, por ejemplo, un freno reostático.

La receptividad varia con el intervalo de explotación. Cuanto menor sea el intervalo de explotación, se aprecia una tendencia decreciente del porcentaje de regeneración a medida que disminuye la frecuencia entre trenes. Al aumentar la frecuencia serán menores las pérdidas de los conductores, debido a la cercanía de los trenes. Recordando que la tracción es un periodo más prolongado que la etapa de frenado, existe la posibilidad de que un tren se encuentre en las cercanías en la etapa de tracción pudiendo consumir la energía regenerada.

Según lo expuesto, se deberá buscar la máxima receptividad del sistema a lo largo del tiempo de operación. Una optimización en la sincronización entre frenadas y aceleraciones que se dan en las subestaciones sería una opción. Otra condición seria optimizar la infraestructura eléctrica del sistema para que la receptividad se mantenga lo más alta posible la mayor cantidad de tiempo.

Una forma de optimizar la infraestructura eléctrica es hacer las subestaciones reversibles. Para ello se instala en las mismas, que alimentan la catenaria, equipos convertidores que se conectan en paralelo a los rectificadores existentes y que permiten inyectar en la red eléctrica los excedentes de energía que no se pueden consumir en la propia red de CC. El descripto es el Sistema INGEBER desarrollado por la empresa Ingeteam que monitorea en forma constante

la catenaria y al detectar energía de frenado que no se pueda consumir la convierte en CA y la inyecta en la red con parámetros de calidad de onda adecuados. La solución presentada es óptima para subestaciones existentes.

Cuando se trata de subestaciones nuevas de suministro de CC, es conveniente utilizar *convertidores bidireccionales*.

3. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

Los sistemas de almacenamiento de energía acumulan la energía de frenada que no se puede consumir en el momento en que es regenerada. De esta forma la energía está disponible para ser consumida cuando sea requerida. Dichos acumuladores pueden ser fijos en las subestaciones de alimentación o portados tipo móviles en los propios vagones de los trenes de tal forma que la energía se puede emplear para la circulación en tramos no electrificados, puntos muertos de empalme entre catenarias de dos subestaciones distintas. El uso de estos equipos puede ser entonces, para almacenamiento de energía y apoyo al mantenimiento de la tensión en la catenaria. En función de uno u otro uso, varian los dispositivos de control.

3.1 Condensadores de doble capa o supercondensadores

En estos supercondensadores, Figura 2, la energía se almacena electrostáticamente entre dos electrodos separados por un electrolito. Poseen altas densidades de potencia, por lo que resultan ser empleados como estabilizadores de la tensión.



Figura 2: Supercondensadores

3.2 Baterías

Este es el elemento más común y conocido de almacenamiento de energía, Figura 3, su evolución ha sido muy grande y actualmente la tecnología que presenta las mejores

características de densidad de energía, efecto de memoria y mantenimiento es la de Litio-Ion. Sus ventajas principales son la rápida respuesta a los cambios de la demanda de energía, así como muy bajas perdidas en espera. También dependiendo del uso y detalles de la operación pueden tener un alto rendimiento energético.



Figura 3: Batería de Litio-Ion de “GS Yuasa International Ltd.”

A continuación, se muestra esta tecnología en el tren Kinki Sharyo’s “Smart BEST” Self-charging, Battery-powered Train que autocarga la batería para su funcionamiento, Figura 4.



Figura 4: Tren con batería autocargable

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las baterías instaladas en una de las líneas del Subterráneo de Nueva York, Figura 5, desarrollada por la firma “Kawasaki Heavy Industries, Ltd”, consiste en un banco de baterías. Según las pruebas realizadas, dicho banco puede alimentar un tren de diez coches con una autonomía de 2,5km, con la batería cargada al 11% de su capacidad máxima. Las mismas son cargadas por freno regenerativo y se estima que a plena carga pueden alimentar un tren de 17 coches con luces y aire acondicionado encendidos a lo largo del recorrido entre dos subestaciones.



Figura 5: Banco de baterías Kawasaki

4. CONCLUSIONES

Para poder sacar conclusiones sobre la conveniencia económica de estos sistemas, se requiere un estudio detallado para distintas frecuencias de trenes a los que opere lar red. Conociendo con precisión para cada intervalo definido el número de horas diarias, las horas pico, los valles y teniendo en en cuenta las estacionalidades tanto semanales como anuales, se puede determinar un ahorro energético valido que se traducirá en un ahorro económico.

De la caracterización realizada de los sistemas eléctricos ferroviarios, podemos concluir, hasta esta etapa del estudio, que los sistemas alimentados con CC pueden presentar algún problema de receptividad a la energía regenerada durante el frenado, lo que puede limitar el aprovechamiento del enorme potencial de ahorro de esta técnica. En nuestro país y más precisamente en la ciudad de Buenos Aires, se encuentran los siguientes sistemas:

ISBN: 978-987-1676-63-7

1. Línea Mitre-Sarmiento: 800VCC con 3er Riel
2. Línea Urquiza: 600VCC con 3er Riel (Toshiba-Mitsubishi)
3. Subtes línea: A, C, D, E, H: 1.500 VCC, Catenaria aérea flexible
4. Subte B: 550VCC con 3er Riel

Se observa que se encuentra con sistemas susceptibles de ser mejorados desde el punto de vista de las eficiencias energéticas.

Entre las distintas estrategias para reducir el consumo, existe la posibilidad de implementar mejoras en la infraestructura para aprovechar la energía del frenado.

En la actualidad, se dispone de tecnologías que lo permiten como las subestaciones reversibles o los dispositivos almacenadores de energía. En el caso de estos últimos, hay notables avances tecnológicos.

Aunque ambas técnicas llevan a resultados de ahorro parecidos, existen ciertos matices en el funcionamiento de una y otra. Si bien los almacenadores de energía pueden adolecer de ciertas limitaciones de potencia y presentan en la actualidad costos de mantenimiento elevados, su efecto de suavizado de las curvas de carga en las subestaciones tiene efectos beneficiosos para la red.

La evaluación del potencial de ahorro de estas redes requiere de un estudio particular para cada sistema de mejora que se quiera aplicar.

Es conveniente hacer notar que, para poder extraer conclusiones adecuadas desde el punto de vista económico, es necesario que el estudio represente adecuadamente las condiciones de explotación de la red. Para ello las situaciones de trafico deben analizar las situaciones reales.

Queda para el futuro, que el grupo avance en el estudio pormenorizado del caso de sistemas de regeneración de energía con ensayos a realizar en alguna de las redes ferroviarias de nuestro país.

5.REFERENCIAS

[1] Álvarez Mantaras D., Luque P., *Ferrocarriles: Ingeniería e infraestructura*. Editorial Universidad de Oviedo, Oviedo, 2003.

[2] Oliveros R., López P., Megia P., *Tratado de Ferrocarriles Tomo II*, Editorial Rueda, 1ºEdicion Madrid, España 1980.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Grupo de Estudio de Tecnologías de Transporte Ferroviario (GETTF) y al Instituto Argentino Ferroviario (IAF), por el apoyo brindado.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE CADEIRA DE RODAS DE CORRIDA PARA CONDUÇÃO PASSIVA DE UM CONDUZIDO COM PARALISIA CEREBRAL.

Fernando Marques Fernandes[1], **André Giraldez Gadanha**[1], **Igor Antônio Pereira dos Santos**[1], **Kauê Pinheiro Lena**[1], **Maikel da Rocha Bicca**[1], **Said Abdul Rahman**[1], **Tadeu Domingues da Silva Antunes**[1], **Alda Paulina dos Santos**[1] e **Carlos Alberto Amaral Moino**[1].

[1] Universidade Santa Cecília.
Rua Oswaldo Cruz, 255/277 – Boqueirão – Santos – São Paulo – Brasil – CEP 11045-907
fmarques@unisanta.br

RESUMO

Este trabalho consistiu em um projeto estrutural e construção de uma cadeira de rodas de corrida, projetada em liga de alumínio 6061, material amplamente utilizado em cadeiras deste tipo. A cadeira em questão foi dimensionada exclusivamente para dois usuários: o condutor e o conduzido. O condutor é um corredor de corrida de rua de meia distância entre 12 e 13 km, com 57 anos de idade. O conduzido por sua vez é uma criança de 11 anos, neto do condutor, que possui paralisia cerebral espástica, com pouco movimento de MMII (membros inferiores) e MMSS (membros superiores), porém com boa comunicação oral e indícios de déficit intelectual, motivos pelos quais a estrutura, assento e apoios (braços, costas, pernas e cabeça), foram projetados sob medida. O incentivo maior para execução deste trabalho foi poder contribuir em um projeto acadêmico para a acessibilidade de uma criança com deficiência, assim como a integração social e esportiva da mesma, e convivência entre ela e seu avô em uma atividade que possam participar juntos, a qual o avô já participava há algum tempo, porém sozinho. Para desenvolvimento e confecção da estrutura da cadeira foram utilizados conceitos de engenharia aliados a softwares como *Ftool* e *SolidWorks®* e também conceitos relacionados a estudos ergonômicos de acordo com a norma NR-17.

Palavras Chaves: acessibilidade, paralisia cerebral, cadeira de rodas, ergonomia.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no censo de 2010 [1] foi constatado que no Brasil existem aproximadamente 45,6 milhões de pessoas com algum tipo de deficiência, representando 23,9% da população total brasileira. Dentre estes, 7% possuem algum tipo de deficiência motora e 1,4% são pessoas com alguma deficiência mental ou intelectual. A Figura 1 mostra graficamente a distribuição da população por deficiência, segundo o último censo em 2010.

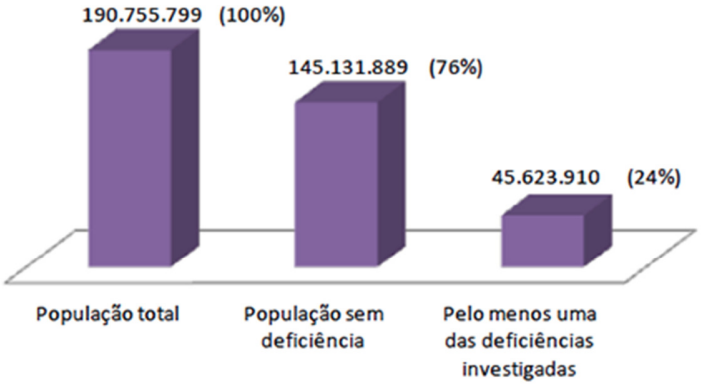


Figura 1 - Censo IBGE de 2010 para pessoas com deficiência [1].

Conforme o exposto soma-se aproximadamente 8% da população brasileira com alguma deficiência que necessite de uma cadeira de rodas para locomoção.

2. OBJETIVO

Projetar uma cadeira de rodas para atender especificamente uma criança de 11 anos e portador de paralisia cerebral, cujo sonho sempre foi participar de uma corrida com seu avô. O projeto foi elaborado para a cadeira ser um modo de transporte passivo, atendendo as normas ergonômicas da NR17 [2] envolvendo as medidas corporais específicas do usuário. Além das dimensões da criança, foram consideradas as dimensões da pessoa responsável pelo transporte da cadeira, visando à segurança e a adaptação ergonômica do projeto para ambos e desempenho eficiente na corrida de média distância (aproximadamente 10 km).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A cadeira apresenta duas configurações de rodas diferentes. As rodas traseiras possuem diâmetro nominal de 660,4 mm (26”), 32 raios, cubo com rolamentos de esferas e suporte para freio a disco, a roda dianteira possui diâmetro nominal de 508 mm (20”), 32 raios e cubo com rolamentos de esferas, Figura 2 .

ISBN: 978-987-1676-63-7



(A) (B)

Figura 2 - (A) Roda traseira e (B) Roda dianteira. (Fonte: Autores do trabalho).

Uma almofada adequada deve distribuir a pressão, minimizar a pressão de pico em proeminências ósseas, estimular a postura correta, favorecer as atividades funcionais, bem como atender às preferências dos usuários em manutenção, conforto e estética [3]. Todos os aspectos relativos aos usuários devem ser levados em consideração para a determinação da almofada mais adequada, além de fatores de risco [3]. No estudo realizado o aspecto considerado foi o comprometimento do equilíbrio de tronco que o usuário possui. A Figura 3 apresenta o assento selecionado.



Figura 3 - Assento reclinável utilizado [4].

3.1 Medidas Antropométricas do Condutor

Para realização do projeto foram feitas medidas antropométricas com um antropômetro manual [5]. As dimensões verificadas foram: distância horizontal do tronco até a extremidade do dedo indicador (determinando a distância de alcance do guidão da cadeira), a distância horizontal da ponta do cotovelo até a extremidade da mão fechada (determinando a distância de alcance do guidão da cadeira), a distância horizontal entre os pontos mais laterais dos ombros (determinando a largura do guidão). Para verificar o ângulo de conforto de flexão do antebraço em relação ao eixo do tronco, visando um melhor ajuste da altura do guidão, foi utilizado goniômetro ajustado dentro da faixa de ângulos de conforto que vai de 15º a 35º. Essas medidas são indicadas na Figura 4.

ISBN: 978-987-1676-63-7

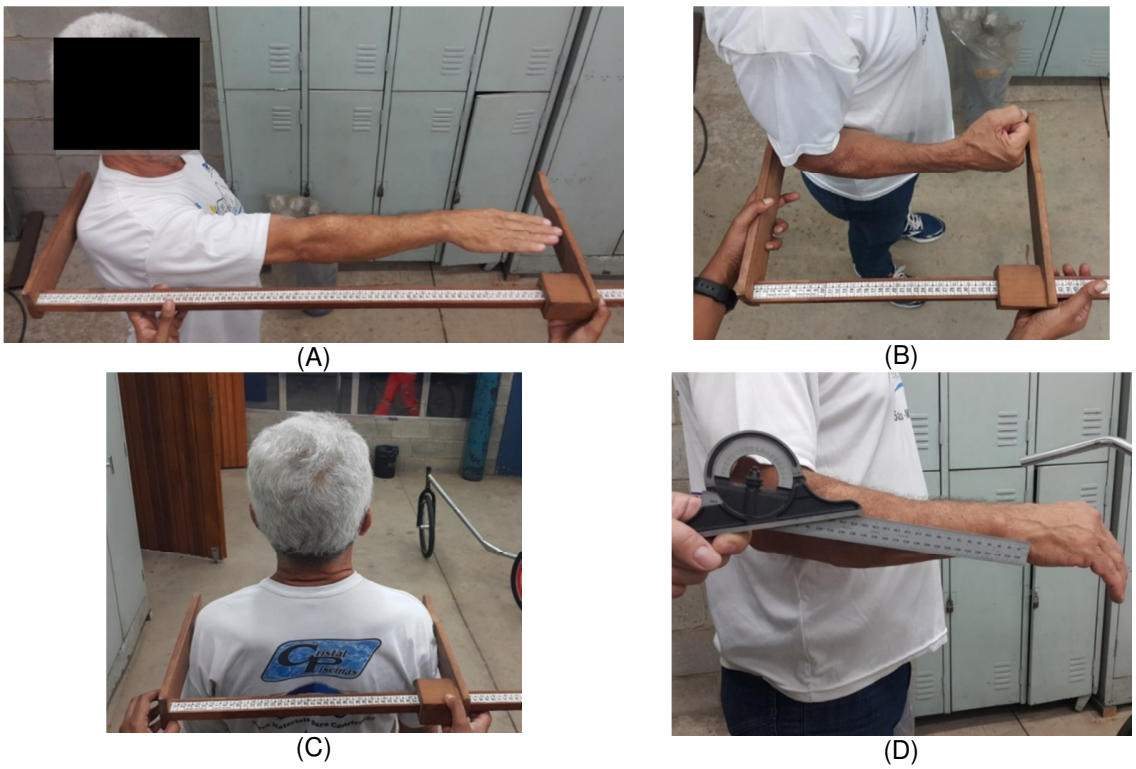


Figura 4 - (A) Distância horizontal do tronco até a extremidade do dedo indicador; (B) Distância horizontal da ponta do cotovelo até a extremidade da mão fechada; (C) Distância horizontal entre os pontos mais laterais dos ombros e (D) Ângulo de conforto de flexão do antebraço em relação ao eixo do tronco. (Fonte: Autores do trabalho).

3.2 Medidas Antropométricas do Conduzido

Foram realizadas as seguintes medidas antropométricas do conduzido: assento ao pé, sacro-poplítea, assento até a cabeça, ângulo de conforto de inclinação da cabeça para frente e para trás, ângulo de inclinação do tronco para trás e o ângulo de inclinação coxa-perna.

3.3 Dimensionamento da Estrutura

O Design alongado proporciona estabilidade em altas velocidades, a cambagem é o ângulo de inclinação da roda em relação ao plano horizontal do solo a partir de 90º. A faixa do ângulo de cambagem geralmente está entre 7º e 15º, de forma que a maioria dos valores utilizados está entre 11º e 13º, no projeto foi utilizado o valor de 14º para a cambagem das rodas traseiras.

3.4 Dimensionamento do Eixo

O dimensionamento do eixo principal partiu do princípio de Engenharia Reversa, sendo que primeiro a estrutura foi simulada no *SolidWorks®*, e depois verificada através das equações de resistência dos materiais.

A Equação (1) apresenta o momento de inércia da seção transversal [6].

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$I = \frac{\pi\left(D^4 - d^4\right)}{64} \quad (1)$$

Sendo:

I - momento de inércia da seção transversal do tubo (mm^4);

D - diâmetro externo (mm);

d - diâmetro interno (mm).

A Equação (2) apresenta o momento da força peso [6].

$$MP = \frac{P \times a \times b}{L} \times 10^3 \quad (2)$$

Sendo:

MP - momento da força peso (Nm);

P - força peso total (N);

a - distância do apoio até a força (m);

b - distância da força ao outro apoio (m);

L - comprimento total de apoio a apoio (m).

A Equação (3) apresenta a maior tensão suportada pela seção transversal [6].

$$\sigma_{(MAX)} = \frac{MP}{I} \times r \quad (3)$$

Sendo:

$\sigma_{(MAX)}$ - maior tensão suportada pela seção transversal (N/mm^2);

r - raio da seção transversal (mm);

A Equação (4) apresenta a tensão admissível [6].

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma e}{Cs} \quad (4)$$

Sendo:

σe - limite de escoamento do material (N/mm^2);

Cs - coeficiente de segurança (adimensional).

4. RESULTADOS

A força F1 representa a força peso da criança e foi estabelecida pela Equação (5).

$$F1 = m \times g = 50 \times 9{,}81 = 490{,}5\,N \quad (5)$$

Sendo:

*F*1 - força peso resultante (N);

m - massa da criança (kg);

g - força da gravidade (m/s²).

Como o assento tem comprimento de 300 mm à força aplicada é distribuída por todo o comprimento o que nos leva ao valor 1635 N/m, apresentado na Figura 5.

A força F2 representa a força resultante de aceleração no encosto, conforme Equação 6.

$$F2 = m \times \gamma = 50 \times 0{,}67 = 33{,}5\,N \tag{6}$$

Sendo:

*F*2 - força resultante da aceleração (N);

γ - força da aceleração (m/s²).

Como o encosto tem o comprimento de 700 mm à força aplicada é distribuída por todo o comprimento o que nos leva ao valor 48 N/m, apresentado na Figura 5.

A força F3 representa a força aplicada na cadeira para tirá-la da inércia, conforme Equação 7.

$$F3 = (m \times \gamma) + (m \times g \times \mu) = (50 \times 0{,}67) + (50 \times 9{,}81 \times 0{,}001) = 34\,N \tag{7}$$

Sendo:

*F*3 - força aplicada para movimentar a cadeira (N);

μ - coeficiente global de rolamento (adimensional).

Para obter o momento da força peso foram aplicadas todas as forças atuantes na cadeira e colocadas no software *Ftool* para simular os resultados, Figura 5.

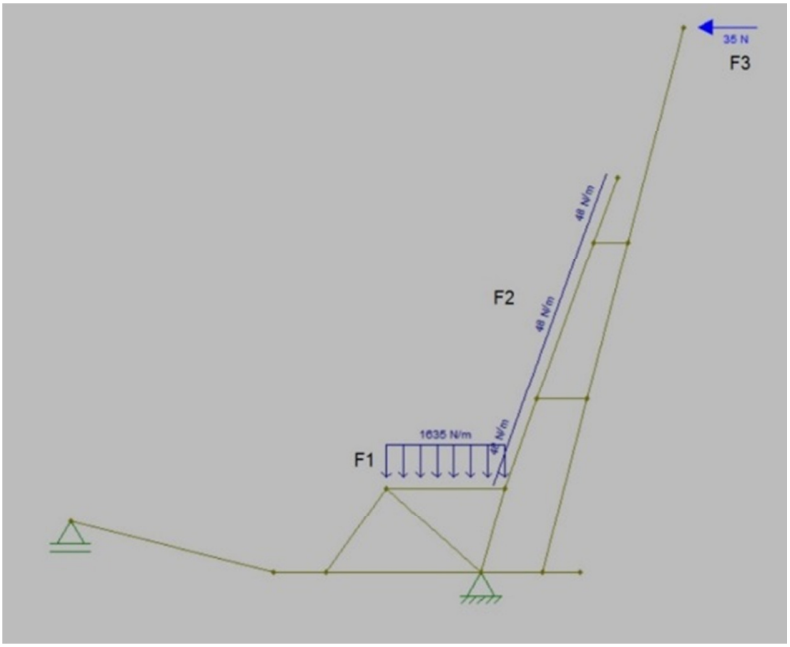


Figura 5 - Forças aplicadas na cadeira (Ftool). (Fonte: Autores do trabalho).

O momento da força peso foi determinado pelo software *Ftool*, conforme Figura 6.

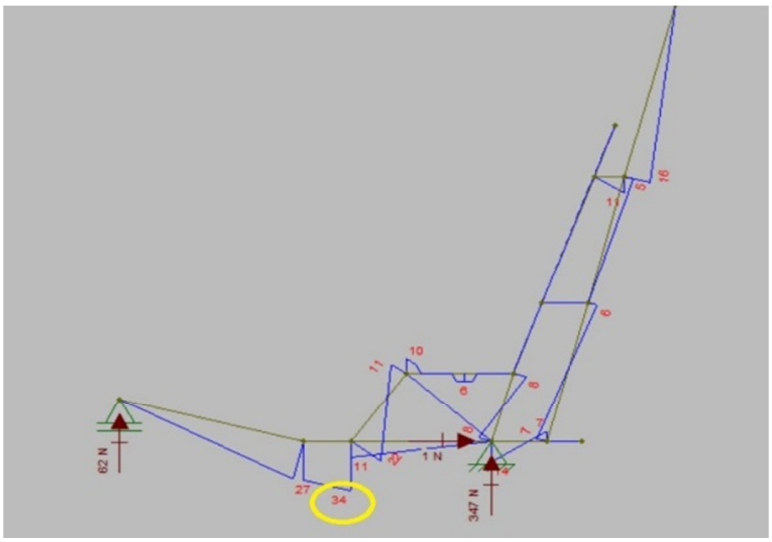


Figura 6 - Diagrama de momentos gerado pelo Ftool. (Fonte: Autores do trabalho).

O *Ftool* apresentou como resultado o diagrama das forças internas, assim como as reações de apoio. Para calcular o coeficiente de segurança Cs foi utilizado o momento da força peso crítico, ou seja, o maior valor mostrado no diagrama das forças internas. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados para os cálculos com o alumínio 6061 T6.

Estrutura Tubular	
I	28928,32276 mm^4
MP	34000 N.mm
$\sigma_{(MAX)}$	22,33 MPa
Cs	12,31468848

A estrutura da cadeira em três dimensões foi gerada no *SolidWorks®* onde foi possível identificar as regiões de maior tensão, confirmando os resultados apresentados pelo *Ftool*. A Figura 7 apresenta as forças aplicadas na cadeira em seu modelo tridimensional.

As forças F1, F2 e F3 aplicadas foram às mesmas utilizadas no *Ftool*, o apoio A foi colocado na estrutura onde existe a roda frontal, sendo utilizado um apoio móvel para representar a roda, o apoio B foi colocado nos lugares das rodas traseiras, sendo utilizado apoio fixo.

Em seguida foi realizado o estudo estático de esforços para encontrar as tensões presentes na estrutura da cadeira de roda. O método que o *SolidWorks®* trabalha é o método de *Von Misses*, que calcula as tensões de acordo com a variação de energia interna. A Figura 8 apresenta os resultados das tensões.

ISBN: 978-987-1676-63-7

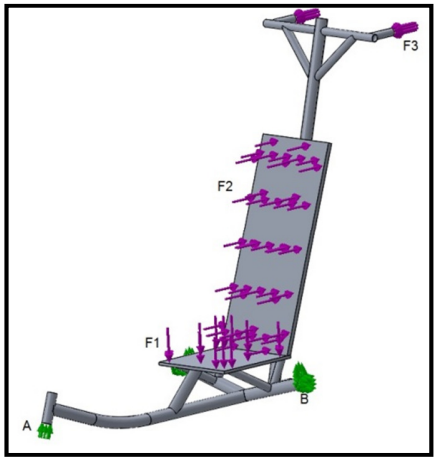


Figura 7 - Forças aplicadas na estrutura (SolidWorks®). (Fonte: Autores do trabalho).

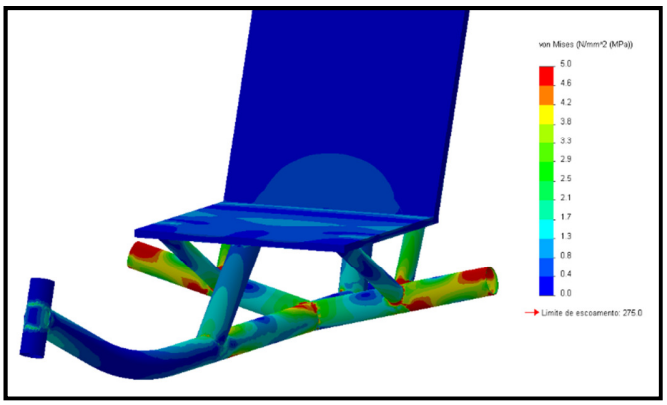


Figura 8 - Tensões geradas (SolidWorks®). (Fonte: Autores do trabalho).

A Figura 9 apresenta o local onde a maior tensão foi encontrada, considerando este local como o local de tensão crítica, segundo o critério de *Von Misses*.

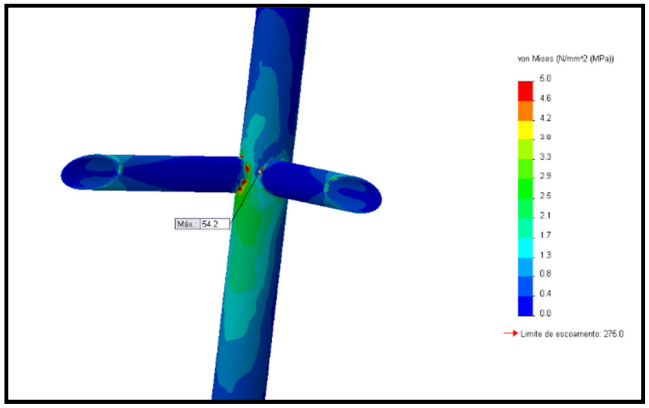


Figura 9 - Tensão crítica encontrada (SolidWorks®). (Fonte: Autores do trabalho).

ISBN: 978-987-1676-63-7

A tensão de escoamento do alumínio 6061 T6 é de 275 MPa, e a tensão máxima gerada pelos esforços na cadeira é de 54,2 MPa. Com estes dados é possível calcular o coeficiente de segurança da cadeira, conforme Figura 10.

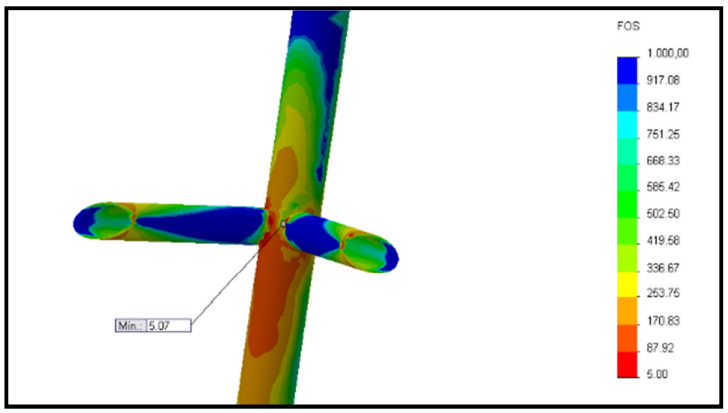


Figura 10 - Resultado do coeficiente de segurança(SolidWorks®). (Fonte: Autores do trabalho).

O menor coeficiente de segurança encontrado pelo *SolidWorks®* foi de 5,07 e este valor é encontrado onde ocorre a maior tensão do estudo.

Determinados todos os cálculos necessários, a cadeira de rodas foi construída, testada e aprovada pelo condutor e pelo conduzido, conforme a Figura 11.



(A)



(B)



(C)

Figura 11 - (A) Cadeira de rodas concluída; (B) e (C) Condutor e conduzido testando a cadeira. (Fonte: Autores do trabalho).

5. CONCLUSÕES

Foram utilizados dois métodos para estimar o coeficiente de segurança da cadeira, o primeiro método foi o cálculo de tensão máxima através do momento fletor.

Este método foi aplicado pelo software *Ftool* que realiza todos os cálculos apenas em duas dimensões.

No segundo método foi utilizado o software *SolidWorks®* que trabalha com vários métodos de cálculos, porém, neste trabalho optou-se pelo método de *Von Misses* que utiliza a energia de deformação da peça para calcular as tensões e todo seu estudo é realizado em três dimensões.

Foi possível observar que os resultados encontrados nos softwares apresentaram valores diferentes, tanto em relação ao coeficiente de segurança, quanto à máxima tensão presente e a localização desta tensão.

Estas diferenças podem ser consideradas aceitáveis, uma vez que os softwares trabalham com métodos distintos e em planos diferentes. Enquanto o software *Ftool* apresentou uma tensão máxima de 22 N/mm² para o alumínio no local de fixação do assento no eixo principal, o *SolidWorks®* apresentou uma tensão máxima de 54 N/mm² no eixo do guidão, desta vez na junção de fixação do encosto. As diferenças não comprometem o projeto visto que a tensão de escoamento do alumínio 6061 T6 é de 275 MPa.

Os equipamentos e acessórios voltados para a prática desportiva de portadores com deficiência não possuem um custo acessível a todos e a criação de soluções alternativas é pouco incentivada no Brasil. As pessoas que possuem filhos, ou familiares próximos com deficiência, e têm o desejo de que eles participem de atividades esportivas, ainda hoje são forçadas a adaptar cadeiras de rodas já existentes ou mesmo a projetar e construir novas cadeiras a partir do zero por conta própria, e desenvolver melhores soluções para os problemas inerentes a este tipo de construção. A interdisciplinaridade foi um tema recorrente deste trabalho, pois ao aplicar os conceitos absorvidos em engenharia, em conjunto com outras áreas como a fisioterapia, foi possível desenvolver um dispositivo que promove momentos de lazer e inclusão social para pessoas com deficiências motoras. O trabalho em conjunto das áreas de exatas e da saúde tem o potencial de desenvolver novos produtos e proporcionar uma série de melhorias para a vida destas pessoas, que em boa parte dos casos são privadas de uma série de atividades devido à falta destes equipamentos.

De acordo com cálculos e medições antropométricas a cadeira atende os requisitos de segurança, dados os coeficientes de segurança em relação aos cálculos matemáticos, e eficiência e conforto segundo a NR-17, norma regulamentadora de ergonomia, proporcionando um desempenho seguro, eficiente e confortável para o condutor da cadeira assim como para o conduzido. Este trabalho foi realizado para um estudo de caso específico, não podendo ser generalizado para outros deficientes que queiram participar de atividades esportivas, porém, pode servir de base para estudos semelhantes.

8. REFERENCIAS

[1] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 20 de agosto de 2015.

[2] NR 17 – Norma Regulamentadora 17 – Ergonomia. Disponível em: <http://www.mtps.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR17.pdf>/>. Acesso em: 10 de julho de 2015.

[3] Mello M A F. *Almofadas para Usuários de Cadeiras de Rodas.* 2013. Disponível em: <http://technocare.net.br/portal/wp-content/uploads/2015/04/artigo_abridef.pdf>. Acesso em: 17 de junho de 2015.

[4] *Tricae Comércio Varejista Ltda*. Disponível em: <https://www.tricae.com.br/cadeira-para-auto-9-a-36-kg-evolve-vermelho-sabre-cosco-93083.html>. Acesso em: 20 de junho de 2015.

[5] PANERO, J. e ZELNIK, M., *Dimensionamento Humano para Espaços Interiores,* Gustavo Gili Editora, São Paulo, 2006.

[6] BEER, F.P., DeWOLF, J.T., JOHNSTON JR, E.R. e MAZUREK, D.F., *Estática e Mecânica dos Materiais*, McGraw-Hill, São Paulo, 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNISANTA - Universidade Santa Cecília pelo apoio recebido durante toda a execução desta pesquisa e a todos que colaboraram para a produção deste artigo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL ÁREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Análise da interferência de arrasto dos encaixes de fixação e parafusos na parte frontal modelo do VLS-1 (Veículo Lançador de Satélite) em regime transônico

Josenei Godoi de Medeiros[1], Ana Cristina Avelar[2], João Batista Pessoa Falcão Filho[3]

[1] Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP: 12.228-901, São José dos Campos, SP, joseneigodoi@yahoo.com.br

[2,3] Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-904, São José dos Campos, SP, anacristina.avelar@gmail.com, jb.falcaofilho@gmail.com

RESUMO

Um das características a ser respeitada na concepção de um modelo em escala menor, ao tamanho natural, de um veículo lançador de satélites para testes aerodinâmicos é que este tenha similaridade geométrica. Essa característica, se faz necessária para que se tenha efeitos aerodinâmicos também similares ao enfrentado pelo veículo real durante seu voo. O modelo do VLS-1 projetado para testes aerodinâmicos no TTP (Túnel de Vento Transônico) do IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço) foi fabricado em aço polido respeitando essa similaridade e contem quatro partes distintas sendo: parte frontal do veículo ou cone; parte interna, que conecta duas partes externas e tem a função de fixar o modelo ao túnel através do "*Sting*"; "boat-tail", ou coifa; corpo do veículo. Por se ter estas partes distintas que precisam ser interligadas, foi adotado um encaixe de precisão entre elas e parafusos para fixação das mesmas. Devido à estas funcionalidades de projeto e proposições durante o proceso de fabricação, foram atribuídas características ao encaixe dos parafusos. Neste proceso foi questionado se estes encaixes e parafusos que afetaram a uniformidade do corpo poderiam causar ou aumentar efeitos aerodinámicos como o de arrasto, descaracterizando dessa forma a similaridade geométrica do modelo. Portanto o presente trabalho teve por objetivo analisar esse efeito e suas variações causadas por essas características do modelo no TTP por meio de ensaios aerodinâmicos em regime de velocidade transônica, fazendo uso de uma balança de arrasto fixada ao modelo, que foi submetido aos testes com e sem proteção nos encaixes dos parafusos. As caracterizações do modelo feitas para o teste constataram que o modelo, com uma massa que uniformizou sua superficie e cobriu os encaixes, mostrou um valor maior de arrasto comparando com o veículo sem a massa, contudo estes valores ainda estão dentro da margem de incerteza esperada pelo experimento.

Palavras- chave: VLS-1, Veículo lançador de Satélite, arrasto balança de arrasto.

1. INTRODUÇÃO

Um dos modelos de veículos utilizados para testes aerodinâmicos diversos, tais como medidas de arrasto por meio de balança do tipo Strain-gage [1], PSP (Paint Sensitive Pressure), Schlieren, entre outros, no TTP do IAE é um modelo do VLS-1 com partes frontais móveis que permitem acoplamento e desacoplamento via encaixe e preso por parafusos [2].

Estas partes móveis têm por finalidade permitir o acesso ao interior do modelo onde está alojado um encaixe para um tubo que faz ligação a um sensor de medida de pressão estática e o adaptador da balança de arrasto. Tem-se ainda a característica de variação do ângulo de decaimento da ligação entre a coifa e o corpo do modelo por meio da troca de uma das peças intermediárias, responsável por esta conexão, cuja denominação é “Boat-tail”.

Durante o projeto idealizado pela referência [2] os encaixes dos parafusos foram confeccionados com um rebaixo no corpo a fim de permitir que a cabeça do mesmo seja alojada, não ocasionando saliência ou protuberância em sua superfície. Entretanto a manufatura destas peças não ocorreu conforme as especificações de tolerância do desenho fornecido.

A partir da identificação deste problema, foi idealizado um ensaio de medida de arrasto que pudesse validar e mostrar, quantitativamente, a relevância ou não, das características estruturais implícitas após a manufatura e se apresentariam alguma inconformidade aos testes esperados no TTP.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi analisar as interferências no arrasto ocasionadas pelos encaixes e parafusos usados na fixação das partes frontais no VLS-1 usado como base para estudos no TTP em testes com balança de arrasto em regime transônico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar o objetivo proposto neste trabalho foram realizados testes em túnel de vento com o modelo sem alterações e depois estudadas e aplicadas soluções para uniformização da superfície do modelo e realizado novamente testes em túnel de vento para observar os resultados e assim poder comparar o coeficiente arrasto (*CD*) do modelo com e sem a superfície uniformizada.

2.1. Túnel de Vento Transônico (TTP)

O Túnel de Vento Transônico instalado dentro do complexo do DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeronáutica) sob o comando do IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço)

ISBN: 978-987-1676-63-7

e presente na ALA (Divisão de aerodinâmica aplicada) é um túnel de vento com as seguintes características [3] :

- Dimensões da seção de testes 0,25 x 0,30 x 0,81 m;
- Faixa de número de Mach 0,2 a 1,3;
- Pressurização do circuito 0,5 a 1,2 bar;
- Circuito fechado;
- Operação contínua por com-pressor axial de 830 kW de potência;
- Operação intermitente com uso de injeção por 30 segundos (mínimo);
- Seção de testes com paredes fendidas com até 11% de área aberta e sistema de evacuação da câmara Plena;
- Controles automáticos de velocidade, pressão e temperatura e umidade na seção de teste;
- Ensaios de forças e momentos estáticos, distribuição de pressões e sistema de visualização por Schlieren;

Tais características são pertinentes para o uso proposto de testes ao modelo desenvolvido. Na Figura 1 está representada o circuito do TTP.



Figura 1 – Circuito do TTP.

Fonte: [3]

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2. Projeto do modelo

Sabe-se que é coerente que um modelo em escala seja similar à sua representação real. Para isso todos os parâmetros adimensionais relevantes devem ter os mesmos valores para o veículo e para o modelo [4]. Portanto, é preciso garantir que se tenha uma similaridade geométrica, similaridade cinemática e similaridade dinâmica.

Neste trabalho não serão considerados inicialmente as outras similaridades e considerado que os efeitos do número de Reynolds não interferirão nos resultados, portanto partindo inicialmente para analisar a similaridade geométrica, a construção de um modelo em escala deve respeitar as proporcionalidades das medidas e dos ângulos reais.

Com relação a superfície do VLS-1, sabe-se que a mesma não é uniforme e lisa, mas sim, possui variações de relevo, que podem ser consideradas irrelevantes no modelo em escala [5]. Entretanto, o veículo real não possui degraus em sua geometria ou rebaixos em tamanho proporcional como os dos encaixes para os parafusos de fixação do veículo construído para os testes.

No caso do modelo desenvolvido por MEDEIROS, et al. (2014) os encaixes das partes do modelo (parte frontal do veículo ou cone; parte interna, que conecta duas partes externas e tem a função de fixar o modelo ao túnel através do "*Sting*"; "boat-tail", ou coifa; corpo do veículo) são presos por um conjunto de três parafusos distribuídos axialmente ao longo do eixo, distanciando 120° um do outro. O total de parafusos empregado são nove unindo as três partes móveis externas.

Os encaixes dos parafusos foram projetados com um rebaixo no corpo a fim de permitir que a cabeça do mesmo seja alojada, não ocasionando saliência ou protuberância na superfície. Entretanto foram realizadas adequações, devido às características de fabricação, que envolveram uma menor tolerância nas medidas para que fossem minimizados custos, maquinário usado e eventual inabilidade do mecânico envolvido na manufatura. Portanto, estes encaixes não saíram perfeitos, conforme projetado e não permitem, assim, uma adaptação adequada da cabeça do parafuso ao encaixe, ou seja, não há uma uniformidade no corpo sendo que os nove parafusos existentes ficaram abaixo do nível do corpo.

Além destes detalhes relacionados ao encaixe tem-se que o próprio parafuso não possui um tamanho pequeno devido às exigências de uso do túnel. Para que se tenha uma segurança no circuito do TTP, todo objeto metálico ou de dureza considerável deve obedecer ao critério de não passagem por uma tela de contenção cuja distância do orifício quadrático de passagem é de 2,8mm, em diagonal [6]. O parafuso usado no projeto possui um diâmetro de 3,00mm, acima do mínimo recomendado para o uso no túnel.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Na Figura 2 observam-se todas as peças alinhadas em sua posição de encaixe. São, ao todo, oito peças, sendo cinco *boat-tails* com ângulos de decaimento de 90°, 32°, 16°, 8° e 4°. Nestas peças se encaixa a maioria dos parafusos. Há ainda um adaptador para a balança de arrasto, o nariz de cone e o corpo cilíndrico, que possui os demais parafusos de fixação do conjunto.



Figura 2 - Peças do modelo alinhadas em suas posições de encaixe

Fonte: [2]

ISBN: 978-987-1676-63-7

Os parafusos especificados no desenho do projeto são padrão de mercado com rosca milímetro M3 e com cabeça côncava de ângulo de 120° com profundidade da cabeça de 1mm e diâmetro fixo de 3mm para encaixe do corpo do parafuso.

Na Figura 3 observa-se um dos furos onde tem-se cavidades ovaladas e com medidas radiais diferentes em torno do centro do furo especificado de encaixe da cabeça do parafuso. Esta característica se repete para todos os outros furos.

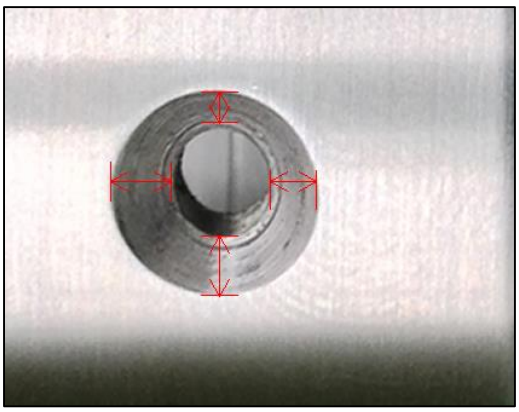


Figura 3 - Encaixe da cabeça do parafuso com medidas radiais em torno do centro do furo desiguais.

Segundo o projeto tem-se que ter ainda uma base passante do furo de 1,1 mm, o que foi desconsiderado na fabricação da peça. Na Figura 4, observa-se que não se tem o espaço de guia do corpo do parafuso. A falta dessa base acarretou no rebaixamento da cabeça do parafuso.

Esse detalhe de desigualdade de encaixe da cabeça e da furação sem a base guia do corpo do parafuso é observado em todos os nove parafusos de fixação, com pequenas variações da profundidade e da sobra do espaço lateral em torno da cabeça.

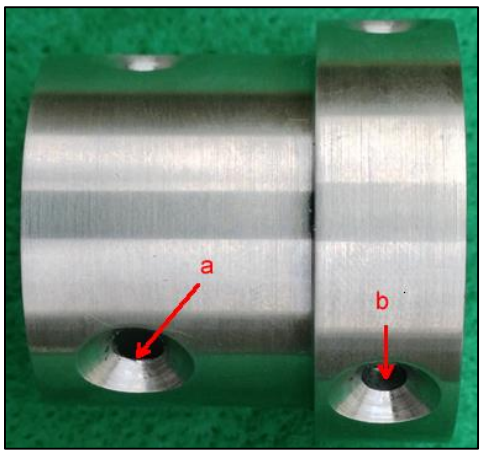


Figura 4 - *Boat-tail* de 90° (a) com furo passante sem base guia de 1.1mm como projetado mostrado no detalhe (a) e (b).

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3. Uniformização da superfície do modelo

Para se eliminar a depressão do encaixe da cabeça foi inicialmente feito uso de uma massa plástica com característica de rigidez mecânica, de forma a evitar o seu esfacelamento durante os testes, bem como o lançamento de seus resíduos no escoamento do túnel. Foi analisada a Massa de Poliéster que é própria para adesão em metais e possui maleabidade plástica podendo ser lixada e permitindo um acompanhamento da superfície uniformemente.

Esta massa faz uso de um catalisador que garante a sua rigidez em um curto espaço de tempo. Apesar de possuir as características necessárias para a implementação segura no túnel, garantindo sua fixação, esta massa não se mostrou viável, pois é de difícil remoção e deixa resíduos na peça e nos parafusos ocasionando um trabalho demorado de lixamento e limpeza.

Outra solução idealizada foi o uso de argila. A argila possui uma resistência mecânica menor que a massa plástica, o que facilita sua remoção, visto que a troca de peças é uma das primícias desse modelo e deve ser realizada com agilidade durante os experimentos, contudo apesar de ter uma resistência menor, essa não é o suficiente para permitir que a massa se solte durante os ensaios.

Sua modelagem não requer lixamento e o uso da modelagem manual com água é o suficiente para fixação e alisamento à superfície. Após essa etapa só requer um período de secagem que, ao sol, ficou em torno de 5 minutos. A Figura 5 mostra o modelo já com os rebaixos do parafuso tampados pela argila e modelados à superfície.

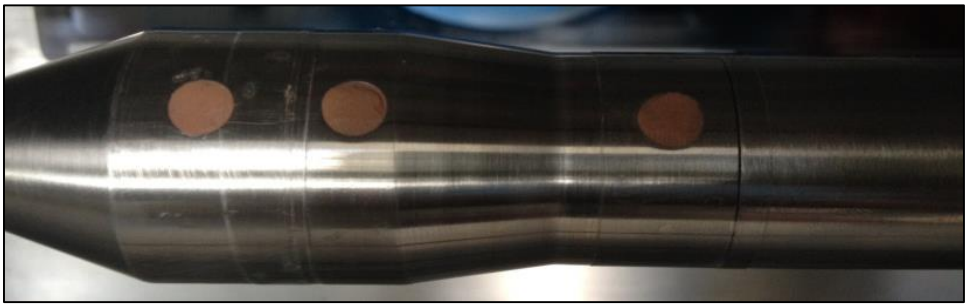


Figura 5 - Modelo com os encaixes da cabeça do parafuso tampados por argila.

2.4. Condições de testes no TTP

Os testes no TTP foram concebidos inicialmente para testes sem a argila e, posteriormente, uma amostragem dos testes feitos com a argila preenchendo as cavidades.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Seguiram-se os 18 números de Mach para o teste inicial sem a argila:0.174, 0.235, 0.276, 0.318, 0.358, 0.398, 0.435, 0.476, 0.520, 0.565, 0.612, 0.711, 0.765, 0.812, 0.870, 0.928, 0.961, 0.992

Para a amostragem realizada com a argila, os testes foram feitos com os quatro números de Mach: 0.318, 0.520, 0.711, 0.928

Os números de Mach foram escolhidos por serem representativos durante os testes sendo que os primeiros valores não são de precisão, pois como se trata de um túnel transônico, as medidas são melhores em regiões de trabalho operacional do Túnel [1]. Assim sendo, a representatividade destes valores satisfazem a validade das medidas permitindo uma comparação eficaz do modelo e nas condições de teste.

As seguintes medidas de pressão ambiente foram tomadas em Pa: 94390, 94375, 94360, 94360, 94360, 94353, 94345, 94324, 94324, 94323, 94308, 94300, 94300, 94286, 94278, 94270, 94256, 94256, 94256

Os valores obtidos nas planilhas fornecidas pelos programas de operação do TTP representam as medidas de pressão e de força, medidos para cada número de Mach especificado e nas condições de pressão ambiente medidas em um espaço de tempo amostral de quarenta medições. Para essas amostras também foram feitas as médias das medições e seus desvios-padrão, bem como seus cálculos de incerteza correspondentes [7-9] e aplicado seus valores às formulas para cálculo do coeficiente de arrasto [4,10].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira observação feita foi que a argila se mostrou a melhor alternativa para solucionar o preenchimento da depressão causada pela variação da tolerância durante a manufatura. Nos ensaios ela não se desprendeu do modelo e permitiu que fosse removida com facilidade para troca dos “*boat-tails”*.

Ao se analisar os resultados obtidos dos ensaios no TTP e plotados no gráfico da Figura 6 é possível observar, que os valores obtidos para o coeficiente de arrasto sem a proteção do parafuso, uma curva característica de coeficiente de arrasto em regime transônico.

Os primeiros pontos apresentam valores com maior desvio, contudo esperado, pois a balança utilizada possui uma faixa de trabalho para o regime transônico e não baixo subsônico, por isso a incerteza nesse ponto é maior, porém diminuindo conforme o número de Mach é incrementado.

A partir de número de Mach 0,6, quando a balança se encontra em regime pleno de trabalho, há uma estabilização na incerteza dos valores medidos.

A incerteza dos quatro pontos medidos para o caso do modelo sem massa, apresentou inicialmente em número de Mach 0,318 uma concordância pela barra de incerteza, porém com valor médio desigual. Para número de Mach 0,520 os valores seguiram da mesma forma. Já em número de Mach 0,711 coincidiram-se os valores e praticamente as incertezas também. Para o número de Mach 0,928 apesar de uma parte estar dentro do mesmo campo de incerteza, os pontos não possuem valores próximos.

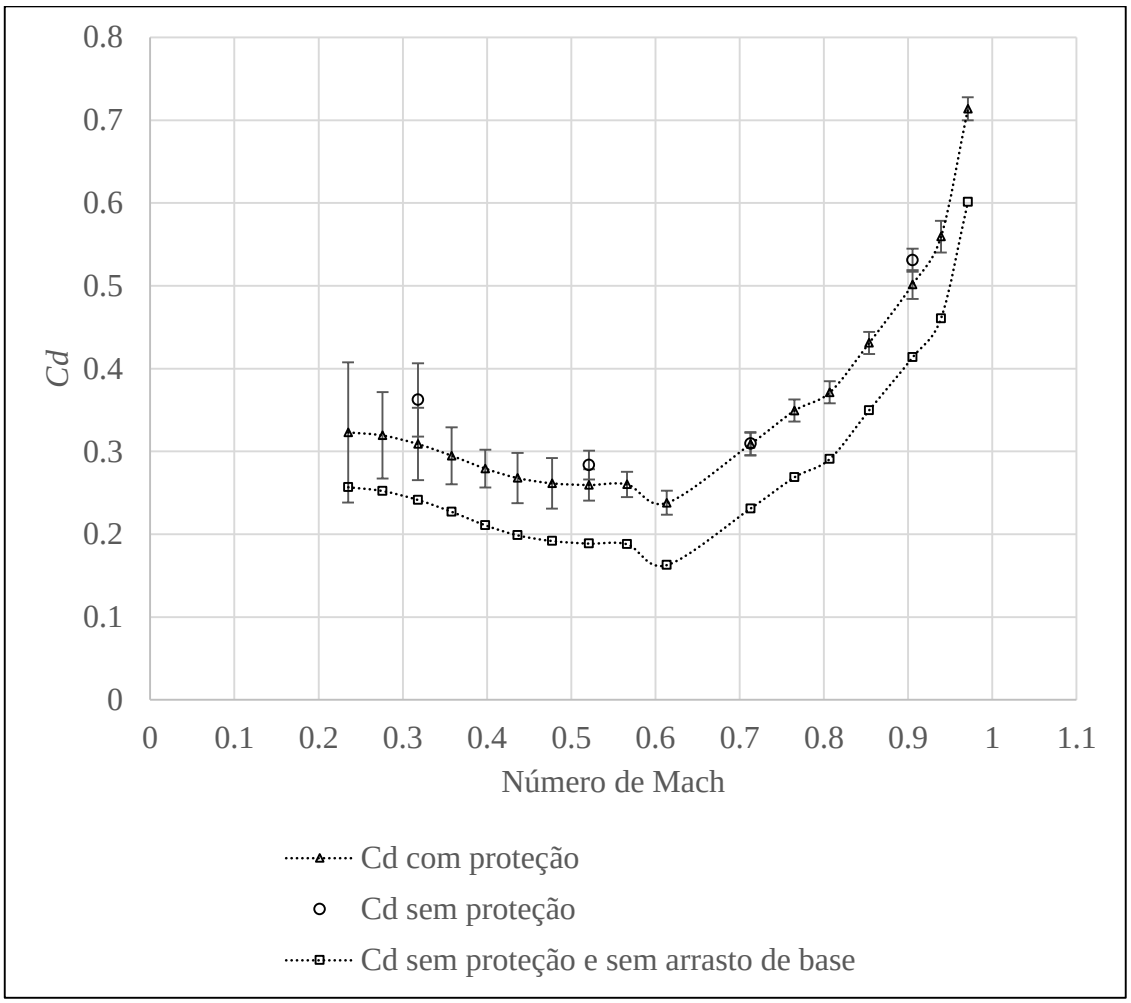


Figura 6 - Gráfico comparativo entre o arrasto ocasionado no modelo com e sem proteção aos rebaixos do parafuso do modelo VLS-1.

4. CONCLUSÕES

Os testes realizados permitiram observar que o coeficiente de arrasto com os parafusos, seus encaixes fora de padrão e os espaços que sobraram nas laterais dos encaixes, estão dentro da margem de erro esperada, contudo podem apresentar variações e interferir nos resultados das medidas para números de Mach menores, já para os números de Mach maiores os valores se aproximam.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Mesmo com essa proximidade, recomenda-se que em ensaios futuros seja usado a argila como material de uniformização da superfície, afim que se tenha um valor mais próximo da representação real dos resultados que o modelo, simetricamente semelhante, fornece.

A viabilidade dos ensaios realizados aplica-se diretamente a este modelo e seguem estes parâmetros de ensaios e de finalidade de medida. Para aplicação dos resultados em condições diferentes e em modelos com geometrias parecidas faz-se necessário, em trabalhos futuros, uma analise específica ao caso desejado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. d. Andrade, J. B. P. Falcão Filho e B. Goffert, " Internal balance development for drag measurements," em *14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, 2012.

[2] J. G. d. Medeiros, A. C. Avelar, P. Moraes Jr, J. B. P. Falcão Filho e M. G. Silva, "Aerodynamic analysis of the boat-tail angle of an hammer-head fairing satellite launch vehicle," em *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Belém, 2014.

[3] J. B. P. Falcão Filho e O. A. d. F. Mello, "Descrição técnica do túnel transônico piloto do centro.," em *ENCIT 2002*, Caxambu, 2002.

[4] I. M. Cohen e P. K. Kundu, Fluid Mechanics, 4ª ed., Academic Press, 2008.

[5] P. Moraes Jr. e A. Augusto Neto, "Aerodynamic Experimental Investigation of the Brazilian Satellite Launch Vehicle (VLS)," em *Proceedings of the SrdBrazilian Thermal Sciences Meeting*, Itapema, 1990.

[6] L. M. Silva e J. B. P. F. Filho, "Design of a foreign object damage (fod) screen and analysis of the impact caused in a transonic wind tunnel performance," em *15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Belém, 2014.

[7] J. D. Anderson, Introduction to Flight, 5ª ed ed., McGraw-Hill, 2004.

[8] GUM 1995, BIPM/JCGM 100 2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM, 2008.

[9] J. H. Vuolo, Fundamentos da teoria de Erros, 2ª ed., São Paulo, SP: Blucher, 1996.

[10] M. L. C. C. Reis, J. B. P. F. Filho, E. Basso e V. R. Caldas2, "Pressure coefficient evaluation on the surface of the SONDA III model tested in the TTP Pilot Transonic Wind Tunnel," em *IMEKO TC1-TC7-TC13*, MadeiraIsland, 2014.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SOLDADURA POR FRICCION-AGITACIÓN (FSW) DE ALEACIONES DE ALUMINIO DISÍMILES

Germán Artave [1], Leonardo N. Tufaro [1,2] y Hernán G. Svoboda [1,3]

[1] Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, INTECIN, GTSyCM3, Av. Las Heras 2214, C1127AAR, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
correo-e: ger.artave@gmail.com.
[2] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Av. Gral. Paz 5445, B1650KNA, San Martín, Buenos Aires, Argentina
[3] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

La soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso de soldadura en estado sólido el cual ha sido un campo de fuerte desarrollo en los últimos años, particularmente en la construcción de elementos estructurales con aleaciones de aluminio. En el último tiempo la soldadura de aleaciones disímiles se ha vuelto un requerimiento para muchas aplicaciones en diversas industrias como la naval, aeronáutica o automotriz. En este sentido, actualmente se continúa estudiando el efecto de los distintos parámetros del procedimiento de soldadura sobre las propiedades resultantes de las uniones disimilares, con el fin de incrementar la comprensión de los fenómenos actuantes durante la soldadura. El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de los parámetros de proceso sobre las propiedades mecánicas de uniones soldadas disímiles de aleaciones de aluminio del tipo AA5083-AA6061. Se soldaron probetas por FSW utilizando diferentes velocidades de rotación (680 y 903 rpm) y de avance (98 y 146 mm/min), posiciones de los materiales en la junta y geometrías de herramientas. Luego, se realizó la caracterización macroestructural de las uniones obtenidas para analizar la presencia de discontinuidades. Por otra parte, el comportamiento exhibido durante los ensayos de plegado permite analizar si para cada caso se generó un flujo plástico suficiente para producir la unión. Por último, se obtienen los perfiles de dureza y las propiedades mecánicas en tracción. Se encontró que para ciertas condiciones de soldadura se obtuvo un mejor flujo plástico asociado a buenas propiedades mecánicas, en concordancia con una degradación metalúrgica menor, buscando la optimización del procedimiento de soldadura.

Palabras Claves: FSW, Materiales Disímiles, Aleaciones de Aluminio, Flujo Plástico.

1. INTRODUCCIÓN

La Soldadura por Fricción-Agitación (FSW) es un proceso de unión en estado sólido que ha sido un campo de fuerte desarrollo en los últimos años. En particular la introducción de este proceso ha revolucionado la construcción de estructuras soldadas de aleaciones de aluminio, encontrando gran cantidad de aplicaciones en industrias como aeronáutica, aeroespacial, automotriz y naval, entre otras [1].

Durante la FSW, una herramienta no-consumible, compuesta por un hombro y un pin especialmente diseñados, rota sobre su eje, se inserta entre las dos chapas a unir y avanza sobre la interfaz de las mismas, generando el calor y flujo de material necesario para producir la soldadura. De esta manera, quedan definidos el lado de avance (AS) y el de retroceso (RS), siendo el primero el lado de la junta donde la velocidad de avance y la velocidad tangencial de la herramienta tienen el mismo sentido, mientras que el segundo es el lado donde tienen sentidos opuestos, lo que implica que existe cierta asimetría en este proceso. Dicha asimetría en el proceso puede generar variaciones en el campo térmico generado y en el flujo plástico de material establecido [1].

En el último tiempo la soldadura de aleaciones disímiles se ha vuelto un requerimiento para muchas aplicaciones en diversas industrias como la naval, aeronáutica o automotriz, asociado a la posibilidad de optimizar el diseño de una estructura en función de los requerimientos de cada parte de la misma, empleando diferentes materiales y/o espesores. La diferencia en las propiedades de los materiales hace en general un desafío la soldadura de materiales disimiles. En este sentido, recientemente se ha venido estudiando la aplicación de la soldadura FSW a este tipo de uniones, lo que resulta de gran interés debido a la dificultad para soldar materiales diferentes mediante procesos convencionales por fusión [2] y buscando reemplazar uniones del tipo mecánicas [3]. Si bien se ha trabajado profusamente en aspectos como la influencia de las variables de proceso, diseño de la herramienta, metalurgia y propiedades mecánicas de las uniones soldadas por FSW, así como en el desarrollo de modelos numéricos, todavía quedan muchos aspectos por comprender en relación a los fenómenos actuantes durante la soldadura por FSW en uniones disimiles [2].

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de los parámetros de proceso sobre la estructura y las propiedades mecánicas de uniones disímiles de AA5083-AA6061 obtenidas por FSW, variando la posición relativa de los materiales en la junta y la geometría de la herramienta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales Base

ISBN: 978-987-1676-63-7

En el desarrollo del presente trabajo se emplearon dos aleaciones de aluminio para la ejecución de las uniones soldadas por FSW: AA5083-H32 y AA6061-T6 en chapa de 3 mm.

Sobre ambos materiales se determinó la composición química mediante Espectrometría de Emisión Óptica (OES). A su vez, se extrajeron muestras correspondientes a cortes trasversales y longitudinales que se prepararon para observación metalográfica. Se determinó la microdureza Vickers, según norma ASTM E384. Asimismo, se mecanizaron probetas para ensayo de tracción uniaxial, según la norma ASTM E8M-04, en sentido longitudinal.

2.2. Soldadura FSW y Adquisición de datos

Se obtuvieron uniones disímiles soldando con el proceso FSW chapas de AA5083 y AA6061 de 150x75x3 mm a tope bajo distintas condiciones operativas, utilizando una máquina herramienta adaptada para dicho proceso. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de soldadura empleados. Se variaron la velocidad de rotación (ω) y la velocidad de avance (U) con el fin de obtener valores de *pitch* similares para todas las probetas soldadas. Para cada combinación de velocidad de rotación y avance se realizaron cuatro uniones soldadas, de manera de obtener una unión con la chapa de AA 5083 en el AS y otra con la chapa de AA 5083 en el RS para las dos herramientas utilizadas.

Tabla 1. Parámetros de soldadura por FSW y designación de probetas

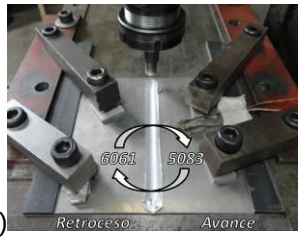
Designación	Posición AA5083	Herramienta - Pin	V rotación ω (rpm)	V Avance U ($mm.min^{-1}$)	Pitch =ω / U (rev.mm-1)
5A6R-680-098-H1	Avance	Cónico liso	680	098	6,9
5R6A-680-098-H1	Retroceso				
5A6R-680-098-H2	Avance	Cónico 3 caras planas			
5R6A-680-098-H2	Retroceso				
5A6R-903-146-H1	Avance	Cónico liso	903	146	6,2
5R6A-903-146-H1	Retroceso				
5A6R-903-146-H2	Avance	Cónico 3 caras planas			
5R6A-903-146-H2	Retroceso				

El ángulo de inclinación de la herramienta se mantuvo constante en 1,5 º. Las herramientas utilizadas fueron construidas en acero tipo H13, presentando un hombro cóncavo de 12 mm de diámetro. La herramienta 1 (H1) consistió en un pin cónico liso con un diámetro mayor de 4,2 mm, un diámetro menor de 2,8 mm y una longitud de 2,8mm. La herramienta 2 (H2) se fabricó con un pin cónico facetado de tres caras de lados iguales.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Durante la soldadura por FSW se adquirieron diferentes variables de proceso utilizando una placa de adquisición de datos de 4 canales diferenciales. En primer lugar, la medición de ciclos térmicos se realizó con dos termocuplas tipo K (TC1 y TC2, respectivamente), las cuales se ubicaron en la mitad de la longitud de la probeta, en el AS. Las mismas se posicionaron a diferentes distancias de la línea de la soldadura, la TC1 entre 7 y 8 mm y la TC2 entre 11 y 12 mm, colocándose en orificios de 1 mm de diámetro y 2 mm de profundidad. En la Figura 1.a) se observa el sistema de soldadura por FSW y una probeta soldada por el mismo, mientras que en la Figura 1.b) se muestra en detalle la posición de las termocuplas (TCs) respecto a la línea central.

En segundo lugar, se midió la carga axial (F), para lo cual se empleó un *strain gage* instrumentado en la parte superior del cabezal de la máquina. Por último, la corriente de línea (IL) del motor asincrónico trifásico de la máquina de FSW se obtuvo utilizando una pinza transductora (sensibilidad de 10mV/A) y calculando el valor cuadrático medio de la señal (rms).

a) 

b) 

Figura 1: a) Soldadura por Fricción-Agitación (FSW), b) Ubicación de las Tcs para la adquisición de los ciclos térmicos durante FSW

2.3. Caracterización Macroestructural

De cada probeta soldada se extrajo un corte transversal, el cual se preparó para observación macrográfica mediante microscopía óptica. Se analizaron las distintas zonas de las uniones soldadas, en especial la zona agitada (WN), así como la presencia de discontinuidades asociadas a este proceso de soldadura. En las macrografías el lado derecho es el de avance.

2.4. Propiedades mecánicas

A fin de caracterizar el comportamiento mecánico de las uniones soldadas se realizaron ensayos de plegado de raíz sobre probetas extraídas de las uniones soldadas, según la norma ASTM E 290, con un indentador de 52 mm de diámetro. Se analizó la relación entre el comportamiento observado y las discontinuidades presentes en la zona agitada.

Sobre las probetas metalográficas se determinaron perfiles de microdureza Vickers (HV) a lo largo de la sección transversal, sobre la línea media del espesor. Dichas mediciones se realizaron empleando una carga de 500 gf. En los perfiles de microdureza el lado derecho es el lado de avance.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Finalmente, se realizaron ensayos de tracción según la norma ASTM E 8M, obteniéndose la resistencia a la tracción y el alargamiento porcentual a rotura. Se analizaron las superficies de fractura, se determinó la ubicación de la misma y se analizó su relación con la existencia de defectos. Los ensayos se realizaron a los 100 días de haberse soldado las probetas.

3. RESULTADOS Y DUSCUSIÓN

3.1. Materiales Base

En la Tabla 2 se muestra la composición química, expresados en porcentaje en peso (wt%).

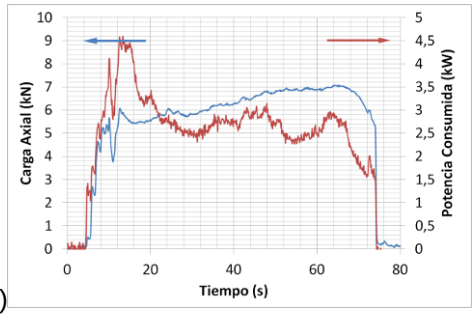
Tabla 2. Composición química de los materiales empleados (wt%)

Material	Si	Fe	Mg	Cu	Mn	Zn	Cr	Ti	Al
5083-H32	0,21	0,28	3,83	0,02	0,42	0,02	0,09	0,01	Bal.
6061-T6	0,68	0,37	1,06	0,23	0,13	0,01	0,15	0,02	Bal.

En cuanto a las propiedades mecánicas, el AA5083-H32 presentó una resistencia a la tracción de 318 MPa, un alargamiento a rotura del 16,8 %, con una dureza de 90 HV el AA6061-T6: 357 MPa, 12,8 % y 112 HV respectivamente.

3.2. Adquisición de datos

En la Figura 2 se muestran los valores de carga axial y potencia consumida en función del tiempo y los ciclos térmicos para una de las probetas soldadas (5A6R-903-146-H1). Los valores obtenidos de temperatura, carga axial y potencia consumida fueron similares para las ocho probetas soldadas, por lo que los registros mostrados son representativos de todos los casos. Nótese que el pitch fue similar para las ocho condiciones de soldadura analizadas, ya que el mismo es un indicador del calor aportado neto [1].

a) 

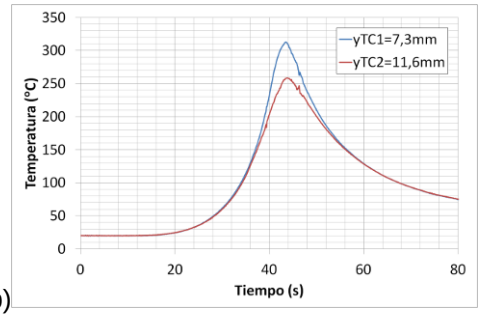
b) 

Figura 2: .Adquisición de datos para 5A6R-903-146-H1 a) Carga axial y $P_{consumida}$ b) Ciclos térmicos

En la Figura 2.a), al comienzo del proceso, durante la inserción de la herramienta, la carga axial y la potencia consumida aumentan rápidamente. Al comenzar el avance, se observa una disminución de ambos parámetros debido al ablandamiento del material causado por la generación de calor y el aumento de la temperatura [4]. Durante la soldadura, la carga aumenta hasta alcanzar un valor de 7 kN, mientras que la potencia consumida varía alrededor de 2,6 kW, al final del proceso ambos parámetros disminuyen. En la literatura se encuentran registros similares para FSW de aleaciones de aluminio [4, 5, 6]. En la Figura 2.b) se indican las posiciones efectivas de las termocuplas con respecto al centro del cordón de soldadura en la dirección transversal (yTC1 e yTC2) medidas sobre la probeta luego de realizar la unión soldada. La temperatura máxima alcanzada en las cercanías al borde del cordón de soldadura es de 310 ºC y 4 mm más alejada del cordón esta temperatura es 50 ºC menor.

3.3. Caracterización Macroestructural

En la Figura 3 se muestran las macrografías de los cortes transversales de las probetas soldadas, donde el lado derecho se corresponde con el AS.

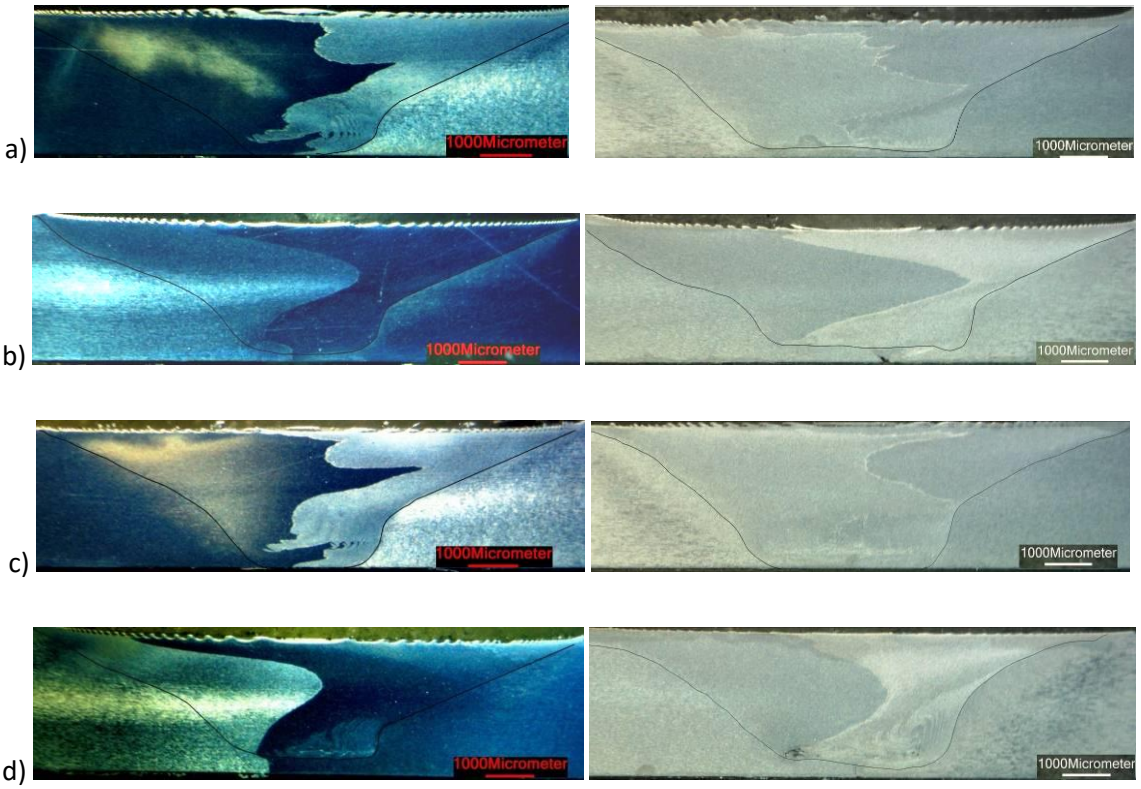


Figura 3: Macrografías de las probetas soldadas, izquierda H1, derecha H2: a) 5A6R-680-98, b) 5R6A-680-98, c) 5A6R-903-146, d) 5R6A-903-146

Puede verse claramente cómo se modifica el flujo plástico del material al variar la posición de los materiales en la junta y la herramienta utilizada. Cuando el AA5083 se encuentra en el AS,

ISBN: 978-987-1676-63-7

se tiene una mayor agitación de la interfase, produciéndose un mejor mezclado de los materiales. Por el contrario cuando el AA6061 se encuentra en el AS, dicha agitación es sensiblemente menor. También se puede observar como la WN es más ancha en las probetas de la segunda herramienta.

Se reporta en la literatura que a las temperaturas alanzadas durante la soldadura en la WN (300-450ºC) la tensión de flujo del AA6061 (50MPa) es sensiblemente menor que la del AA5083 (150MPa) [3]. Asimismo, la deformación del material en el AS debido a la cinemática del proceso es superior a la que se tiene en el RS [2]. Entonces, el AA5083 es el que controla el flujo del conjunto ya que es el de mayor tensión de flujo a la temperatura existente. Cuando este se encuentra en el AS está sometido a una mayor deformación y la temperatura puede ser algo superior [1], alcanzado entonces condiciones más propicias para su movimiento. La mayor agitación de la interfase se relaciona con una mejor dispersión de los óxidos que se encuentran en dicha zona y por lo tanto, se espera un mejor comportamiento mecánico. Por el contrario, cuando se ubica en el RS, la deformación y la temperatura es menor, viéndose dificultado su flujo plástico, generando una menor mezcla y agitación con el AA6061.

Asimismo, para las muestras con el AA6061 en el AS, se tiene una menor agitación debajo del pin de la herramienta, dando lugar a una falta de penetración. La misma podría mejorar si se incrementa el aporte térmico (aumentando la velocidad de rotación o disminuyendo la velocidad de avance), o variando la geometría de la herramienta. [1]

3.4. Propiedades mecánicas

En la Figura 4 se muestran las probetas plegadas, correspondientes a las distintas configuraciones analizadas. Asimismo, se observa un detalle de la zona de la raíz.

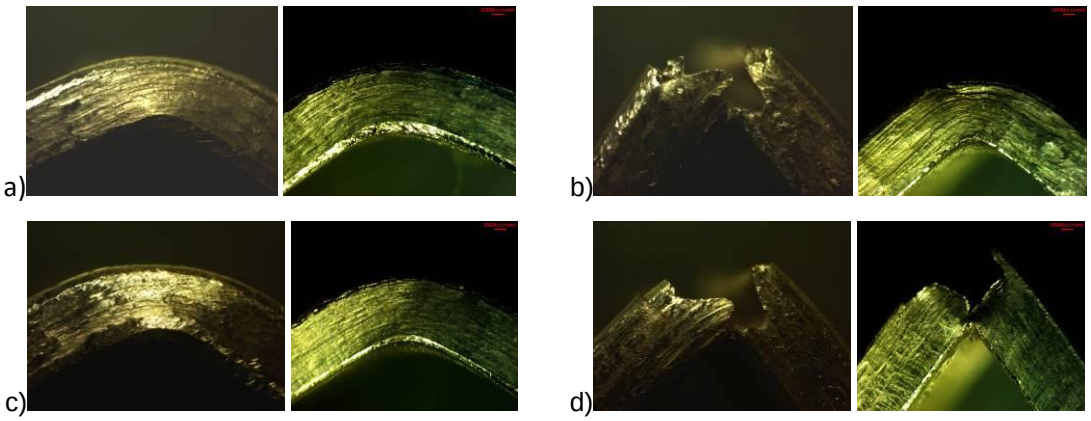


Figura 4: Probetas plegadas de las uniones soldadas H1 izquierda, H2 derecha: a) 5A6R-680-98, b) 5R6A-680-98, c) 5A6R-903-146, d) 5R6A-903-146

Las probetas que presentaron la chapa de AA5083 en el AS pudieron plegarse verificando su ductilidad con ambas herramientas. No se observaron fisuras ni defectos en la superficie. Esto está asociado al buen mezclado observado en la Figura 3 para estos casos, así como a la no existencia de falta de penetración.

Tres de las cuatro probetas que presentaron la chapa de AA6061 en el AS no pudieron plegarse, observándose una fractura que sigue principalmente la línea de la interfase entre ambos materiales (Fig. 3). La dispersión de línea de óxidos remanente para estos casos es insuficiente, produciendo un camino preferencial para el avance de la fractura y afectando drásticamente la ductilidad de la unión bajo las condiciones del ensayo. La 5R6A-680-98, correspondientes a la H2, se pudo plegar presentando una apertura parcial de raíz, pero no propagándose la fisura por la línea de óxido. Esto podría responder a que el flujo plástico es mayor con esta herramienta.

En la Figura 5 se pueden observar los perfiles de microdureza (HV) obtenidos para las distintas configuraciones en estudio. Estos perfiles son similares en ambas herramientas, por lo que se pueden considerar representativos para las posiciones de las chapas analizadas.

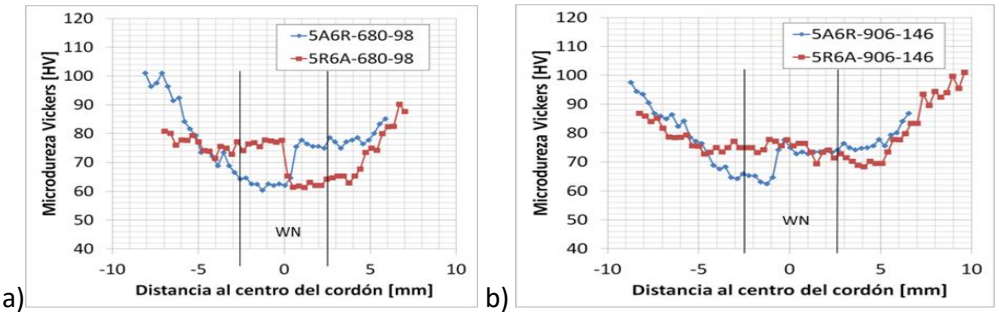


Figura 5: Perfiles de microdureza para las probetas soldadas con: a) 680 rpm y 98 mm.min-1, b) 903 rpm y 146mm.min-1

Para todos los casos, en la chapa AA5083 la microdureza disminuye hasta un 20%, lo que estaría asociado a fenómenos de recuperación y recristalización en la WN y zona afectada por el calor (HAZ) [1]. Por otra parte, en la chapa AA6061 se observa una mayor disminución de la microdureza de hasta un 45% debido a los fenómenos de disolución, re-precipitación y sobre-envejecido [3]. Esto produce en todos los casos la presencia de una zona de microdureza mínima del lado del AA6061 ubicada en general entre el WN y la HAZ.

En general, se observó que al soldar con 903 rpm, la degradación de las propiedades mecánicas del material fueron menores, alcanzando valores de microdureza mínima levemente superiores a los cordones soldados con 680 rpm, como se aprecia en la Tabla 3. Esto podría estar asociado a que el pitch para esa condición fue algo menor produciendo un aporte de calor algo inferior [1].

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este mismo sentido, se observó que con la herramienta H2 se obtuvieron valores mínimos de microdureza menores a los obtenidos con la herramienta H1 para todas las condiciones de soldadura analizadas, como se aprecia en la Tabla 3. Esto podría estar relacionado a que la herramienta H2 produce un mayor flujo plástico, como puede observarse en la Figura 3, lo cual implicaría un aumento del calor aportado por deformación plástica.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, junto con los valores de microdureza mínima medidos en cada caso. En la Figura 6 se muestran imágenes de las probetas ensayadas a tracción de las uniones soldadas.

Tabla 3. Propiedades Mecánicas de las uniones soldadas

Designación	Microdureza Mínima [HV]	Resistencia a la Tracción [MPa]	Eficiencia de Junta [%]	Alargamiento a Rotura [%]	Ubicación de la Fractura	Tipo de la Fractura
5A6R-680-98-H1	60,3	195	61,3	5,1	WN – RS	Dúctil
5R6A-680-98-H1	61,3	201	63,2	3,6	WN – Interfase	ZigZag
5A6R-903-146-H1	62,4	227	71,4	4,0	WN – RS	45º
5R6A-903-146-H1	68,3	229	72,0	4,0	HAZ – AS	45º
5A6R-680-98-H2	56,5	200	62,9	5,0	WN – RS	45° / Dúctil
5R6A-680-98-H2	51,6	190	59,8	3,7	WN – AS	45°
5A6R-903-146-H2	59,1	210	66,0	4,8	WN – RS	45°
5R6A-903-146-H2	55,7	211	66,4	3,7	HAZ – AS	45°

La eficiencia de junta de calculó a partir de la resistencia a la tracción del material base de menor resistencia, es decir, el AA5083.

En las probetas soldadas con H1, la 5A6R 680-98 presentó la menor resistencia y el mayor alargamiento, consistentemente con el menor valor de microdureza mínima y con una fractura dúctil (Figura 6a). Esto estaría asociado a un aporte térmico algo mayor que produjo una mayor degradación metalúrgica del AA6061. Para el caso de la muestra 5R6A-680-98 los valores de resistencia fueron similares, pero el alargamiento fue menor, consistentemente con una fractura que evolucionó por la línea de óxidos de la interfase (Figura 6b). Para la herramienta H2, la microdureza mínima estuvo bajo la posición 5R6A, consistente con la resistencia más baja.

Para ambas herramientas, las uniones soldadas con 903 rpm y 146 mm/mm-1 presentaron una mayor resistencia a la tracción con una eficiencia de junta mayor que las soldadas con 680 rpm y 098 mm/mm-1, consistentemente con los valores de microdureza mínima más elevados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

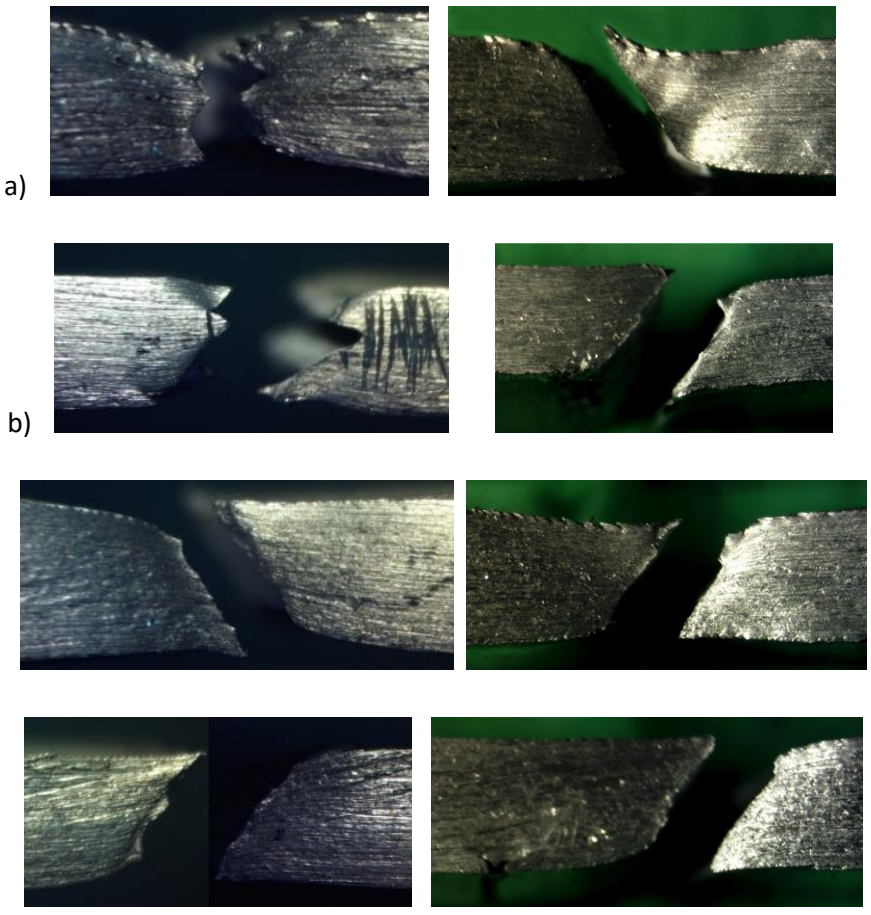


Figura 6: Superficies de fractura de las uniones soldadas. Izquierda H1, derecha H2:a) 5A6R-680-98, b) 5R6A-680-98, c) 5A6R-903-146, d) 5R6A-903-146

Asimismo, la fractura evolucionó por el lado del AA6061, observándose una condición dúctil a 45º, sin presencia de defectos asociados a la propagación (Figuras 6c y 6d).

En tracción, la presencia de los defectos que produjeron la fractura en el plegado para las probetas con el AA6061 en el AS, no fueron los que controlaron la resistencia de la junta, excepto en el caso de las probeta 5R6A-680-98. En el resto de los casos, como se observa en las superficies de fractura (Figura 6), dicha resistencia estuvo controlada por la menor dureza alcanzada en el AA6061 desplazada de la línea central de la soldadura (perfil de microdureza, Figura 5).

Se ha reportado que en uniones disímiles de aleaciones similares la velocidad de rotación tiene una mayor influencia que la velocidad de avance sobre las propiedades mecánicas [3].

4. CONCLUSIONES

En el presenta trabajo se realizaron uniones soldadas disímiles (AA50583 con AA6061) estudiándose el efecto de la geometría de dos herramientas y la posición relativa de las chapas

ISBN: 978-987-1676-63-7

sobre la evolución de las juntas soldadas. Se observó que al ubicar al AA5083 en el AS se produjo un mayor flujo plástico, aumentando el tamaño de la WN. Esto fue observado para todas las condiciones de soldadura analizadas. En este mismo sentido la herramienta H2 presenta mayor capacidad de dispersión de la línea de óxidos.

En los ensayos de plegado, al utilizar la herramienta 2 los ensayos fueron satisfactorios salvo en una condición. Al utilizar la H1 la influencia de la posición relativa de las chapas fue mayor que la de la geometría de la herramienta y que la de los parámetros de soldadura.

En los perfiles de microdureza se observó que en el AA6061 se alcanza un mínimo de dureza, el cual se ubica dentro de la WN. El AA5083 disminuye su dureza dentro del WN y la HAZ en menor que el AA6061.

Las propiedades en tracción mostraron mejores resultados para las probetas soldadas con menor pitch y la herramienta H1, independientemente de la posición de los materiales. Para estos casos la fractura no estuvo asociada con la presencia de la línea de óxidos, sino que se la relacionó con la zona de mínima dureza (AA6061).

5. REFERENCIAS

[1] Mishra R., Mahoney M. *Friction Stir Welding and Processing. 1.ed*. Ohio, ASM International, 2007.

[2] Kumar N., Yuan W., Mishra R. *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials. 1.ed*. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2015.

[3] Steuwer A., Peel M., Withers P. *Dissimilar friction stir welds in AA5083–AA6082: The effect of process parameters on residual stress*. Materials Sciense Engineering A, 441, 187-196, 2006.

[4] Kumar R., Singh K., Pandey S. *Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22, 288-298, 2012.

[5] Trimble D., Monaghan J., O'donnell G. *Force generation during friction stir welding of AA2024-T3*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61, 9-12, 2012.

[6] Su H., Wu C., Pittner A., Rethmeier M. *Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding*. Journal of Manufacturing Processes, 15, p.495-500, 2013.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad de Buenos Aires por el financiamiento y a INTI-Mecánica por la utilización de sus instalaciones para el desarrollo del presente trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANÁLISIS DE DEFECTOS POR SOLIDIFICACIÓN EN UNA PIEZA FUNDIDA DE ALUMINIO, EMPLEANDO RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

D. Perez[1,2], G. Abate[1,2], D. Martinez Krahmer[1,2], Martin Cagnoli[3], Gabriel Tamarit[4]

[1] Unidad Técnica Máquinas y Herramientas, INTI-Mecánica

Av. Gral. Paz 5445, Buenos Aires, Argentina
Correo-e: mkrahmer@inti.gob.ar
[2] Cátedra Tecnología Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora
[3] Unidad Técnica Ensayos No Destructivos, INTI-Mecánica
[4] SOME S.R.L, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

El consumo de productos fundidos de aluminio ha ido creciendo durante los últimos años. La evolución del sector automotriz, que se erige como uno de sus principales usuarios, a través del concepto del diseño ligero, conlleva al reemplazo de piezas de fundición de hierro y/o acero, por materiales de menor densidad. El aluminio es uno de ellos, ya que permite combinar esta característica, con buenos valores de resistencia mecánica, elevada resistencia a la corrosión y capacidad de ser reciclado, sin pérdida de sus propiedades originales.

Ahora bien, dado a que el volumen especifico de la mayoría de los metales fundidos es mayor en estado liquido que en estado sólido, estos contraen al solidificar, produciendo defectos (huecos) como rechupes, porosidades o depresiones superficiales entre otros, situaciones que merecen ser estudiadas, para alcanzar la obtención de piezas de buena calidad.

En tal sentido, la simulación computacional es una de las herramientas de mayor trascendencia, tanto para el diseño de piezas nuevas, como para la mejora de procesos ya existentes.

En el presente trabajo se ha reproducido el proceso de fundición en coquilla metálica de una carcasa de alternador de aluminio que presentaba defectos de solidificación. Primeramente se efectuó la ingeniería inversa del proceso original, validando los resultados prácticos. Seguidamente se evaluaron diferentes alternativas de mejora. Con la primera, a través de la modificación geométrica de la matriz, fue posible variar el orden de solidificación, permaneciendo la mazarota más tiempo en estado líquido, y reduciendo así el tamaño de los huecos. Otra posibilidad resultaría de cambiar el material. En este caso, los resultados serían más favorables aún. Finalmente, la presencia de rechupes podría casi ser eliminada, al combinar el cambio de geometría de la matriz con el del material.

Palabras Claves: Fundición aluminio, simulación numérica, radiografía, defecto.

Área Temática: Fabricación

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas fundidoras de piezas de aluminio coladas por gravedad en matriz metálica, dada la habitual inestabilidad de los procesos de fundición [4-5] , suelen convivir con porcentajes de rechazo de piezas promedio del orden del 15%, pudiendo modificarse este valor, según sea la complejidad geométrica de la parte a fundir.

Una forma racional de afrontar esta situación y reducir el porcentaje señalado a modo de referencia, es mediante la utilización de herramientas de simulación, las cuales permiten hacer modificaciones en la etapa de diseño, tanto de la pieza como del proceso, y también manipular las diversas variables que influyen sobre este último. En este sentido, se han realizado estudios sobre llenado de matrices y el orden de solidificación del líquido en procesos de fundición por baja presión, a través de programas de simulación numérica como el ViewCast, con el objetivo de predecir la aparición de juntas frías y/o atrapamiento de gases [6]. Al mismo tiempo, estos trabajos de modelado permiten predecir la formación de defectos por contracción en geometrías tridimensionales complejas de diversas aleaciones de AlSi en función de sus tiempos de solidificación y características del material [7].

Si bien es cierto que, el aluminio posee la capacidad de ser refundido, para este fin se requiere un consumo de energía extra, y como consecuencia directa de ello, una disminución en los niveles de productividad. Para peor aún, en muchos casos, los defectos recién se ponen en evidencia en la última etapa de mecanizado, cuando ya se le ha agregado todo el valor a la pieza. Acompañado por una tendencia creciente a nivel mundial en la producción de fundición de aluminio, del 16% entre 2012 y 2014 [8-9], se recurre a la simulación computacional como una herramienta para optimizar los procesos y el diseño de las piezas fundidas.

Para ello, el INTI cuenta con una herramienta de simulación de procesos de fundición llamada QuikCAST, con capacidad de reproducir diversos procesos de fundición, entre ellos el colado bajo gravedad en molde metálico, como es el caso de la pieza en estudio.

2. Procedimiento experimental:

En primera instancia se relevó el proceso productivo de la pieza en análisis, tratándose de una fundición por gravedad en coquilla metálica, con lotes de producción variables. El material de colada, que corresponde a una aleación AlSi13, posee una composición química como la detallada en la siguiente tabla:

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1: Composición Química

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Sn	otros	Al
10 a 14%	0.3 a 0.9%	0.01 a 0.2%	0.2 a 0.5%	Menor a 0.1%	Menor a 0.3%	Menor a 0.1%	0.01 a 0.2%	< 0.09%	< 0.15%	Balance

Las condiciones de colada promedio utilizadas por la fundidora fueron:

- Temperatura de colada: 920°C
- Tiempo de llenado: 4 s
- Temperatura precalentamiento de la matriz: 250°C
- Material de la matriz: fundición gris
- Dimensiones máximas de la matriz: 310 mm x 390 mm

El peso de la pieza mecanizada resultó de 378 g, mientras que el peso de la pieza fundida, con canal de colada y mazarota incluidas fue de 755 g (rendimiento = 50%).

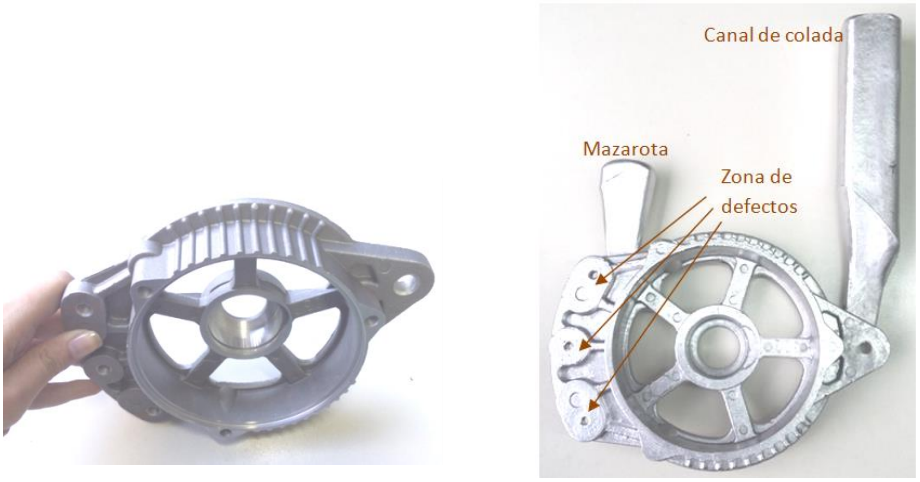


Figura 1: Pieza mecanizada (izquierda), y pieza fundida con canal de colada y mazarota

Posteriormente se realizaron una serie de radiografías, tanto sobre una pieza terminada (mecanizada), que presentaba rechupes significativos en el interior de tres agujeros roscados (ver figura 1), así como también en carcasas fundidas sin mecanizar, presentando similitud en los resultados y evidenciando la presencia de defectos internos, tal como pueden apreciarse en la siguiente imagen:

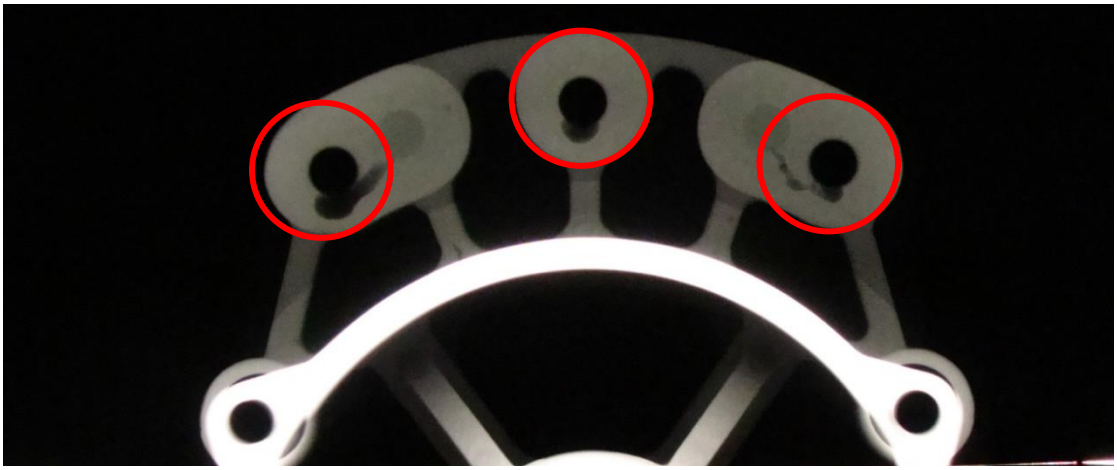


Figura 2: Radiografía de la pieza mecanizada con evidencia de los defectos internos

Luego de realizado el relevamiento geométrico-dimensional de la pieza con canal de alimentación y mazarota, se efectuó el modelado CAD 3D, con la finalidad de poder realizar una primera simulación numérica que reprodujera el proceso original.

Las condiciones de contorno de la simulación se basaron en los parámetros reales de fabricación, La temperatura de colada fue de 920ºC, mientras el llenado se completó en 6s, con una velocidad de ingreso del líquido de 0,25 m/s. El material utilizado fue AlSi13, perteneciente a la librería del software, el tamaño de malla seleccionado fue de 1,7 mm, considerando una temperatura ambiente de 30ºC y un precalentamiento del molde de 300ºC.

Una vez obtenida la primera simulación garantizando el llenado de la pieza en estado liquido, se obtuvo una imagen de la evolución de su enfriamiento (Figura 3, derecha). Allí se observa que, la mazarota solidifica de forma prematura respecto a la zona de mayor volumen ubicada inmediatamente debajo de ella. Esto se debe a que la sección de unión entre la mazarota y la pieza es de un espesor reducido (4 mm), aislando la zona que debe ser alimentada (sección donde aparecen los defectos). Al mismo tiempo, se obtuvo una imagen que predice la porosidad (Figura 3 izquierda), resultando coincidente con las radiografías efectuadas previamente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

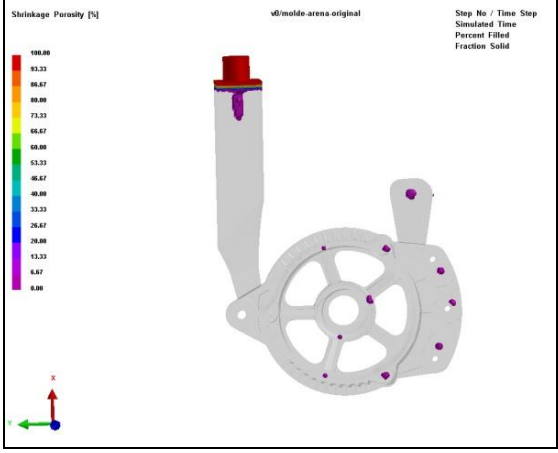
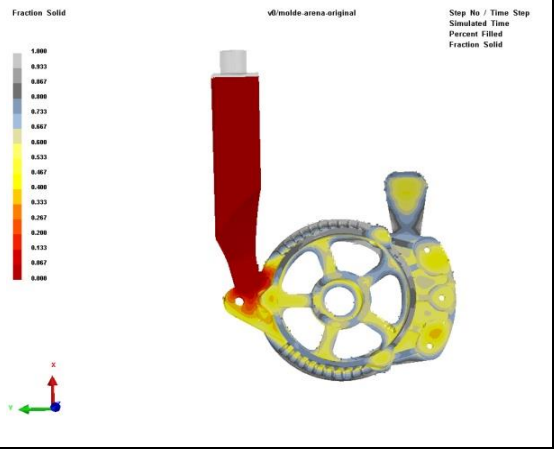
Porosidad por contracción	Fracción Sólida
	

Figura 3: Simulación del proceso original

2.1 Primer propuesta de mejora:

Con la finalidad de reducir los huecos, se propuso una primera modificación muy simple, dadas las restricciones existentes (la matriz ya estaba construida). La misma consistió en la ampliación del tamaño de la base de la mazarota, aumentando del espesor de la sección conectada con la pieza. En la figura 4 se pueden observar la configuración original de la mazarota, así como la modificación propuesta.

De esta forma, el espesor original de la mazarota donde se conecta con la pieza de 4 mm, se amplió a 8 mm. Esto produjo un incremento de peso del 9,5% en el producto obtenido de fundición, (pieza, canal de colada y mazarota), que originalmente era de 755 g, y con la modificación alcanzó 827 g.

Mazarota original	Mazarota modificada
	

Figura 4: Primera propuesta, modificación de mazarota

La simulación del caso modificado, manteniendo constante las condiciones de colada utilizadas previamente, mostraron una mejora parcial, donde la mazarota permanece en estado liquido mayor cantidad de tiempo.

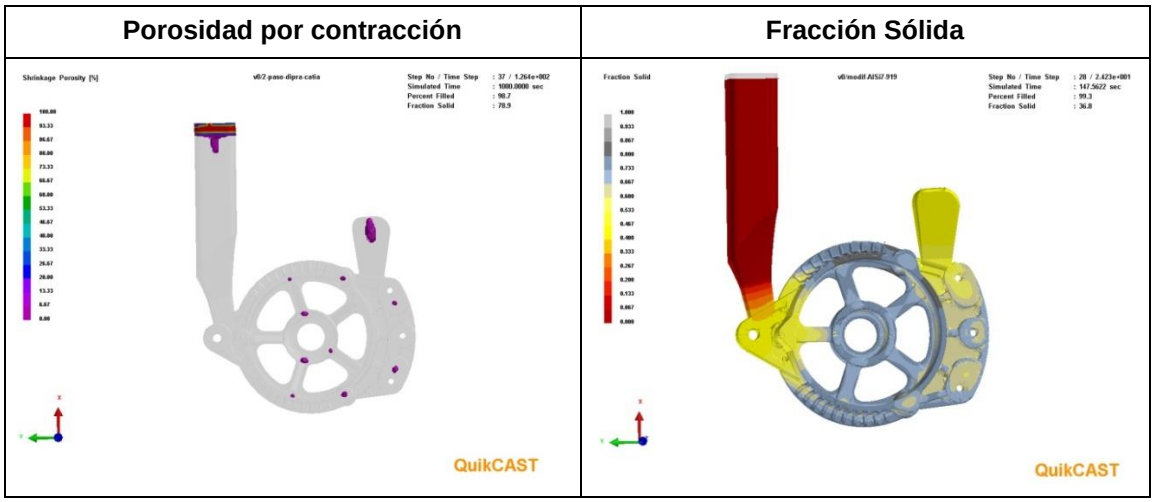


Figura 5: Simulación con modificación de mazarota

Las nuevas imágenes radiográficas obtenidas sobre las piezas coladas modificadas, permiten validar nuevamente la simulación al mostrar una modificación en el tamaño y ubicación de los defectos respecto a los radiografiados en la pieza original, tal como se ve en la Figura 5 ubicada a la izquierda. Sin embargo, la predicción de porosidad sigue mostrando aún la existencia de un número considerable de huecos.

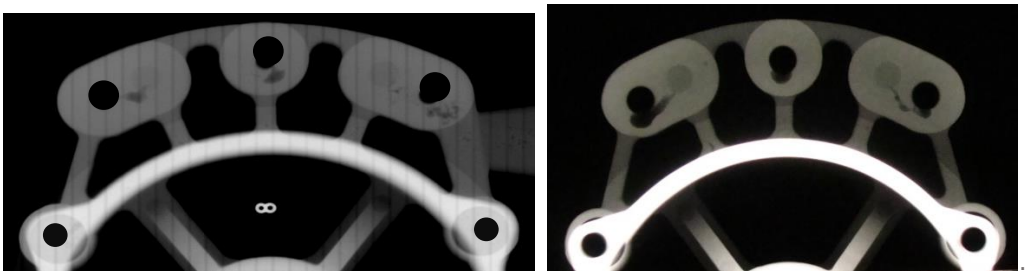


Figura 5: Radiografía pieza modificada (izquierda), pieza original (derecha)

2.2 Segunda propuesta de mejora:

Luego de realizada una revisión bibliográfica sobre los materiales utilizados para los procesos de fundición por gravedad de aluminio, se observó que, lo recomendable, según la velocidad de enfriamiento, fluidez y relación con el eutéctico, para procesos con molde permanente, es emplear aleaciones con porcentajes de Si entre 7% y 9%, mientras que para procesos de mayor velocidad

de enfriamiento, como ocurre con la fundición a presión se recomiendan cantidades entre 8% y 12% [10]. Por esta razón, se probó una segunda modificación, cambiando el material originalmente utilizado, por uno con menor porcentaje de Silicio. El efecto resultante observando el diagrama de fases de la aleación mencionada, es que, con menor porcentaje de silicio, durante el enfriamiento, el material permanece más tiempo en estado pastoso [11], y de esa manera, es posible alimentar los huecos durante más tiempo.

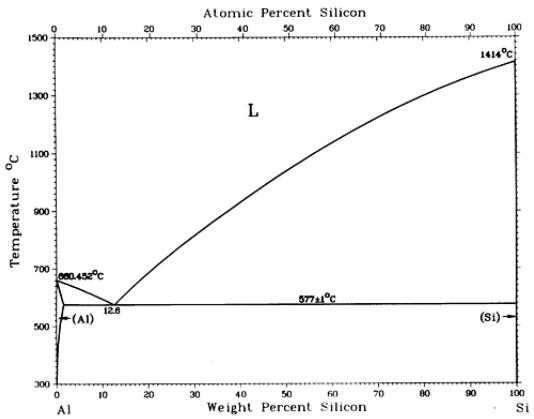


Figura 6: Diagrama binario AlSi (Fuente: Metals Handbook, Volume 03)

A partir del diagrama de la figura 6 es posible obtener los gradientes de temperatura para cada composición - un gradiente pequeño para el caso del AlSi13 (Tliq= 570ºC, Tsol= 572ºC) y más prolongado para el AlSi7Mg (Tliq 548ºC, Tsol 613ºC) - , que justifican el concepto anterior.

Seguidamente, se adjuntan los mapas de temperatura del líquido en el interior del molde, resultantes de la simulación, un instante posterior de haber completado el llenado (Figura 7). Allí puede observarse que, en el caso de la aleación propuesta, es mayor el gradiente de temperaturas dentro de la pieza, y que en el contorno de los agujeros a ser roscados, se encuentra más próximo al estado pastoso. En el caso de la aleación AlSi13, la temperatura en la zona citada de los agujeros es más elevada, acompañado de una Tliq 23ºC superior respecto de la aleación modificada. Por ello, se produce un aislamiento de la sección de defectos tras solidificar rápidamente aquellas zonas de menor espesor que la rodean.

ISBN: 978-987-1676-63-7

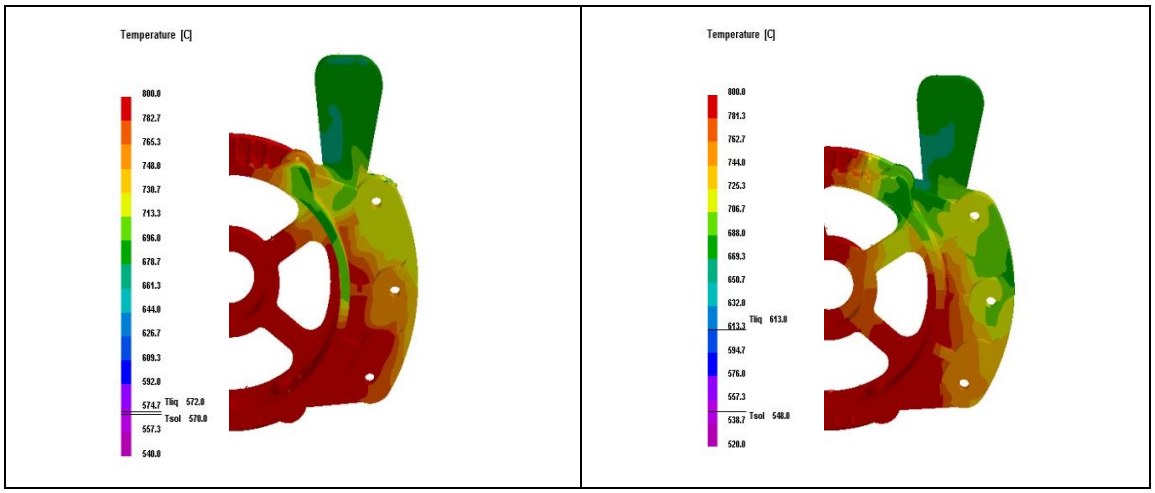


Figura 7: Mapa de temperatura, AlSi13 (izquierda) y AlSi7Mg (derecha)

Del resultado de esta simulación, considerando las dimensiones originales de la pieza - matriz, y modificando el material de colada por un AlSi7Mg, presente en la librería del software, se puede visualizar que (ver figura 8), si bien la mazarota solidifica previamente a la zona de defectos, la predicción de la porosidad es menor; e incluso se evidencia un cambio en la geometría de los rechupes, siendo más dispersos.

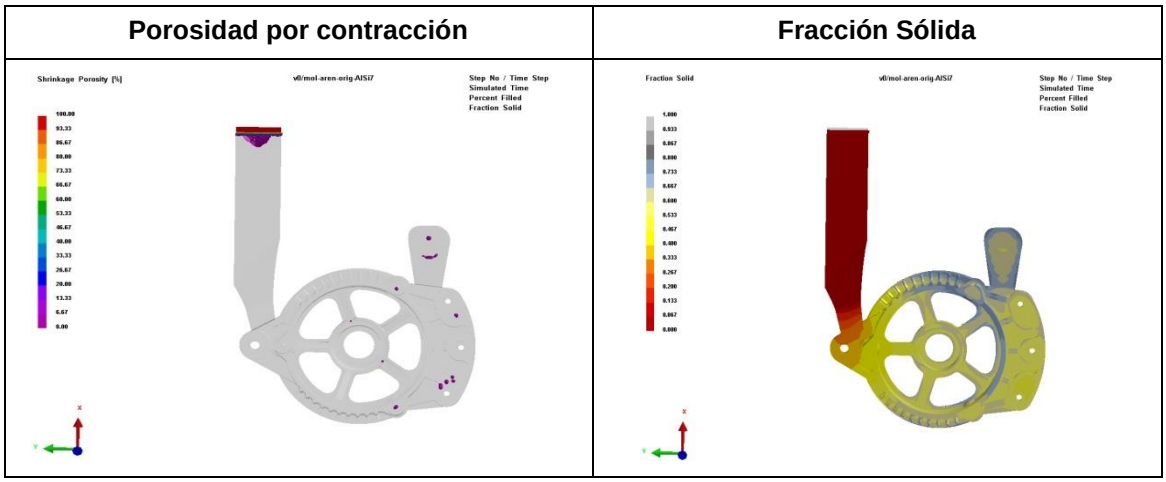


Figura 8: Simulación con modificación del material

2.3 Tercer propuesta de mejora:

Se decidió realizar una tercera simulación, combinando una correcta funcionalidad de la mazarota, visualizada en la primera propuesta, con un material que sería más adecuado para el tipo de proceso productivo analizado, planteado en la segunda propuesta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Asimismo, se mantuvieron constantes las demás condiciones de simulación utilizadas previamente, y se obtuvieron los siguientes resultados:

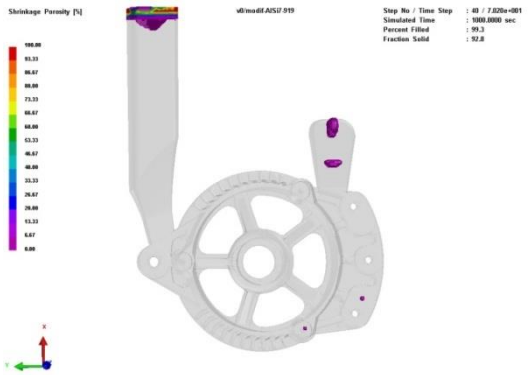
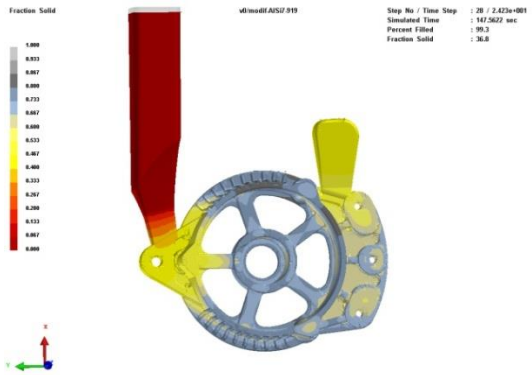
Porosidad por contracción	Fracción Sólida
	

Figura 9: Imágenes obtenidas por simulación, modificación del material y mazarota

En este caso es posible visualizar una reducción notable en la predicción de porosidad por contracción y una mejora en la posición del defecto, lo que resultaría aceptable ya que la pieza en estudio no es sometida a elevados esfuerzos durante su funcionamiento.

Finalmente, al comparar las imágenes de las Figuras 8 y 9, es factible determinar la efectiva función que cumple la mazarota, ya que en ambos casos el material utilizado para la simulación no varía y se obtiene como resultado una disminución en la cantidad de rechupes predichos (última imagen izquierda), situación que se alcanzaría haciendo permanecer a la misma, una mayor cantidad de tiempo en estado liquido.

3. Discusiones:

Entonces, de acuerdo con los resultados obtenidos podemos afirmar que:

- El aluminio, como todo material de carácter contractivo al solidificar, genera rechupes internos en las piezas. Modificando parámetros del proceso, sería posible reducirlos o eliminarlos.
- Con la ampliación del espesor de la mazarota, se lograría retardar su enfriamiento y abastecer de líquido a la zona de mayor contracción de volumen, reduciendo levemente el tamaño de los rechupes y modificando su ubicación. Esto se logra con un incremento del 9,5% en peso, respecto de la pieza original.

ISBN: 978-987-1676-63-7

- La modificación del material, por uno de menor porcentaje de Silicio, característico de aquellos usados en procesos de fundición en molde metálico colando por gravedad, muestra los mejores resultados en cuanto a la reducción de los rechupes, además de producir un alejamiento significativo de los huecos de las proximidades a los agujeros roscados, donde se hallaban los defectos originales.
- La simulación prevé que la combinación del rediseño geométrico de la mazarota en conjunto con la modificación del material original AlSI13 por un AlSi7Mg permitiría obtener piezas de buena calidad, reduciendo casi en su totalidad la aparición de rechupes.

4. Conclusiones:

En los procesos de simulación numérica, resulta de vital importancia considerar las condiciones de contorno y realizar una etapa de validación a través de mediciones físicas. Al mismo tiempo, proporcionan como resultados tendencias precisas de la calidad final del producto, siendo una herramienta muy efectiva para el diseño de nuevas piezas o modificaciones en piezas ya existentes, evitando la metodología de prueba y error y sus costos asociados, tanto en materia prima como en tiempo productivo.

En este trabajo se ha utilizado el software QuikCAST para simular el proceso de fundición de una carcasa de aluminio que presentaba defectos internos, obteniendo mapas de temperatura, fracción sólida y predicción de porosidad en cada caso propuesto. A través de la simulación se logró reproducir la ubicación de los defectos, lo cual fue validado mediante ensayos de radiografía industrial sobre la pieza terminada y fundida. Posteriormente se propusieron dos modificaciones, una sobre la geometría de la mazarota, y otra sobre el material de colada. En primera instancia se consideró su efecto en forma separada y finalmente de modo conjunto.

5. REFERENCIAS

[1], S. Samavedam and S. Sundarrajan , Al-Si and Al-Si-Mg Cast Alloys Shrinkage Porosity Estimation, archives of foundry engineering Volume 16, Issue 1/2016, 61-68, (2015).

[2]A. Louvo and M. Sirviö VTT, Use of Simulated Porosity for Avoidance of Casting Defects. Manufacturing Technology, Finland Presented at World Foundry Conference in Düsseldorf, Germany, (1994).

[3] S. Santhi and others, Shrinkage Porosity Estimation of Cylindrical Shape Cast Aluminium Alloys, Indian Foundry Journal, Vol 60, (2014).

[4] Adolfo y Eduardo Baudo, Manejo práctico de la fundición, Colombatti Offset, Villa María, Córdoba, Argentina (2006).

[5] N. Rizzo Downes, Fundición nodular de alto rendimiento, Cuadernillo Tecnológico N°9, INTI-Unión Europea (2014).

[6] Mi Guofa and others, Numerical simulation of low pressure die-casting aluminum wheel, China Foundry, Vol 6 Nro 1 (2008)

[7] A. Reisa and others , Modelling feeding flow related shrinkage defects in aluminum castings, Journal of Manufacturing Processes, 14, 1-7, (2012).

[8] "47th Census of World Casting Production" (2012)

[9] "49th Census of World Casting Production" (2014)

[10] Metals Handbook, Volume 15 Casting, ASM International (1998).

[11] Metals Handbook, Volume 03, Alloy Phase Diagrams, ASM International (1998)

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

UTILIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN EMPRESAS INDUSTRIALES DE ARGENTINA, ESTUDIO DE CASOS

Oscar Ramírez, Jorge Nicolini, Marcelo Fernández, Néstor Braidot y Claudio Abrevaya

Instituto de Industria – Universidad Nacional de General Sarmiento
J. M. Gutiérrez 1150, Los Polvorines, Buenos Aires, Argentina
correo-e: oramirez@ungs.edu.ar

RESUMEN

Desde la aparición de las tecnologías de fabricación aditivas, se evidenció un fuerte impacto en su utilización en las distintas etapas del desarrollo de productos.

A medida que estas tecnologías fueron evolucionando, también comenzaron a utilizarse en la fabricación de pequeños lotes de productos, reemplazando en algunos casos a los métodos de fabricación tradicionales como los sustractivos y conformativos.

Las tecnologías de fabricación aditiva empiezan a implementarse muy gradualmente en Argentina a partir del año 2000, especialmente para la elaboración de prototipos y maquetas en las etapas de diseño.

El uso de estas nuevas tecnologías acompañan las necesidades actuales de las empresas de disminuir el ciclo de desarrollo y fabricación de productos. Estos cambios responden a los requerimientos de los usuarios, teniendo en cuenta los conceptos productivos conocidos como "producción personalizada" y "personalización", que por otra parte implican ciclos de vida de productos cada vez más cortos.

Este trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de una investigación que estudió la incorporación de tecnologías de fabricación aditivas, en las etapas de diseño y fabricación de productos en empresas industriales en el ámbito nacional.

Palabras Claves: *Desarrollo de Productos, Fabricación Aditiva, Impresión 3D.*

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de fabricación aditiva empiezan a implementarse muy gradualmente en Argentina a partir del año 2000, especialmente para la elaboración de prototipos y maquetas en las etapas de diseño. Estas técnicas comienzan a utilizarse en mayor medida en los últimos años, favorecidas por la aparición de tecnologías de impresión 3D más económicas, en especial las de código abierto, desarrolladas a partir del año 2005, a través del proyecto RepRap creado por Adrián Bowyer de la Universidad de Bath en Inglaterra. Esta iniciativa cuenta con el apoyo de una comunidad formada por aficionados, profesionales y empresas de distintos países, generando un ambiente colaborativo donde se va enriqueciendo el conocimiento compartido a través de la web.

La tecnología de fabricación aditiva utilizada en estas impresoras de bajo costo es la Fabricación por Filamento Fundido FFF (Fused Filament Fabrication). FFF es equivalente a la tecnología Modelado por Deposición Fundida FDM, pero debido a que la terminología Fused Deposition Modeling y la abreviatura FDM son marcas registradas por Stratasys Inc., los miembros del proyecto RepRap crearon el término FFF (Fused Filament Fabrication) para evitar problemas legales. Los materiales más utilizados por estos dispositivos son ABS y PLA.

La tecnología de fabricación aditiva como cualquier nueva tecnología requiere de conocimientos para su implementación y desarrollo como así también de la infraestructura adecuada como centros de servicio técnico y de firmas proveedoras de los materiales para la operación de los equipos. Una impresora 3D constituye un sistema mecatrónico o sea un dispositivo que realiza un patrón de movimiento continuo durante la impresión a través de motores paso a paso y otros componentes y emplea materiales (insumos) especialmente fabricados para la impresión [1].

A nivel mundial las tecnologías de impresión 3D no sólo se están utilizando para la realización de prototipos y maquetas, sino también en la fabricación de pequeños lotes de productos, reemplazando en ocasiones a los métodos de fabricación tradicionales como los sustractivos y conformativos [2]. El uso de estas nuevas tecnologías acompañan las necesidades actuales de las empresas de disminuir el ciclo de desarrollo y fabricación de productos. Estos cambios responden a los requerimientos de los usuarios, teniendo en cuenta los conceptos productivos conocidos como "producción personalizada" y "personalización", que por otra parte implican ciclos de vida de productos cada vez más cortos.

La etapa de personalización se encuentra en pleno desarrollo, el consumidor pasa de ser un destinatario pasivo de la industria a tener una amplia interacción en la fase del diseño, prevaleciendo en esta etapa una posición netamente activa, requiriendo productos que le permitan expresar su propia identidad.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Esta también llamada “nueva revolución industrial” [2] modifica la cadena de valor tornándola más compleja y llevando a una mayor fragmentación de las actividades productivas.

Con las distintas técnicas de impresión 3D se pueden fabricar objetos rentables a partir de diseños realizados en CAD para lotes pequeños, sirviendo estas tecnologías a la personalización de productos [3].

2. ESTUDIO DE CASOS DE LA INDUSTRIA NACIONAL

En este apartado describimos los casos estudiados en el ámbito de la industria local en cuanto a la forma en que impacta la implementación de tecnologías de fabricación aditiva.

Para este estudio se seleccionaron empresas dedicadas al desarrollo y fabricación de productos que han implementado tecnologías de fabricación 3D. En este sentido se consideraron a aquellas empresas que disponen de conocimientos técnicos y modos de producción organizada, interacción con el cliente, y cierta estructura organizacional para desarrollar sus actividades.

2.1. Empresa 1

Empresa dedicada a la fabricación de avíos y accesorios metálicos.

Utiliza dos variantes en la implementación del sistema de impresión 3D, estas surgen a partir de:

Ideas del cliente: El cliente provee un plano, dibujo, foto o producto de la competencia, a partir de esto la empresa brinda el servicio de definir el diseño final, realizando en primera instancia un dibujo en Solidworks y luego generando un modelo 3D, realizado con una impresora de tecnología FDM de bajo costo (marca Kikai). Originalmente el proceso de diseño constaba sólo de la realización de dibujos y planos, se limitaba el diseño a las dos dimensiones y sólo en algunas ocasiones se realizaban modelos tallados artesanalmente.

A través de este proceso se obtienen los insumos para definir los productos solicitados por los clientes, siendo estos, apliques para carteras, hebillas para cinturones, entre otros.

Iniciativas propias: A partir de oportunidades detectadas, en general en el mercado externo, se realiza un rediseño adaptativo al mercado interno en base a los gustos y costumbres locales. Se confeccionan los modelos en impresión 3D y se evalúan en los distintos sectores del proceso productivo y de diseño hasta la aprobación del proyecto. Luego se lanza la etapa de confección de los herramentales necesarios para comenzar la fabricación.

Se obtienen productos propios como destapadores, adornos, entre otros.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las ventajas obtenidas luego de la implementar fabricación aditiva fueron la disminución de los tiempos de desarrollo y brindar un nuevo servicio a los clientes, ya que se realiza el proceso de diseño final, que consta del dibujo 3D en Solidworks del futuro producto y la impresión 3D del modelo final, reduciendo la incertidumbre de cómo va a ser el producto terminado y permitiendo hacer las correcciones necesarias en base a las preferencias del cliente.

2.2. Empresa 2

Es el caso de una empresa dedicada a la fabricación y comercialización de grifería en una amplia gama de productos destinados al baño, la cocina y las instalaciones sanitarias.

Esta empresa comienza a utilizar tecnologías de impresión 3D en el año 2008 con la incorporación de una impresora a base de polvo (Zcorp). Con esta tecnología realizaban prototipos para las primeras etapas del diseño, permitiendo visualizar el aspecto del futuro producto y la interacción de las múltiples piezas que lo componen, sin llegar a realizar pruebas funcionales.

Por otra parte utilizaban la técnica de fabricación rápida de moldes (rapid tooling) confeccionando moldes únicos a través de la técnica de “direct tooling”, la impresora 3D genera directamente el molde, en este caso este podía utilizarse una sola vez. Con esta técnica se fundían prototipos con materiales finales, lo que permitía realizar pruebas en condiciones reales de uso.

En 2009 incorporan una impresora del tipo FDM marca Stratasys Modelo SST 1200 Fortus. Esta tecnología les permitió mejorar la terminación de las impresiones y realizarlas en ABS.

A partir de la adopción de esta tecnología, la utilización de la fabricación aditiva toma las siguientes variantes que se detallan a continuación.

En el caso de la confección de prototipos, al tratarse de las primeras pruebas de aspecto y si a estos no es necesario someterlos a ensayos o pruebas en su condición de uso final, se realizan directamente en impresión 3D.

Por otra parte, si al prototipo es necesario someterlo a pruebas funcionales en las que se lo debe someter a presión de fluidos, en lugar de utilizar la técnica de “direct tooling” (como se procedía con la tecnología anterior), se pasa a confeccionar el modelo positivo del diseño en impresión 3D, utilizándolo para realizar el molde en arena (técnica de “indirect tooling”) con el que se funden los primeros prototipos con los materiales finales, para luego ser sometidos a los ensayos en condiciones reales.

También podemos describir una serie de casos particulares:

Impresión de moldes para realizar prototipos. En un producto específico “diafragma de ducha” cuyo material final es goma y el ABS (material con el que se imprime) no permitía representar sus

características mecánicas, debido a esto se resolvió realizar el molde impreso (direct tooling) y a partir de este confeccionar el prototipo en silicona, se probaron distintas siliconas hasta encontrar una variante que otorgaba propiedades mecánicas similares a la del producto final, pudiéndose realizar las pruebas necesarias para confirmar el diseño.

Impresión de moldes para realizar piezas finales. Producto: "junta para ducha". Para el caso de esta junta de ducha, en la que se requerían lotes mínimos, también se utilizó la técnica de "direct tooling", imprimiéndose el molde y colando la pieza final en silicona. La silicona utilizada en este caso le otorgaba las propiedades necesarias requeridas por el diseño para ser utilizada como producto final.

Pieza final fabricada con impresión 3D: Producto: "elemento de sujeción". Dentro de un conjunto de un sistema de sensor electrónico, se necesitaba realizar un elemento de sujeción que imprimiéndolo en ABS cumplía con los requisitos para el producto final. De esta forma se evitó tener que realizar la matricería, con el ahorro de costos y tiempo asociados.

Otra variante de utilización es la realización de dispositivos para realizar montajes, específicamente: dispositivos para centrado y camas para posicionar y realizar logotipeados.

La principal ventaja obtenida con la implementación de tecnologías de impresión 3D fue la reducción de los tiempos de la etapa de diseño de 9 a 6 meses para un producto estándar.

2.3. Empresa 3

Empresa dedicada al diseño y fabricación de sistemas tecnológicos complejos con más de treinta años de trayectoria en el mercado nacional, desarrolla tecnología de avanzada en diferentes campos de la industria, la ciencia y la investigación aplicada.

Utilizan tecnología de impresión 3D del tipo FDM.

En el diseño de un satélite, se realizan prototipos impresos en 3D para realizar comprobaciones dimensionales, por ejemplo para verificar que los cableados puedan realizarse sin sufrir interferencias. Impresión del prototipo de la pieza que sujeta las mantas térmicas, para comprobar que el diseño sea el correcto. En el caso de una pieza de sujeción se realiza la pieza final en impresión 3D en ABS, pues los requerimientos permitían utilizar ese material como materia prima.

En el diseño de radares primarios, se imprime básicamente maquetería para realizar comprobaciones dimensionales y posibles interferencias.

En el caso del diseño de un avión no tripulado, se realizaran varias piezas finales en ABS, el soporte del tanque de combustible, la carcasa de una cámara para tomar fotos y videos y la cola del avión.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.4. Empresa 4

Se trata de una compañía global dedicada a investigar, desarrollar, manufacturar y comercializar tecnologías diversificadas, ofreciendo productos y servicios en diversas áreas tales como equipamiento industrial y productos varios. Sus productos tienen posiciones de liderazgo en los diversos mercados donde está presente: artículos de oficina, imagen gráfica, industria electrónica, servicios públicos y comunicaciones, salud, medicina, industria, seguridad personal, seguridad vial y transporte.

A partir del año 2013, el sector de desarrollo de productos incorpora una impresora 3D del tipo FDM, con la que realizan utilizando como materia prima PLA, prototipos en las distintas fases del diseño. Entre otros productos diseñaron un casco y anteojos de seguridad.

En el 2015 se adquieren una impresora 3D de tecnología Polijet, modelo Objet, con la posibilidad de utilizar distintos tipos de materia prima, en base a las necesidades del prototipo a desarrollar. También cuentan con un escáner 3D marca Roland y el software NX para realizar los modelados en 3D. En ocasiones realizan la tercerización de las tareas de modelado fuera de la empresa, dedicándose en esos casos a realizar los detalles finales de diseño.

Este tipo de impresora trabaja con soportes en distinto material al del prototipo, siendo luego removidos simplemente con agua.

En principio esta empresa utiliza solamente la impresión 3D para la realización de prototipos. Últimamente realizaron distintos tipos de desarrollos de nuevos productos en el rubro artículos de limpieza.

Por el momento se dedican a confeccionar en forma excepcional piezas finales sólo si tienen alguna necesidad interna, como reemplazar algún repuesto de un equipo, con la posibilidad de realizar incluso algún rediseño o mejora en dicho elemento.

2.5. Empresa 5

Empresa dedicada al desarrollo y producción de sistemas para la conducción de agua, desagües, calefacción y gas.

La empresa desde fines de 2013 utiliza una impresora 3D, marca Makerbot del tipo FDM, utiliza como material de aporte ABS y trabaja bajo atmosfera controlada lo que permite una buena calidad de terminación de piezas. Utilizan la tecnología de impresión 3D para diseñar nuevos productos y trabajar sobre rediseños de productos existentes.

También realizan en impresión 3D el diseño de dispositivos para facilitar el montaje en el proceso productivo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la etapa de desarrollo se realizan prototipos 3D para facilitar la evolución del diseño, estos prototipos son analizados visualmente y son sometidos a pruebas hasta llegar a una etapa final de evolución donde se realizan ya en los materiales definitivos.

Antes de contar con la impresora 3D los prototipos los realizaban especialistas en maquetería de forma artesanal (no era tarea fácil conseguir disponibilidad de estos especialistas), lo cual implicaba costos mucho más altos y mayores tiempos hasta contar con el prototipo. Por otra parte una vez que era recibido el prototipo, este ya estaba superado por los cambios ya realizados al diseño. Con el nuevo sistema, hoy cuentan con prototipos actualizados a la última versión del diseño.

Los desarrollos inicialmente son sometidos a simuladaciones en PC y en general las pruebas suelen confirmar los cálculos previamente realizados. Igualmente se destaca la posibilidad de corregir tempranamente defectos de diseño a través de la prueba sobre prototipos impresos.

Se plantea como una dificultad la no posibilidad de realizar la impresión en materiales como por ejemplo goma, lo que permitiría realizar pruebas tempranas con los materiales más parecidos a los finales.

Como conclusión se destaca la reducción de tiempo y costos de diseño junto con una mayor calidad del producto final.

3. CONCLUSIONES

La adopción de una tecnología de fabricación aditiva no es instantánea y requiere previamente de un estudio y análisis pormenorizado de sus características. Cada una de estas tecnologías presenta capacidades, ventajas y limitaciones diferentes según los materiales que emplean, área de impresión del equipo, velocidad de procesamiento, calidad de la pieza obtenida (propiedades mecánicas y dimensionales). En algunos casos puede ser necesario un procesamiento posterior para mejorar las propiedades del material y/o su terminación superficial.

La selección de la tecnología adecuada de acuerdo con lo que se busca obtener es vital ya que no existe una impresora 3D universal, esto facilita en algunas partes del mundo la modalidad de espacios de trabajo compartido con impresoras 3D de diferentes tecnologías.

En Argentina los costos y la accesibilidad a los equipos representa un problema adicional que se espera pueda superarse con la mayor demanda de equipos para diferentes usos.

Existen un conjunto de empresas que fabrican y comercializan equipos en Argentina basados en el sistema de Modelado por Deposición Fundida (FDM), que es la tecnología aditiva más difundida debido al éxito del proyecto RepRap de código abierto y desarrollo libre. El mercado de estas

ISBN: 978-987-1676-63-7

impresoras está dirigido a usuarios que requieren impresoras personales 3D e industrias con aplicaciones en general destinadas a la fabricación de prototipos.

La identificación de las posibles aplicaciones de la impresión 3D en una empresa representa una decisión fundamental y la relación costo beneficio se vincula con el valor adicional que pueda obtenerse tanto para el productor como para el usuario del producto.

Las empresas argentinas relevadas en la investigación encuentran ese beneficio en el sector de diseño y desarrollo de sus productos con la elaboración de prototipos, reduciendo los costos de desarrollo al acortar el tiempo en el que el producto llega al mercado.

La elaboración de prototipos no se limita a su impresión directa, sino también se realizan en forma indirecta a través de la impresión de modelos que servirán para realizar los moldes para el posterior fundido del prototipo en el material del producto final (indirect tooling). También se detectó la realización de moldes impresos para realizar en estos la colada de fundición para la obtención de los prototipos deseados (direct tooling).

Se observó la utilización de fabricación aditiva para la realización de dispositivos auxiliares para ayudar al montaje en la línea de producción. También la realización de piezas únicas para reemplazo de roturas eventuales en equipos del sector de producción o adaptaciones según sea necesario.

En cuanto a la obtención de productos finales, se detectó que es muy escasa esa variante, limitándose a componentes de productos de baja complejidad, confeccionados en general en impresoras de buena calidad de terminación.

También se detectó la obtención de productos finales en forma indirecta, a través de la colada de fundición sobre moldes impresos.

Según surge de las entrevistas, uno de los factores determinantes por los que prácticamente no se realizan productos finales impresos, en comparación con la tendencia existente en mercados centrales, es el alto costo de las tecnologías de fabricación aditiva necesarias para imprimir metales, y la imposibilidad de amortizar estos equipos, con la escala de producción local.

La utilización de la tecnología en la fabricación de productos finales requiere no solo disponer de la tecnología específica de acuerdo al producto elegido sino también disponer de la información y el conocimiento general necesario para su posible incorporación.

Las organizaciones disponen de capacidades básicas o centrales que según Leonard - Barton [4] las definen como un conjunto de valores basados en habilidades y conocimientos de los sistemas técnicos y gerenciales internos y propios de la empresa y que le dan ventajas o la diferencian de otras organizaciones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las organizaciones industriales en general tratan de optimizar su producción a través de los sistemas tradicionales de fabricación ya conocidos. La adopción de una tecnología de manufactura aditiva requiere identificar aquellos productos que puedan beneficiarse con una mayor complejidad y con participación activa de los clientes en el diseño y la fabricación [5].

Las capacidades básicas adquiridas y que otorgan ventajas competitivas pueden convertirse en rigideces básicas que impiden o demoran el cambio [4]. En este sentido y con el objetivo de ampliar los conocimientos, diferentes organismos nacionales como el sector de diseño Industrial del INTI, el Ministerio de Ciencia y Tecnología así como los laboratorios de Universidades Nacionales, promueven la difusión de la tecnología para su posible inserción y aplicación estratégica en el entorno industrial.

4. REFERENCIAS

[1] Vazhnov A. *Impresión 3D: Como va a cambiar el mundo*. Editorial Baikal, 2014.

[2] Berman B. *3-D printing: The new industrial revolution*. Business Horizons, Vol.55, issue 2. Pp. 155-162, 2012.

[3] Savitz E. *Manufacturing the Future: 10 Trends to Come in 3D Printing.* Forbes.com, 2012.

[4] Leonard – Barton D. *Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in managing New Product Development.* Strategic Management Journal, Vol.13, pp.111-125, 1992.

[5] Thomas D., Gilbert S. *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion*. NIST Special Publication 1176, National Institute of Standards and Technology, 2014.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPARACIÓN DE LAS FUERZAS DE AVANCE AXIAL Y TORQUES PRODUCIDOS CUANDO SE TALADRA CON DOS DIFERENTES TIPOS DE BROCAS: UNAS CON GEOMETRÍA TRADICIONAL Y OTRAS CON GEOMETRÍA INNOVADA

Mario Guzmán Villaseñor

Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de La Frontera
Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile
mario.guzman@ufrontera.cl

RESUMEN

Las brocas con geometría tradicional, las que están caracterizadas por la presencia del bisel transversal, han sido largamente estudiadas en sus aspectos geométricos y de determinación de las fuerzas involucradas en un proceso de taladrado. El bisel transversal es una arista que une a los filos principales de la herramienta, formando una cuña que consume una gran cantidad de fuerza en su penetración. Por otro lado, existen brocas con geometría mejorada donde destaca la presencia del filo transversal, el que está diseñado para que participe en mejores condiciones en un proceso de taladrado. En rigor, estas brocas tienen dos filos transversales y dos filos principales, cada cual con sus ángulos de incidencia, de filo y de desprendimiento, respectivamente.

El objetivo de este trabajo fue comparar los valores de las fuerzas axiales y torques que se generan con ambos tipos de brocas, con igualdad de diámetros y sometidas a las mismas condiciones de corte.

El material taladrado corresponde a una aleación de aluminio 2011, cuya dureza tiene un valor promedio de 95 HB.

Los ensayos de taladrado fueron realizados en una máquina CNC de alta precisión, con código de programación ISO. La captura de las fuerzas involucradas y los pares mecánicos de corte producidos en el proceso de taladrado se hizo a través de una plataforma dinamométrica piezoeléctrica, diseñada para tal efecto.

Todos los valores logrados fueron graficados y sometidos a un proceso de análisis, lo que condujo a determinar el comportamiento de ambos tipos de herramienta.

Debido a que las brocas innovadas no poseen un bisel de indentación, la fuerza de avance axial disminuye considerablemente, en comparación, a lo logrado con las brocas tradicionales que poseen bisel transversal. Sin embargo, el momento torsor requerido en el proceso de taladrado es mayor en las brocas innovadas, que en las brocas tradicionales.

***Palabras Claves**: Brocas mejoradas, filo transversal, bisel transversal, indentación, fuerzas en taladrado.*

1. INTRODUCCIÓN

El taladrado es un proceso de mecanizado que combina dos movimientos, uno rotativo y otro de avance lineal, lo que conduce a producir agujeros de forma cilíndrica. Esto se logra, preferentemente, utilizando brocas helicoidales [1].

Una broca helicoidal convencional (Figura 1), se caracteriza básicamente por tener: ángulo de la punta, ángulo entre los filos principales, ángulo del bisel transversal, ángulo de la hélice, longitud de los filos principales de corte y longitud del bisel transversal [2]. Este último, tiene una gran influencia sobre las fuerzas de corte, la precisión y la calidad de los agujeros. En un trabajo de taladrado el bisel transversal remueve material mediante un proceso de indentación, con presencia de un ángulo de desprendimiento altamente negativo [3-5].

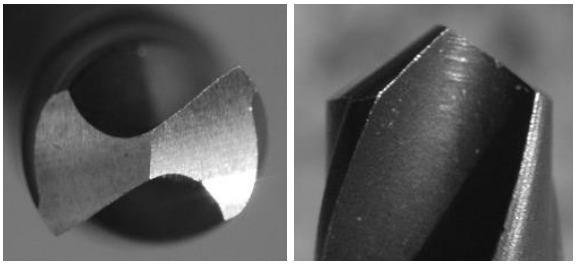


Figura 1: Broca convencional con bisel transversal

Para aminorar la fuerza de avance y el par de taladrado, algunos investigadores han logrado, en cierta medida, modificar la geometría de la punta de la herramienta, pero conservando la presencia del bisel transversal [6-9]. Se reconoce que el bisel transversal consume una significativa magnitud de la componente de la fuerza de avance [10].

Existen innovaciones que apuntan a la geometría de las brocas helicoidales (Figura 2), que divide al bisel transversal en dos filos de corte, lo que corresponde a un destalonado en cruz. Estas brocas han sido afiladas de modo que se generan dos filos primarios, donde la principal característica radica en la presencia de un ángulo de desprendimiento positivo.

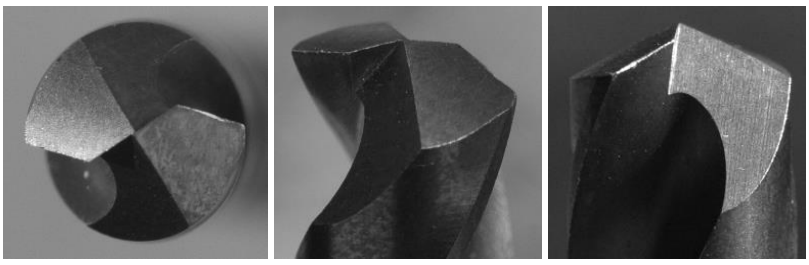


Figura 2: Vistas de una broca con geometría mejorada en la parte activa

.

ISBN: 978-987-1676-63-7

1.1. Objetivo del trabajo

Comparar los valores de las fuerzas de avance axial y torques que se generan en un proceso de taladrado cuando se utilizan brocas tradicionales y brocas con geometría mejorada, considerando las mismas condiciones de corte.

2. MATERIALES Y METODOS

Para realizar los ensayos de taladrado se dispone de los siguientes recursos:

- Máquina-herramienta CNC marca Hercus, modelo VMC300 (Figura 3).
- Mesa dinamométrica, dotada de sensores piezoeléctricos.
- Sistema de adquisición de datos (Análogos y digitales).
- Brocas de acero rápido HSS, con geometría tradicional en la parte activa (Diámetros: 4, 5, 6 y 7 mm).
- Brocas de metal duro de alta precisión CoroDrill™ Delta-C, con recubrimiento de TiN y geometría innovada en la parte activa (Diámetros: 4, 5, 6 y 7 mm).
- Probetas de aleación de aluminio Al-2011 (Dureza 95 HB).



Figura 3: Máquina-herramienta CNC

2.1. Condiciones de corte en taladrado

Considerando las propiedades del material a taladrar y el diámetro de las brocas, se determina la velocidad rotacional *n*, el avance axial *fn*, la velocidad de avance *Vf* y la velocidad de corte *Vc* en base a la Ecuaciones (1), (2), (3) y (4), respectivamente.

$$n = 11254 \cdot D^{-0,8353} \quad (1)$$

$$fn = 0,0159 \cdot D^{1,0789} \quad (2)$$

$$Vf = fn \cdot n \quad (3)$$

$$Vc = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

La Tabla 1 registra las principales condiciones cinemáticas para la programación de la máquina CNC y realizar los ensayos de taladrado, considerando los distintos diámetros de brocas utilizadas.

Tabla 1. Parámetros de corte para los ensayos de taladrado

Diámetro **D** (mm)	Velocidad rotacional **n** (rev /min)	Avance axial **fn** (mm/rev)	Velocidad de avance axial **Vf** (mm/min)	Velocidad de corte **Vc** (m/min)
4	3535	0,07	247	44
5	2934	0,09	264	46
6	2520	0,11	277	48
7	2215	0,13	288	49

2.2. Brocas con geometría tradicional

Estas herramientas se caracterizan porque poseen dos filos principales de corte y una arista llamada bisel transversal, que une a los mencionados filos. La geometría fundamental de la parte activa de las brocas tradicionales está representada en la Figura 4, donde destacan la presencia del ángulo entre los filos principales σ = 118º, el ángulo del bisel transversal ψ = 55º, la longitud del bisel transversal *c*, el diámetro *D* y la altura del filo *z.*

Debido a la considerable influencia del bisel transversal en el proceso de taladrado, los investigadores Shaw y Oxford incorporaron el término *(c/D)* a sus modelos mecanicistas de predicción de las fuerzas de avance *Ff* y de los momentos de corte *Mc*. [11,12]

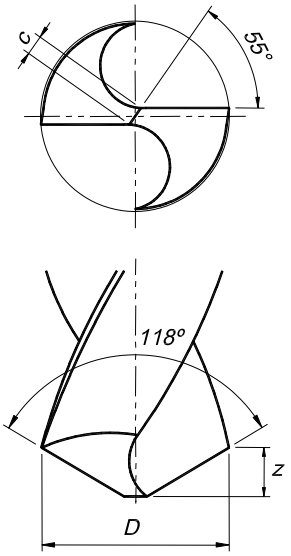


Figura 4: Broca con geometría tradicional

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3. Brocas con geometría innovada

En la Figura 5 está representada la geometría más importante de las brocas helicoidales innovadas. Dichas mejoras están centradas, fundamentalmente, en la parte activa de la herramienta, donde destacan la ausencia del bisel transversal (c=0), el ángulo de desprendimiento del filo transversal γ_i = 9º, el ángulo de la hélice γ_f = 26º, el ángulo entre filos principales σ = 140º, el ángulo del filo transversal ψ = 45º, el diámetro D y la altura del filo z.

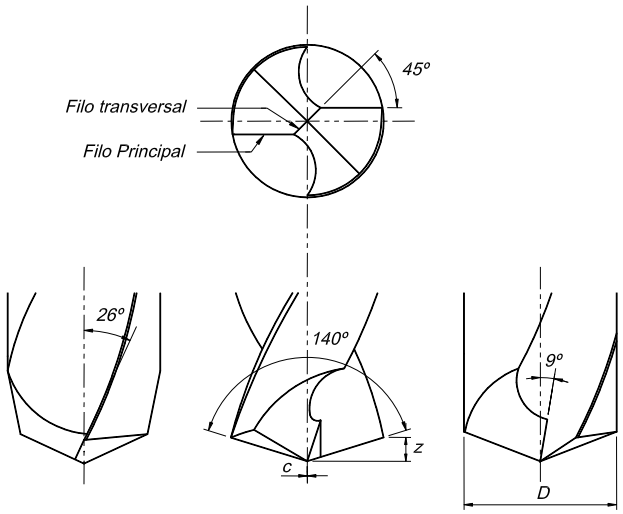


Figura 5: Geometría de las brocas innovadas, principalmente en su parte activa

2.4 Desarrollo de las fuerzas de avance y momentos de taladrado de las brocas tradicionales: valores medidos y filtrados

Mediante un sistema de adquisición de datos se recogen los valores que representan a las fuerzas de avance *Ff* y momentos de taladrado *Mc*, tal como se muestra en la Figura 6. Todos los datos y gráficos están referidos a lo que ocurre en la parte activa de las brocas.

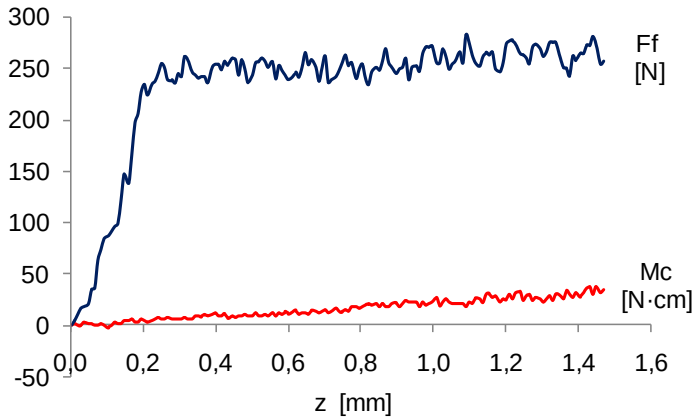


Figura 6: Fuerzas de avance y momentos de taladrado en brocas tradicionales

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.4.1. Método de la presión específica de corte

Como ejemplo ilustrativo, se muestran los resultados obtenidos al taladrar con una broca tradicional de 6 mm de diámetro. Los gráficos que se presentan a continuación, son elaborados con datos medidos y calculados. La Figura 7 corresponde a la presión específica *Kfi* de las fuerzas de avance en el bisel transversal. La Figura 8 representa la presión específica *Kfp* de las fuerzas de avance en el filo principal. La Figura 9 muestra a las fuerzas de avance y la Figura 10 exhibe el comportamiento de los pares de taladrado.

Las curvas de las Figuras 7 y 8, se someten a un proceso de ajuste de regresión potencial. Esto conduce a determinar las funciones asociadas a la presión específica de avance simulada, tanto en la zona del bisel transversal, como en el filo principal de corte de la broca.

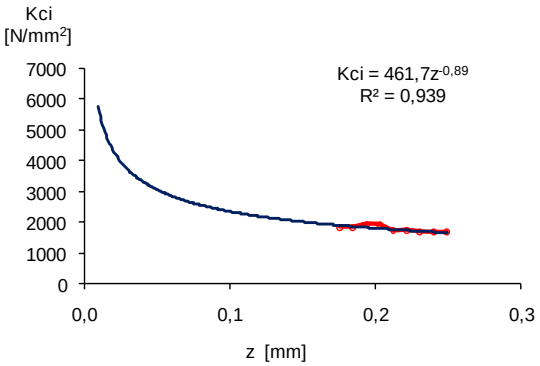


Figura 7: Presión específica de avance en el bisel transversal, medida y simulada

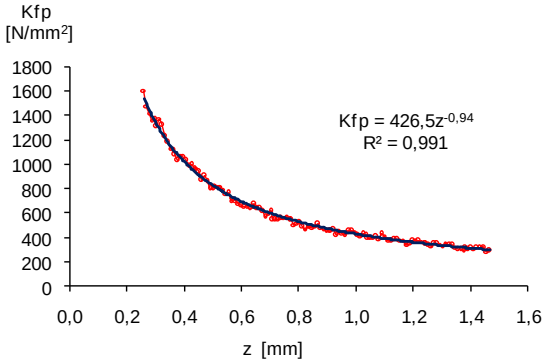


Figura 8: Presión específica de avance en el filo principal de corte, medida y simulada

La curva que representa a las fuerzas de avance axial *Ff* desarrollada en la parta activa de la broca, está mostrada en la Figura 9 donde se distingue claramente el punto de inflexión que separa las dos zonas de corte, una que corresponde a la acción del bisel transversal y la otra que corresponde a la acción del filo principal.

2.4.2. Método de regresión polinomial

Para determinar los pares de taladrado *Mc* medido, se recogen los valores desde el sistema de adquisición de datos, los cuales son graficados y sometidos a un proceso de regresión no lineal, ajustando una curva polinomial de grado dos, la que se convierte en la función que determina el par mecánico de taladrado simulado, para cualquier altura *z* del filo (Figura 10).

ISBN: 978-987-1676-63-7

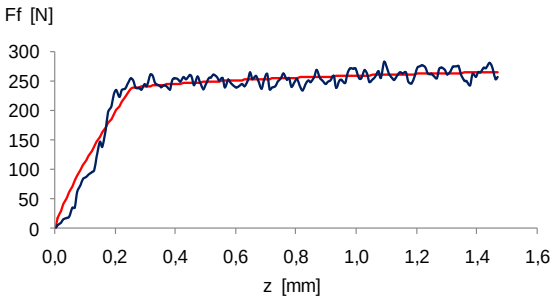


Figura 9: Representación de las fuerzas de avance medidas y simuladas. Brocas tradicionales

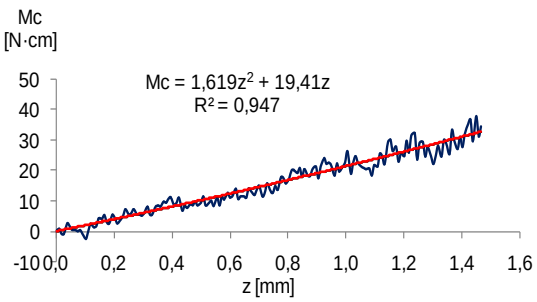


Figura 10: Representación de los momentos de taladrado medidos y simulados. Brocas tradicionales

2.5 Desarrollo de las fuerzas de avance y momentos de taladrado de las brocas innovadas: valores medidos y filtrados

Mediante el sistema de adquisición de datos, se recogen los valores que representan a las fuerzas de avance *Ff* y los momentos de taladrado *Mc*, tal como se muestra en la Figura 11. Todos los datos y gráficos están referidos a lo que ocurre en la parte activa de las brocas.

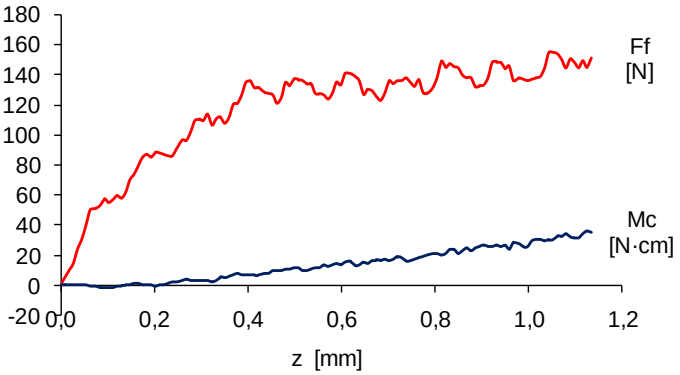


Figura 11: Fuerzas de avance y momentos de taladrado en brocas innovadas

2.5.1. Método de la presión específica de corte

Como ejemplo ilustrativo, se muestran los resultados obtenidos al taladrar con una broca innovada de 6 mm de diámetro. Los gráficos que se presentan a continuación, son elaborados con datos medidos y calculados. La Figura 12 corresponde a la presión específica *Kfi* de las fuerzas de avance en el filo transversal. La Figura 13 muestra la presión específica *Kfp* de las fuerzas de avance en el filo principal. La Figura 14 representa a las fuerza de avance y la Figura 15 exhibe el comportamiento de los pares de taladrado.

Las curvas de las Figuras 12 y 13, se someten a un proceso de ajuste de regresión potencial. Esto conduce a determinar las funciones que representan a la presión específica de avance simulada, tanto en el filo transversal de corte (filo inicial), como en el filo principal de corte de la broca.

ISBN: 978-987-1676-63-7

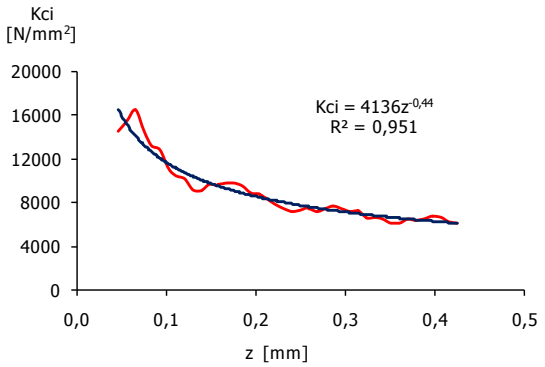


Figura 12: Presión específica de avance en el filo transversal, medida y simulada

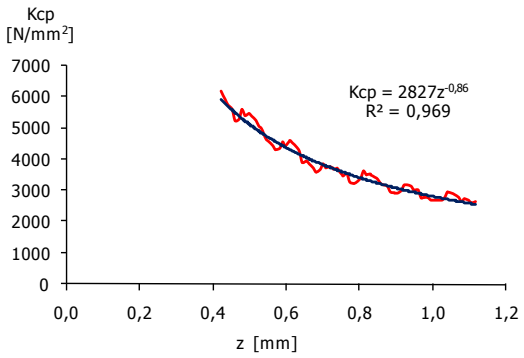


Figura 13: Presión específica de avance en el filo principal de corte, medida y simulada

La Figura 14 representa a las fuerzas de avance axial, las que están compuestas por las fuerzas que actúan en el filo transversal, más las fuerzas que actúan en el filo principal.

2.5.2. Método de regresión polinomial

Para determinar los pares de taladrado *Mc* medido, se recogen los valores desde el sistema de adquisición de datos, los cuales son graficados y sometidos a un proceso de regresión no lineal, ajustando una curva polinomial de grado dos, la que se convierte en la función que determina el par mecánico de taladrado simulado, para cualquier altura *z* del filo (Figura 15).

La Figura 15 muestra el comportamiento de los pares de taladrado. Los valores máximos de las fuerzas de avance axial y de los momentos de taladrado, están correlacionados con la altura *z* de la parte activa de la broca.

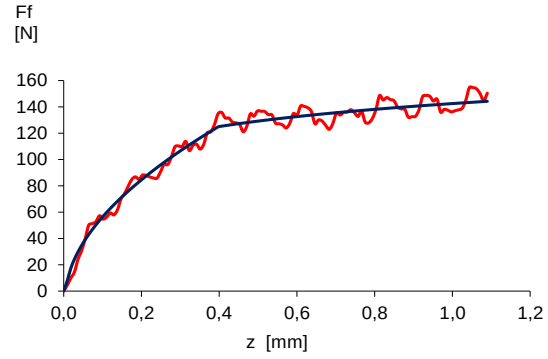


Figura 14: Fuerzas de avance axial medidas y calculadas, en función de la altura del filo

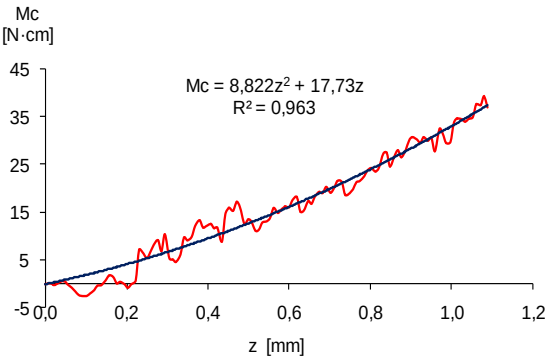


Figura 15: Momentos de taladrado medidos y calculados, en función de la altura del filo.

3. RESULTADOS

La Tabla 3 recoge los valores máximos de las fuerzas de avance y de los pares de taladrado, para los distintos diámetros de brocas ensayas. Las brocas innovadas requieren menos fuerzas

ISBN: 978-987-1676-63-7

de avance que las brocas tradicionales. Las brocas innovadas demandan mayor torque que las brocas tradicionales.

Tabla 3. Resultados de los valores máximos de las fuerzas de avance y pares de taladrado.

Diámetro **D** [mm]	Broca tradicional **Ff** [N]	Broca innovada **Ff** [N]	Diferencia %	Broca tradicional **Mc** [N·cm]	Broca innovada **Mc** [N·cm]	Diferencia %
4	120,53	97,30	-(19,4)	10,53	13,47	+(21,8)
5	180,53	113,86	-(36,9)	21,11	27,27	+(22,6)
6	266,03	144,54	-(45,7)	33,40	37,23	+(10,3)
7	367,07	197,28	-(46,3)	44,47	55,89	+(20,4)

3.1 Gráficos

Los gráficos 16, 17, 18 y 19 muestran el comportamiento de las fuerzas de avance axial cuando se taladrada con brocas de un mismo diámetro, y considerando los dos tipos de brocas ensayadas.

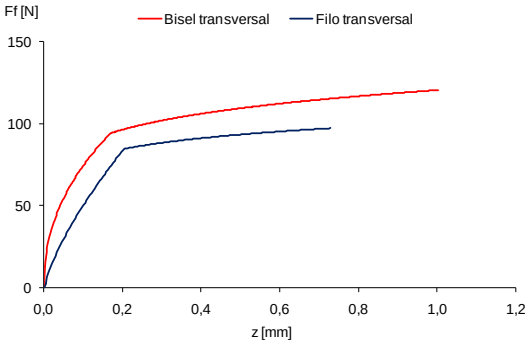


Figura 16: Fuerzas de avance con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 4 mm.

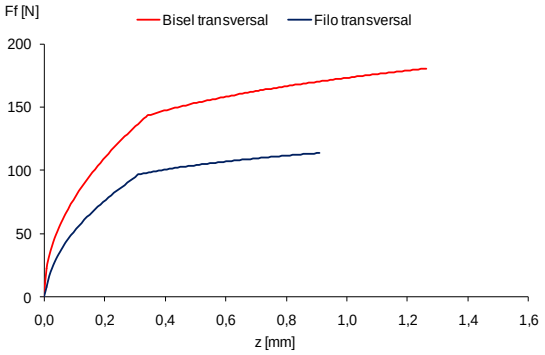


Figura 17: Fuerzas de avance con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 5 mm.

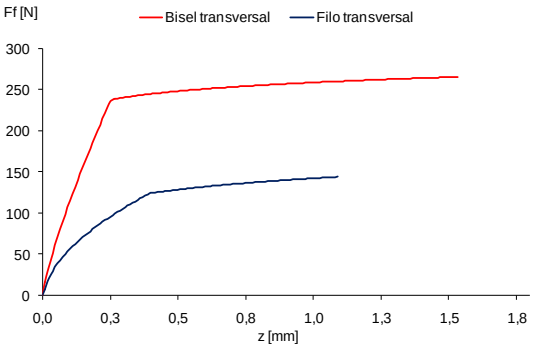


Figura 18: Fuerzas de avance con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 6 mm.

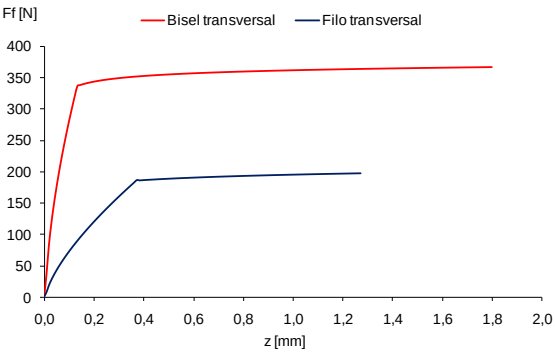


Figura 19: Fuerzas de avance con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 7 mm.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los gráficos 20, 21, 22 y 23 muestran el comportamiento de los pares de taladrado cuando se perfora con brocas de un mismo diámetro, y considerando los dos tipos de brocas ensayadas.

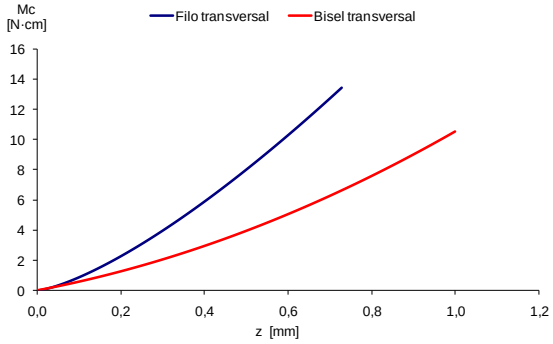


Figura 20: Pares de taladrado con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 4 mm.

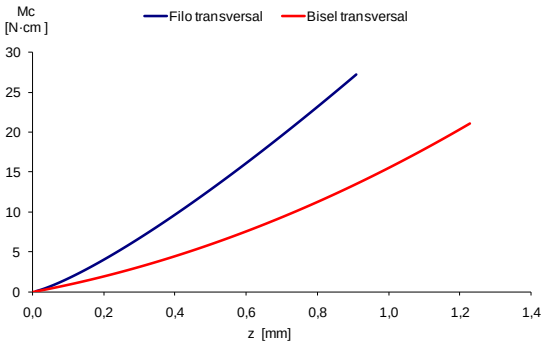


Figura 21: Pares de taladrado con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 5 mm.

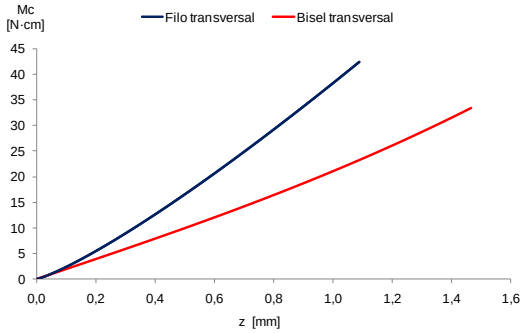


Figura 22: Pares de taladrado con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 6 mm.

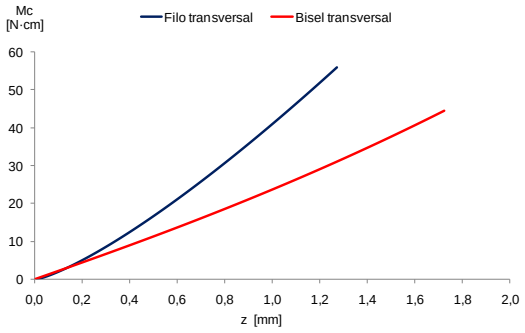


Figura 23: Pares de taladrado con brocas tradicionales e innovadas, de diámetro 7 mm.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones extraídas del trabajo son las siguientes:

- Se necesita menos fuerza de avance axial para taladrar con brocas innovadas que poseen filo transversal, en comparación con las brocas tradicionales que poseen bisel transversal, cuando se mecaniza un mismo material, bajo idénticas condiciones de corte.
- Las brocas innovadas requieren un mayor momento de taladrado que las brocas tradicionales para perforar un mismo material, bajo idénticas condiciones de corte.

5. REFERENCIAS

[1] Lazar M-B. et al, *Mechanical Load Distribution Along the Main Cutting Edges in Drilling*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 213, pp. 245-260, 2013.

ISBN: 978-987-1676-63-7

[2] Isbilir O. et al, *Numerical Investigation of Effect of Drill Geometry on Drilling Induced Delamination of Carbon Fiber Reinforced Composites*, Composites Structures, Vol.105, pp. 126-133, 2013.

[3] Feito N. et al, *Influence of Special Tool Geometry in Drilling Woven CFRPs Materials,* Procedia Engineering, Vol.132, pp. 632-638, 2015.

[4] Guzmán M. et al, *Estudio de las Fuerzas de Avance en un Proceso de Taladrado Utilizando Brocas con Geometría Mejorada,* Vol. 25(1) pp. 15-22, 2014.

[5] Pirtini M., Lazoglu I. *Forces and quality in drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, 1271-1281, 2005.

[6] Wang J., Zhang Q. *A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part I: Geometrical analysis and experimental investigation*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, 1276-1285, 2008.

[7] Wang J., Zhang Q. *A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part II: Predictive force models*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, 1286-1295, 2008.

[8] Anish P.et al. *Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, 4-5 421-431, 2005.

[9] Fetecau C., et al. *Toroidal grinding method for curved cutting edge twist drills*, Journal of Materials Processing Technology. Vol. 209, 3460-3468, 2009.

[10] Hamade R.F., et al. *Extracting cutting force coefficients from drilling experiments*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, 387-396, 2006.

[11] Guzmán M. *Modelo de Shaw y Oxford aplicado a un proceso de taladrado que utiliza brocas helicoidales con geometría innovada y ausencia de bisel transversal*. Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica (ISBN-ISSN 978-987-45571-0-0), 2 al 5 de septiembre 2014, Resistencia-Argentina,

[12] Ahmed N. *Effect of changing drilling parameters on thrust forces and torque*. Middle-East Journal of Scientific Research, Vol. 21(2), 347-352, 2014.

Agradecimientos

El autor de este trabajo desea agradecer a la Dirección de Investigación de la Universidad de La Frontera, que mediante el proyecto DIUFRO DI10-0012 financió este trabajo de investigación.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MANUFACTURA ADITIVA COMO INSTRUMENTO DE FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA BALL-ON-FLAT

Yasnikowski, Mathias E. [1], **Rebak, Edwin A.** [2], **Rodriguez, Carlos M.** [3], **González, Facundo E.**[4], **Tarnowski, Gabriel A.**[5]

[1,2,3,4,5] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones. Juan Manuel de Rosas 325 (3360) Oberá, Misiones, Argentina
correo-e: mathiasyasnikowski@hotmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se expone las etapas concernientes al desarrollo y fabricación de una máquina de desgaste tipo *Ball-on-Flat*. Gran parte de los componentes estructurales se fabricó mediante el método de manufactura aditiva de impresión 3D.

Se procedió a diseñar la máquina tipo *Ball-on-Flat* que permita realizar ensayos de desgaste, en condiciones de velocidad y fuerza variables. La tasa de desgaste obtenida de dichos ensayos constituye una herramienta para la determinación de la vida útil de un componente mecánico. La duración de los ensayos puede ser elevada, por lo que se proyectó una máquina capaz de trabajar de manera autónoma. Se ponderó el método de manufactura aditiva por sobre el de mecanizado por arranque de viruta, en vistas a: los costos y tiempos necesarios.

Mediante software de diseño asistido por computadora (CAD) se diseñaron los elementos de máquina y a través de un análisis de ingeniería se determinaron aquellos que fueran factibles de ser fabricados mediante impresión 3D, la cual permite lograr geometrías complejas, con reducido desperdicio de material y un aceptable grado de control del proceso.

Como resultado se obtuvo una máquina de desgaste capaz de trabajar de manera estable en condiciones variables de funcionamiento, evitando incurrir en la dificultad y altos costos de adquirir un equipo similar en el mercado.

Para finalizar, se verificó la utilidad del empleo de la manufactura aditiva en la construcción de la máquina de desgaste, a pesar de la presencia de algunos inconvenientes, los cuales fueron caracterizados, analizados y convenientemente mitigados. Se comparó los tiempos y costos de manufactura, con respecto al proceso por arranque de material.

Palabras Claves: *Impresión 3D, Manufactura aditiva.*

Área Temática: Fabricación.

1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda constante de conocimiento que siempre ha acompañado al ser humano en su carrera de evolución tecnológica se desarrollaron diferentes herramientas que permitieron alcanzar metas inimaginables tiempos atrás. Una de ellas que impulsa el motor de revolución sin duda alguna es la manufactura aditiva, también considerada como una de las más controversiales en la sociedad global [2]. Actualmente se han traspasado las barreras de fabricación, no se requieren grandes inversiones de capital, la capacitación es abundante mediante la globalización y la infraestructura que requiere es reducida; todo ello propulso a esta nueva tecnología poder alcanzar a pequeños consumidores.

La manufactura aditiva consiste en la creación de partes componentes a partir de un modelo 3D, generalmente capa por capa [1]. Existen diferentes técnicas desarrolladas a lo largo de la evolución de este proceso, pero las más destacada y empleada en todo el mundo es la de fabricación por deposición fundida o "*Fused Deposition Manufacturing*" (FDM). La técnica es empleada en distintas áreas ingenieriles, como ser: la aviación, la aeronáutica, la mecánica, la eléctrica; como así también se desarrolla en áreas no ingenieriles como la gastronomía, la medicina y la artística [3]. Esta técnica permite la optimización del proceso de fabricación y permite crear formas geométricas de altas complejidades que conllevarían varios sub procesos en caso de realizarse por técnicas de arranque de viruta convencionales.

Debido a las ventajas que presenta esta tecnología se la ha empleado como herramienta de fabricación de partes estructurales de una máquina de desgaste tipo *Ball-on-Flat* [4]. En el presente trabajo se exponen las etapas de diseño y fabricación, como así también los problemas que fueron surgiendo y las soluciones aplicadas a los mismos para poder alcanzar la meta final.

2. METODOLOGÍA

La metodología consistió en el estudio del funcionamiento del FDM y en el análisis de las características más convenientes para la impresión de cada parte estructural. La impresora 3D utilizada para la creación de los componentes contempla el empleo de dos tipos de materia prima, el Ácido Poli-Láctico (PLA) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Se estableció el material a emplear, las densidades de cada componente y las temperaturas de trabajo del extrusor "*Hot End"* (Figura 1) y la base de impresión.

ISBN: 978-987-1676-63-7

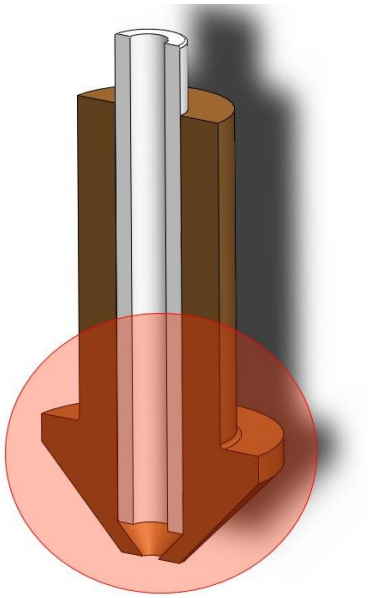


Figura 1. "*Hot End*" de la impresora 3D.

El desarrollo de la máquina de desgaste, desde el punto de vista del diseño ingenieril, se realizó considerando como eje central la optimización de los mecanismos funcionales propuestos para lograr el control lo más elevado posible sobre los ensayos de desgaste, todo ello se ejecutó empleando herramientas de diseño asistido por computadora sobre un modelo 3D.

Para la fabricación de las piezas se utilizó PLA y sus propiedades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del PLA [5].

Propiedades	PLA	
	Valor	Comentarios
Densidad	1,00 – 2,47 g/cc	Valor medio: 1,29 g/cc
Absorción de agua	0,130 – 2,00 %	Valor medio: 0,877 %
Tensión a la tracción última	16,0 - 114 MPa	Valor medio: 50,1 MPa
Tensión a la tracción límite	16,0 - 103 MPa	Valor medio: 44,7 Mpa

Mediante ensayos se determinó la mejor condición de trabajo de la impresora para el PLA, la cual puede observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de impresión empleadas para PLA.

Temperatura "*Hot End*"	171 °C
Temperatura base primera capa	73 °C
Temperatura base demás capas	60 °C
Densidad de relleno	30% - 100%
Tipo de relleno	Hexagonal

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se realizó los cálculos de los esfuerzos. En las piezas de mayor complejidad las cargas admisibles fueron definidas empleando el Método de Elementos Finitos (MEF).

Una de las ventajas que se destacó de la manufactura aditiva es la capacidad de regulación de la densidad de relleno de cada componente. Esto permitió reducir la cantidad de material necesario para la fabricación. Si se establece un relleno completo los tiempos de fabricación y la cantidad de material requerido también se incrementan. En cuanto al tipo de relleno se ha seleccionado el tipo hexagonal, el cual puede observarse en la Figura 2.

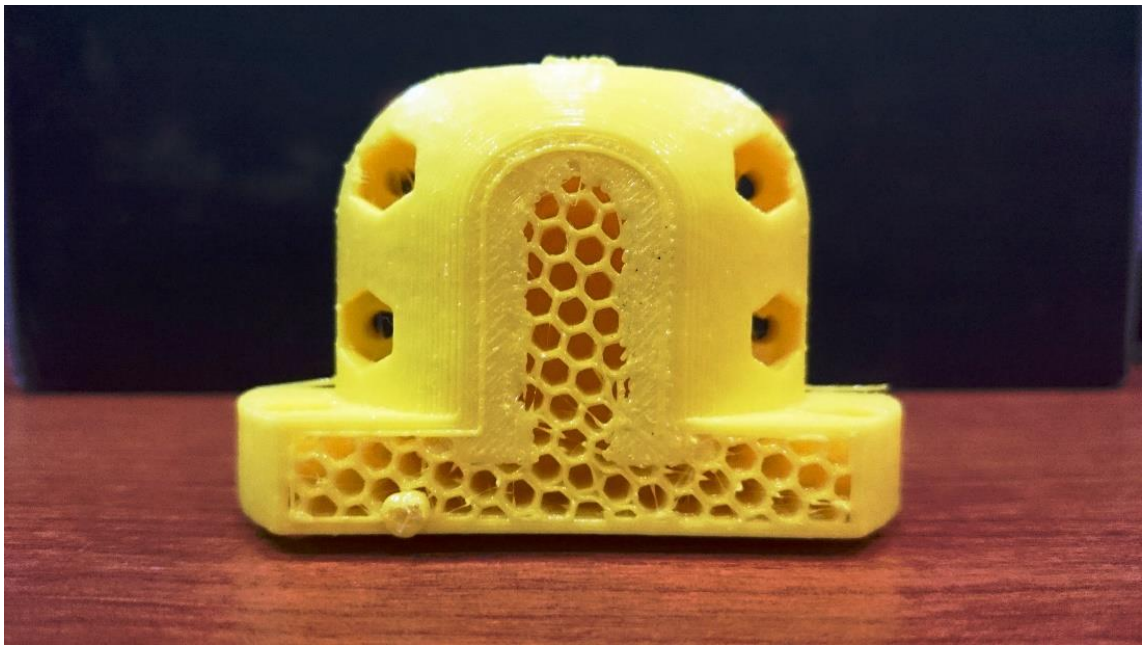


Figura 2. Tipo de relleno hexagonal empleado en piezas con densidad de relleno menor al 100%.

Se construyeron un total de 25 componentes estructurales mediante tecnología aditiva. En esta etapa se contabilizó el tiempo de fabricación y la cantidad de material requerido en cada componente, para luego poder contrastarlos con respecto a los métodos convencionales de fabricación por arranque de viruta.

Mediante el uso de procesos de arranque de viruta, se estimó el tiempo de fabricación de estos componentes [6]. Se consideró sub procesos de torneado, fresado, perforado y corte para la fabricación de las mismas partes impresas. Se tuvieron consideraciones del empleo de las buenas prácticas como un incremento del tiempo necesario para la construcción. Además se determinó la cantidad de material desperdiciado por los procesos y las variaciones de peso para cada técnica. Todo el análisis se realizó considerando constante el diseño inicial.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se analizó también los inconvenientes que presentan la aplicación de las dos técnicas y se extrapoló los costos de las piezas, con respecto a la materia prima que se debería emplear para la fabricación de los mismos componentes.

Finalmente se determinó las tolerancias geométricas a partir de las piezas impresas de las cuales se evaluó las distancias reales y se contrastó con respecto a las del modelo 3D. Se clasificó los resultados obtenidos según los diferentes grados IT de acuerdo a la norma ISO UNI EN 20286-I (1995) [7] y la norma DIN 16901, lo que permitió calificar la calidad del proceso de manufactura de las piezas [8], [9]. Se analizó las posibles causas de las variaciones detectadas y se determinó las tolerancias geométricas lineales en las tres direcciones primitivas posibles, las mismas pueden observarse en la Figura 3.

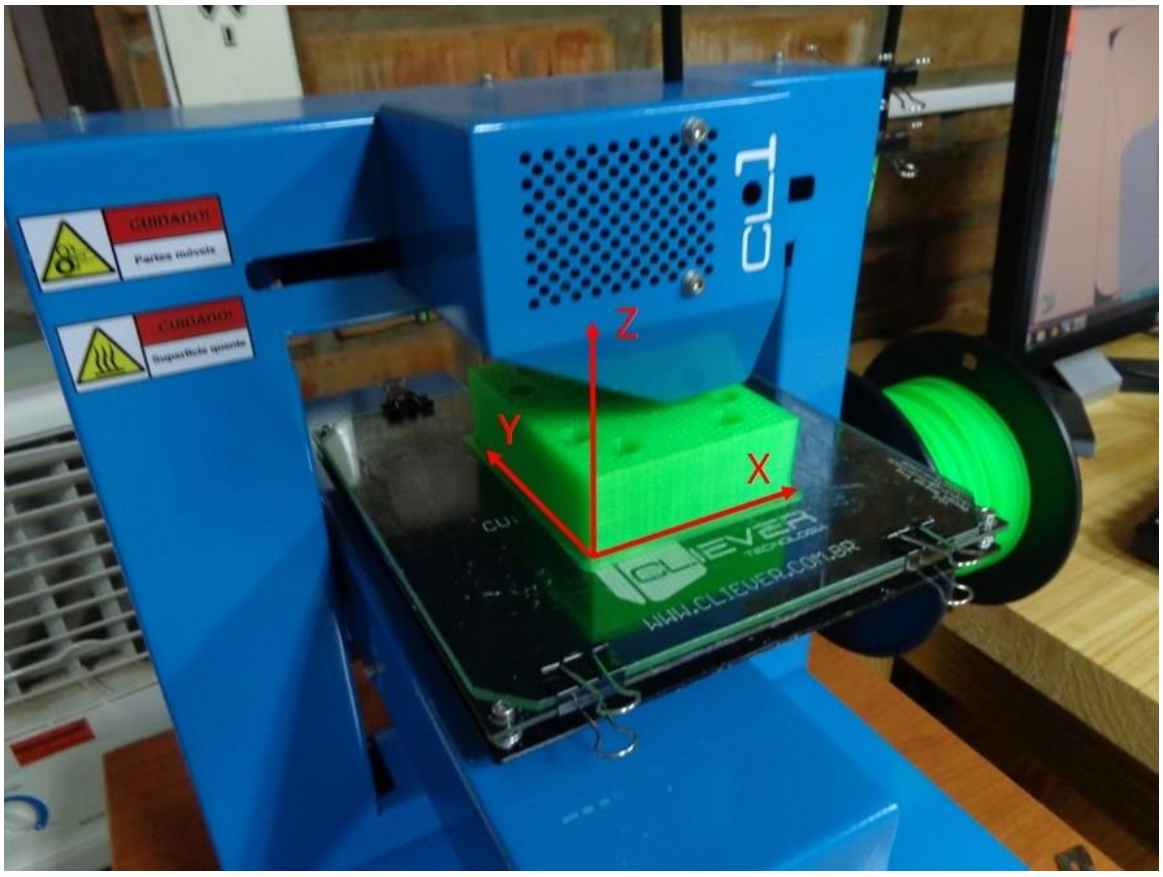


Figura 3. Direcciones de impresión consideradas para el análisis de tolerancias geométricas.

3. RESULTADOS Y DISCUCIÓN

Como resultado final se obtuvo una máquina de desgaste tipo *Ball-on-Flat* (Figura 4) construido en parte por componentes creados a partir de manufactura aditiva en una impresora 3D. La máquina de desgaste es capaz de operar en forma estable bajo diferentes condiciones de carga y velocidad en pruebas de larga y corta duración.

ISBN: 978-987-1676-63-7

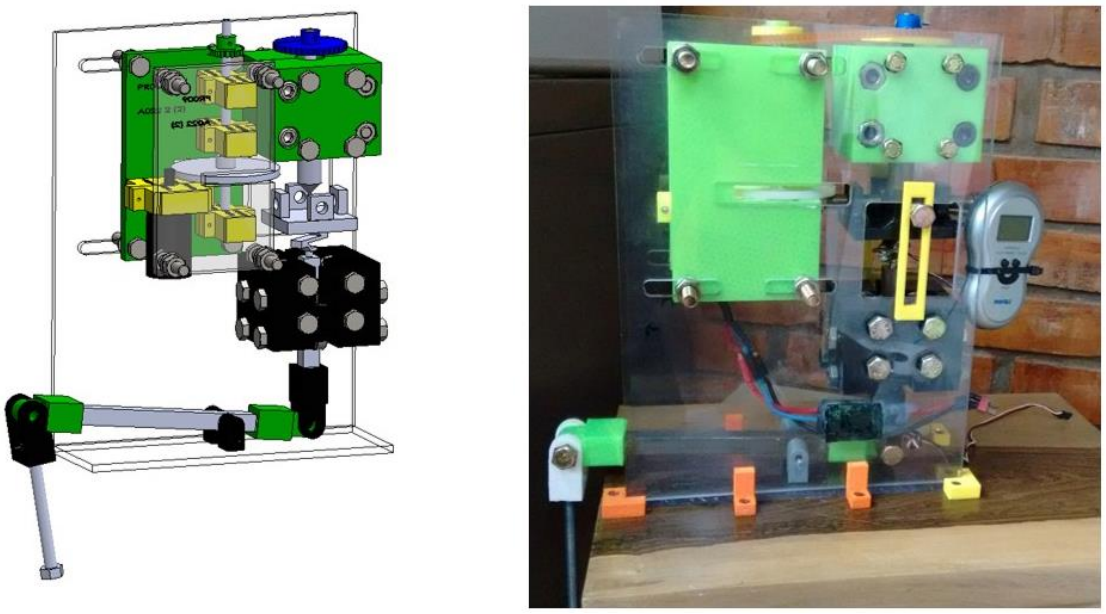


Figura 4. Máquina de desgaste tipo *Ball-on-Flat* creada principalmente mediante manufactura aditiva.

A pesar de que el proceso generó escaso desperdicio de material, fueron surgiendo inconvenientes que contrarrestaron esta cualidad. Uno de ellos se presentó al sufrir un corte inesperado del suministro eléctrico durante la impresión. Cuando se ha iniciado el proceso de fabricación, la impresora debe mantenerse constantemente conectada a la red eléctrica, cualquier ausencia de la misma provoca un reinicio del proceso, perdiéndose el avance hasta el momento y generando así una pérdida adicional de materia prima. Este inconveniente se mitigó conectando la impresora a un sistema de alimentación ininterrumpida o "*uninterruptible power supply"* (UPS), que se utiliza para cortes de baja duración.

Otro de los inconvenientes presentados del proceso fueron las obstrucciones producidas en el "*Hot End",* las que impedían el avance del PLA a través del extrusor. En el uso cotidiano de la impresora se realizaron cambios del material de aporte, el cual implica elevar la temperatura del extrusor cercana a las máximas admisibles. Estos, combinado con la resolución del sensor de temperatura y su tiempo de respuesta, pueden terminar provocando puntos calientes superiores a los máximos admisibles que finalicen carbonizando parte del material, el cual se queda adherido a las paredes (Figura 5 y Figura 6). Este problema se resolvió extrayendo el material del extrusor cuidadosamente, para no dañar la boquilla, y sumergiéndolo en acetona durante un período de tiempo de 24 horas para limpiarlo completamente [10].

ISBN: 978-987-1676-63-7

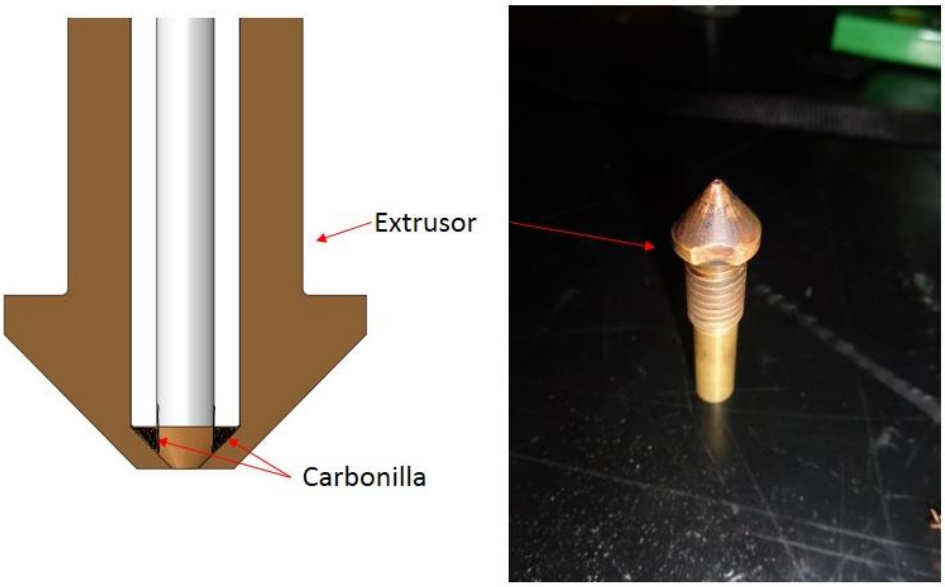


Figura 5. Carbonización del material de aporte en el *"Hot End"*.

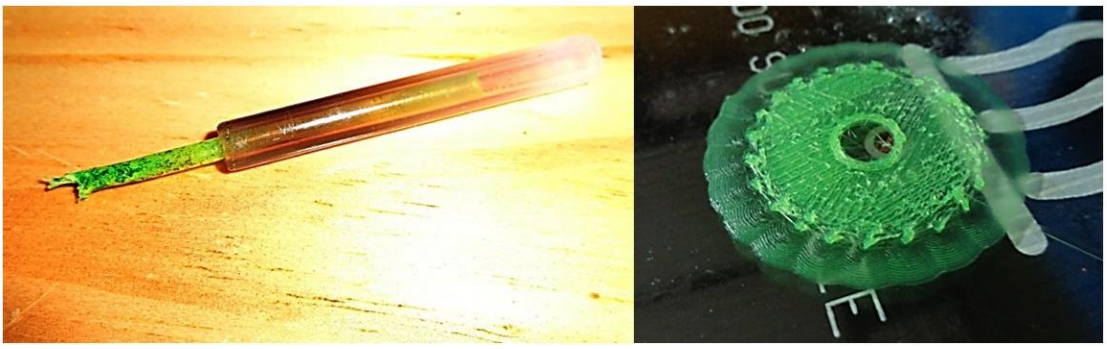


Figura 6. Efectos de la carbonización del material de aporte.

Se comparó la técnica de manufactura aditiva con respecto a la de arranque de viruta para la fabricación de los 25 componentes estructurales de la máquina y los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 3.

Como ventajas importantes a destacar se encontró la relación de pesos obtenidos al considerar la fabricación de estos componentes en acero o con PLA, como también la relación de costos de materia prima. Se observó una gran reducción del peso de la máquina de desgaste por el empleo de PLA, por lo tanto vuelve altamente recomendable la aplicación de tecnología aditiva en la manufactura de partes componentes en los cuales juega un rol importante la reducción de su peso. Además se consiguió una reducción de los costos asociados a la materia prima concordando con los autores Carlos Relvas et. al. en [11]. Sin embargo, los tiempos de fabricación obtenidos fueron mayores a los estimados para arranque de viruta y el acabado superficial logrado para componentes estructurales mecánicos es regular.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 3. Comparación entre el método de manufactura aditiva (PLA) y arranque de viruta (acero) para los componentes analizados.

	Manufactura aditiva	Arranque de viruta
Peso total de todas las piezas [kg]	1,70	16,86
Material desperdiciado [kg]	0,183	6,17
Porcentaje desperdiciado con respecto al volumen inicial	10,75%	36,59%
Tiempos de fabricación [hs]	126,65	90,5
Acabado superficial	Regular	Elevado
Relación de pesos	9,90	
Relación de costos con respecto a materia prima	0,20	

Finalmente se determinó la tolerancia de impresión mediante el análisis de una muestra conformada por las piezas impresas. La tolerancia de una impresión depende de factores operativos, factores constructivos intrínsecos de la impresora 3D, y factores del diseño a replicar [12], [13].

Las variaciones lineales, expresadas relativamente a la longitud original de diseño, mensuradas de las piezas consideradas para el análisis de tolerancias pueden observarse en la Figura 7. Se destacó que los errores provocados en la dirección ¨X¨ e ¨Y¨ son similares con pequeñas variaciones (Test N°2). Además se visualizó que los errores provocados en la dirección ¨Z¨ son mayores en todos los casos a los de las demás direcciones.

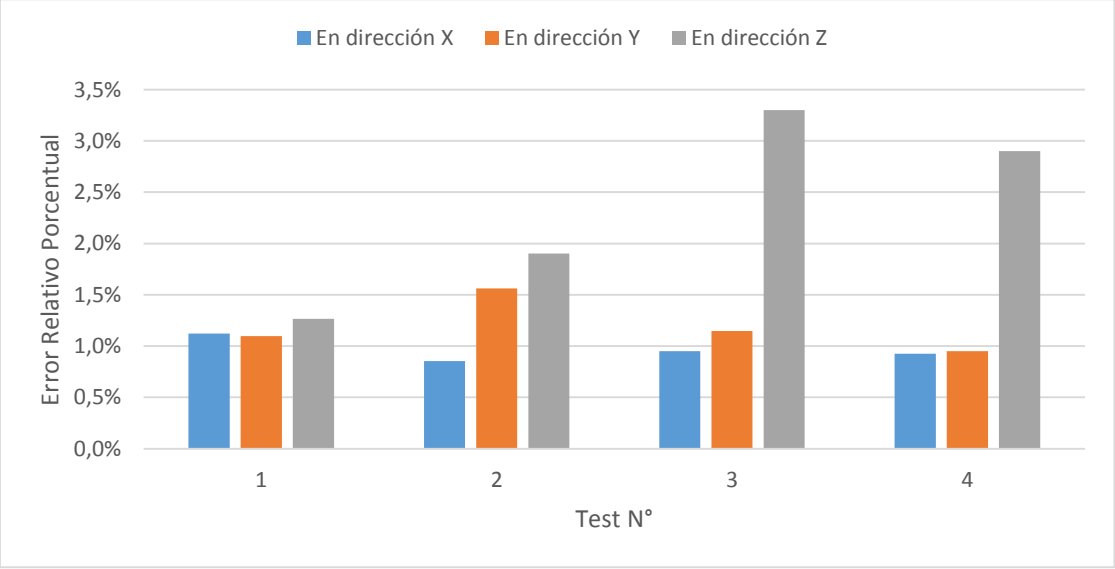


Figura 7. Errores relativos porcentuales según la dirección de impresión en componentes fabricados.

Los grados de tolerancias IT de las direcciones lineales primitivas y los errores derivados para las piezas analizadas pueden observarse en la Tabla 4. Estudios, como el realizado por Rupinder Singh en [9] y [8] obtuvo como resultado grados de tolerancia y errores menores; sin embargo el realizado por D. Dimitrov et. al. en [14] arrojaron valores mayores. Por

otra parte M. Mahesh et. al. en [15] y Carlos Relvas et. al. en [11] obtuvieron valores similares. En base a esto, se consideró que los valores establecidos de tolerancias son acordes.

Tabla 4. Grados de tolerancias lineales y errores obtenidos según la dirección de impresión.

	En dirección 'X'		En dirección 'Y'		En dirección 'Z'	
	Do = 18mm		Do = 20mm		Do = 10mm	
TEST N°	Error [mm]	Grado de tolerancia	Error [mm]	Grado de tolerancia	Error [mm]	Grado de tolerancia
1	0,12	IT 10	0,10	IT 10	0,49	IT 15
2	0,21	IT 12	0,32	IT 13	0,29	IT 14
3	0,39	IT 13	0,54	IT 14	0,14	IT 11
4	0,29	IT 12	0,44	IT 13	0,78	IT 15
5	0,07	IT 10	0,26	IT 13	0,38	IT 14

Se analizó los parámetros de los cuales depende la tolerancia de impresión, entrando en juego múltiples factores. Uno de ellos corresponde a la resolución propiamente dicha de la impresora y concuerda con el diámetro de la boquilla del *"Hot End"*, en nuestro caso 0,3 mm. Supóngase que se desea imprimir una pieza de espesor 1 mm, caso (a) de la Figura 8; y se conoce que la resolución de la impresora es de 0,3 mm, esto provoca dos situaciones posibles. La primera implica la aplicación de 3 capas y provoca un error por defecto, caso (b). En cambio, en la segunda situación se imprimen 4 capas y se provoca un error por exceso, caso (c). Cabe destacar que la técnica de FDM implica la aplicación de capas discretas superpuestas una sobre otras, en cambio el modelo computacional es planteado de manera continua, situación que es difícilmente alcanzable con impresoras convencionales [16].

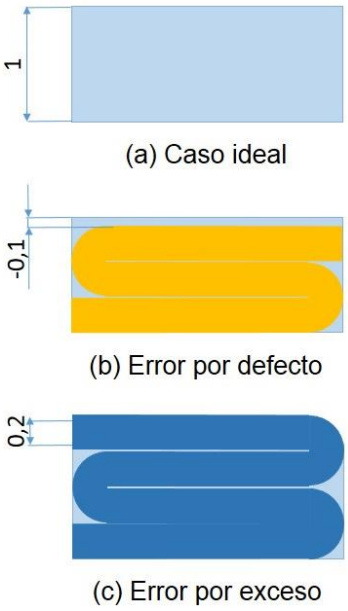


Figura 8. Posibles errores causados por la resolución de la impresora.

Por otro lado, el modelo 3D realizado por CAD, es convertido mediante el lenguaje de triangulación estándar o "*STereoLithography"* (.stl) el cual genera sub divisiones y mallados que son las guías que recorre el extrusor capa a capa para crear la pieza. Esta conversión produce, según los algoritmos empleados, errores de estimación que impactan finalmente en el acabado superficial y las tolerancias según lo menciona Arion, Dobrescu & Pascu en [17]. Si bien, ambos factores están presentes en esta construcción por impresión 3D, en nuestro caso particular no eran errores relevantes debido al grado de precisión requerido.

Finalmente tendrá influencia, en los valores de las tolerancias, la calibración de la base de impresión. Los autores Stopp, Wolff, Irlinger & Lueth han demostrado en [18] que los errores asociados no dependen únicamente del tipo de calibración que se realice, sino además también de la posición relativa del extrusor respecto de la base.

La utilización de la técnica de FDM para la construcción de componentes estructurales de la máquina de desgaste ha resaltado problemas e inconvenientes. Sin embargo, la simplicidad del método y el amplio rango de aplicación tornan a la manufactura aditiva una herramienta competitiva en el mercado actual [19].

4. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran gran utilidad en el empleo del método de manufactura aditiva para la fabricación de partes componentes de formas complejas en los que se requieran reducir los pesos de los mismos y los costos asociados a materia prima, para este caso particular, con respecto a la fabricación en acero.

Las tolerancias lineales de la impresora empleada pudieron definirse según normas ISO UNI EN 20286-I (1995) y norma DIN 16901.

Se observó que las impresiones en sentido vertical a la base de impresión, coincidentes con la dirección ¨Z¨, introducen errores mayores sobre las piezas fabricadas que los provenientes de los planos paralelos al plano XY.

REFERENCIAS

[1] A. Gebhardt, «Understanding Additive MAnufacturing: Rapid Prototyping, Rapid tooling, Rapid Manufacturing,» Hanser Gardner Pubs. 978-1-56990-507-4.

[2] X. LIU y X. YU, «Potencial Challenges of 3D Printing Technology on Patent Enforcement and Considerations for Countermeasures in China,» 2015.

[3] Y. Kanada, «3D-printing of Generative Art by using Combination and Deformation of Direction-specified 3D Parts,» Beijing, 2014.

[4] E. A. Rebak, M. E. Yasnikowski, C. M. Rodriguez, F. E. Gonzalez y G. A. Tarnowski, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA DE DESGASTE BALL-ON-FLAT MEDIANTE TECNOLOGÍA DE ADICIÓN 3D,» Oberá, Misiones, 2015.

[5] MatWeb, «MatWeb Material Property Data,» [En línea]. Available: http://www.matweb.com/index.aspx.

[6] M. Rossi, «Máquinas-herramientas modernas,» Editorial Dossat, Madrid, 1981.

[7] UNI EN 20286-I (1995) ISO System of Limits and Fits, Bases of Tolerances, Deviations and Fits.

[8] R. Singh, «Process capability analysis of fused deposition modelling for plastic components,» *Emerald Insight,* pp. 69-76, 2013.

[9] R. Singh, «Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components,» *Emerald,* pp. 58-63, 2012.

[10] C. Bell, «Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer,» Apress, New York, 2014.

[11] C. Relvas, A. Ramos, A. Completo y J. A. Simoes, «A systematic approach for an accuracy level using rapid prototyping technologies,» *J Engineering Manufacture,* pp. 2024-2034, 2012.

[12] D. D. Hernandez, «Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing,» *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace,* vol. 2, 2015.

[13] N. Hanumaiah y B. Ravi, «Rapid tooling form accuracy estimation using region elimination adaptive search based sampling technique,» *Emerald,* pp. 182-190, 2007.

[14] D. Dimitrov, W. Van Wijck, K. Schreve y N. De Beer, «Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing,» *Emerald,* pp. 42-52, 2005.

[15] M. Mahesh, Y. S. Wong, J. Fuh y H. T. Loh, «Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes,» *Emerald,* pp. 123-135, 2003.

[16] B. N. Turner y S. A. Gold, «A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness,» *Emerald,* pp. 250-261, 2013.

[17] A. ARION, T. DOBRESCU y N.-E. PASCU, «3D SURFACE MODELLING ASPECTS FOR 3D PRINTING,» Proceedings in Manufacturing Systems, Romania, 2014.

[18] S. Stopp, T. Wolff, F. Irlinger y T. Lueth, «A new method for printer calibration and contour accuracy manufacturing with 3D-print technology,» *Emerald Insight,* pp. 167-172, 2008.

[19] B. T. Wittbrodt, A. G. Glover, J. Laureto, G. C. Anzalone , D. Oppliger, J. L. Irwin y J. M. Pearce, «Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers,» Elsevier, 2013.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Laboratorio de Simulación Numérica y Ensayos Mecánicos (LABSE) por el apoyo en el desarrollo del presente estudio.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EL PROCESO DE ACUÑADO DE MONEDAS. LA INFLUENCIA DEL MATERIAL DEL COSPEL SOBRE LA CARGA DE CONFORMADO

G. Abate [1,2], **B. Parodi** [3], **D. Pérez** [1,2] **y D. Martinez Krahmer**[1,2]

[1] Unidad Técnica Máquinas y Herramientas, INTI-Mecánica
Avda. General Paz 5445, Miguelete, Buenos Aires, Argentina
Correo-e: mkrahmer@inti.gob.ar
[2] Cátedra Tecnología Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora
[3] Unidad Técnica Biomateriales, INTI-Mecánica

RESUMEN

Una regla elemental que debe verificarse en relación al dinero metálico (monedas), es que el valor nominal del mismo (extrínseco) sea mayor al del metal (intrínseco) que lo constituye. De no ser así, saldrá de circulación, o su material deberá ser sustituido.

Para fabricar una moneda de circulación ilimitada se requiere que el metal sea económico, fácil de conformar, con buena resistencia al desgaste y a la corrosión.

En Argentina, las monedas de uso corriente presentan diámetros comprendidos en el rango de 23mm a 25mm. Por esta razón, y de acuerdo con el fabricante alemán de máquinas acuñadoras Graebener, sería necesario disponer de una máquina de 100t para su conformado. Sin embargo, se desconoce cuál sería el efecto sobre la carga de acuñado, cuando se trabajan distintos materiales, a partir de cospeles de igual diámetro. Por tal razón, en este trabajo, tomaremos como base para realizar los estudios de simulación computacional, la moneda de 0,50$. Una revisión de la bibliografía nos muestra que, los materiales empleados para el acuñado son aleaciones tales como: aceros con contenidos de carbono menores al 0,2%; aceros inoxidables al Cr-Ni; bronces y cuproníqueles.

Por tal motivo, hemos realizado distintas estimaciones de carga, tanto por métodos empíricos como por simulación con elementos finitos. Para ello se emplearon cinco materiales diferentes, dos aceros de bajo contenido de carbono y tres aleaciones de cobre (Cobre - Estaño, Cobre – Zinc y Cobre – Zinc – Plomo), todos ellos pertenecientes a la biblioteca de materiales del software Simufact.Forming.

La finalidad buscada fue la de establecer la viabilidad del conformado, utilizando como referencia la carga máxima disponible para el rango de diámetros indicado, por los principales fabricantes mundiales de prensas de acuñado.

Palabras Claves: *Acuñado, moneda, conformabilidad, simulación numérica*

INTRODUCCIÓN

Las primeras monedas fueron acuñadas por el año 652 a.C. Las mismas eran de una aleación de oro y plata, y se acuñaban en caliente mediante un punzón que era golpeado por un martillo. A medida que la demanda de monedas se fue incrementando, el proceso empezó a incorporar maquinaria, con el fin de mejorar la productividad y la calidad de acuñado, con el fin de evitar falsificaciones. Es así que hoy en día existen en el mercado prensas acuñadoras que permiten realizar con altísima precisión hasta 850 monedas por minuto, tanto sobre metales, bimetálicas y hasta algunas compuestas por hasta tres aleaciones diferentes.

Sin embargo la denominada “Ley de Gresham” indica que el valor nominal de la moneda en curso siempre debe ser superior al de su valor intrínseco, lo cual enfrenta a fabricantes al desafío de utilizar materiales más económicos, pero que permitan una buena calidad de grabado para evitar falsificaciones y que a su vez sean factibles de ser acuñados con la maquinaria disponible en el mercado.

En la actualidad es normal el empleo de aleaciones frente a los metales puros, principalmente porque los primeros poseen una mayor dureza, y como consecuencia directa de ello, son más resistentes al desgaste.

Sin embargo, la depreciación de la moneda podría llevar a emplear aleaciones de baja conformabilidad (acero), o de reducida resistencia al desgaste (aluminio), dados sus menores precios relativos.

Dado que en la actualidad, existen fabricantes especializados de los cospeles, las Cecas o Casas de Moneda los adquieren y solamente los acuñan en máquinas especializadas.

En Argentina, las monedas de 0,25$; 0,50$; 1$ y 2$ presentan diámetros comprendidos en el rango de 23mm a 25mm. Por esta razón, y de acuerdo con el fabricante alemán de máquinas acuñadoras Graebener, sería necesario disponer de una prensa de 100t, como es el caso de su modelo MPU 106, con el cual sería posible acuñar monedas de hasta 26mm de diámetro.

Sin embargo, se desconoce cuál sería el efecto sobre la carga de acuñado, cuando se trabajan distintos materiales, a partir de cospeles de un mismo diámetro.

Por tal razón, en este trabajo, tomaremos como base para realizar los estudios de simulación computacional, la moneda de 0,50$.

Una revisión de la bibliografía muestra que, los materiales empleados para el acuñado son aleaciones como ser: acero con contenidos de carbono menores al 0,2% ; aceros inoxidables al

Cr-Ni ; bronces (aleaciones Cu – Sn con porcentajes de cobre comprendidos entre 80% a 95%) ; latones (aleaciones Cu – Zn) y cuproníqueles.

Por otra parte la simulación por elementos finitos de procesos de conformado permite evaluar la factibilidad de producción de piezas desde su etapa de diseño, evitando sobre costos derivados del método de prueba y error, así como los asociados a realizar pruebas en la misma maquinaria de producción.

Por tal motivo, utilizaremos esta herramienta con el fin de efectuar simulaciones empleando al menos cinco materiales comprendidos en los ya indicados, y tomados de la biblioteca del software Simufact.Forming.

1. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

1.1 Esquema de acuñado a representar:

Para la representación por elementos finitos, el esquema de producción seleccionado corresponde al utilizado a nivel nacional para la fabricación de monedas de curso legal y definido en [4].

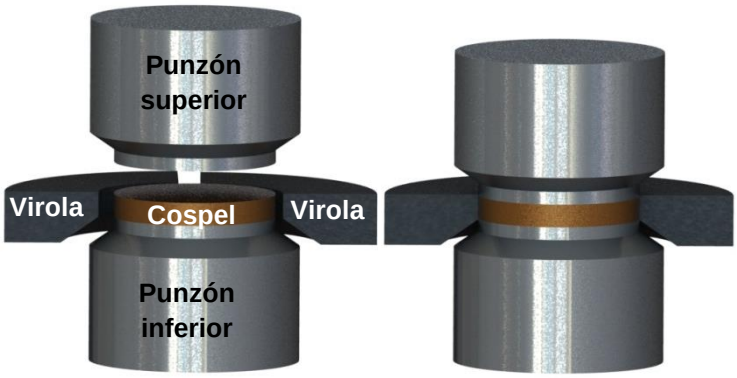


Figura 1: Proceso de acuñado [4]

1.2 Geometría de los punzones y cospeles seleccionados

Para la modelización de los punzones (troqueles según la figura 1), se relevó geométricamente, una de las caras de la moneda de 50 centavos, y se procedió a acuñar dicha imagen en ambas caras del cospel utilizado para la simulación.



Figura 2: Lado de la moneda utilizado para la modelización de los cuños

El diámetro exterior del cospel es de 25,2 mm, con un espesor en la zona a ser deformada de 1,4 mm y un ribete circunferencial que tiene como objetivo restringir el desplazamiento radial del material a conformar.

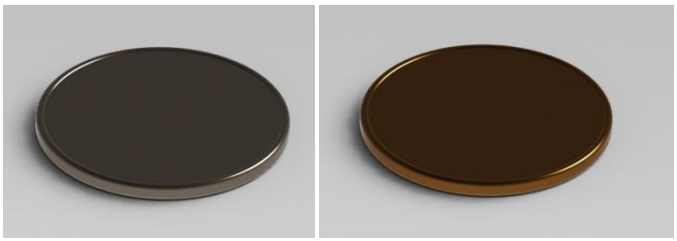


Figura 3: Imagen CAD de los cospeles utilizados durante la simulación

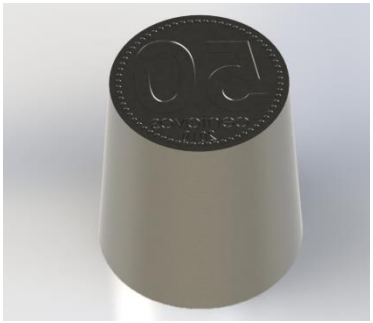


Figura 4: Cuño Modelizado para la simulación

1.3 Esquema de acuñado a Modelizado:

Con los datos de proceso se procedió a reproducir la secuencia de acuñado del cospel. En la figura siguiente se puede observar el modelizado del conjunto previo a realizar la simulación del proceso de deformación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

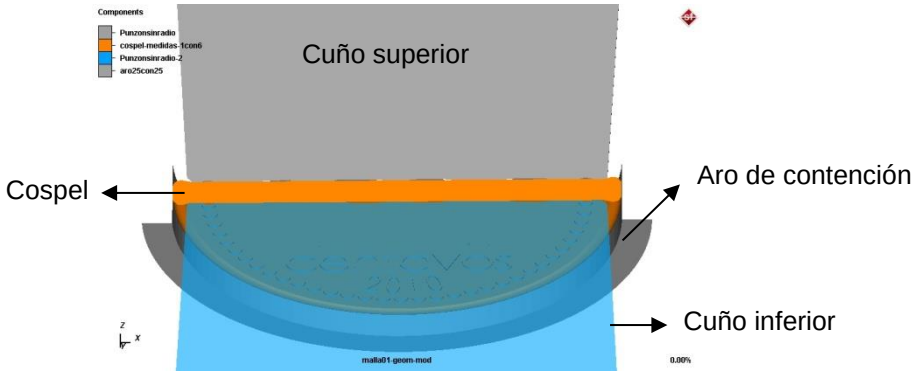


Figura 5: Modelo utilizado para la simulación

1.4 Maquinaria a utilizar en el modelo:

Tomando como referencia a Muñiz García [4], en la actualidad existen dos fabricantes referentes mundiales de acuñadoras; las empresas alemanas Graebener y Schüler, ambas especializadas en la fabricación de monedas en serie de curso legal. Según el citado autor, estas prensas poseen una productividad de alrededor de 750 piezas por minuto, con capacidades de hasta 200 t.

En nuestro caso particular hemos seleccionado la prensa Graebener MPU 106, preparada para acuñar monedas de hasta 26 mm de diámetro y con una capacidad máxima de 1000 kN, equivalentes a 100 t.



Figura 6: Imagen de una prensa Graebener para acuñado [5]

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1.Características técnicas de la prensa seleccionada [5]

	MPU 106	MPU 156	MPU 206	MPU 306
Capacidad máx. (kN)	1000	1500	2000	3000
Diámetro máximo (mm)	26	32	38	46
Golpes por minuto (min^{-1})	850	750	650	500
Fuerza del extractor (kN)	30	30	50	50
Capacidad del motor (kW)	15	15	22	30

1.5 Materiales a evaluar:

Como características principales para poder ser deformados en frío, los materiales sometidos a un proceso de acuñado deben poseer: buena capacidad de deformación plástica, (a fin de no sufrir fisuras durante el proceso y para poder obtener una buena calidad de conformado), y una baja resistencia a la deformación. Esta última influye principalmente en la carga de conformado, lo que deriva inevitablemente en la capacidad necesaria de la acuñadora utilizada, e indirectamente en la duración de los cuños empleados.

En este sentido, a mayor resistencia a la deformación del material, mayor será la presión necesaria para lograr la deformación buscada, y en consecuencia, las tensiones sufridas por el herramental aumentarán, disminuyendo su vida útil. Es por esto que las aleaciones de Cobre son usadas ampliamente como material para la fabricación de cospeles destinados para el acuñado de monedas. Sin embargo, y recordando la "Ley de Gresham", con el fin de reducir costos, es cada vez más habitual el empleo de acero como material alternativo.

Tabla 2.Materiales utilizados en la simulación

Aceros	Aleaciones base Cu
SAE 1006	CuZn15
SAE 1020	CuZn30
	CuZn39Pb2

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Cargas de acuñado provenientes de bibliografía:

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tal como lo expresa H. Tschaetsch[8], la carga de acuñado no sólo depende del diámetro de la moneda, y del material a acuñar, sino que también influye significativamente sobre ella la profundidad del acuñado. Tanto es así que, dentro de los valores de resistencia al acuñado, define específicamente uno para ser empleado en el acuñado profundo. Con estos valores se han determinado las cargas empíricas de acuñado para tres tipos de materiales diferentes. Los mismos se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 3.Valores empíricos para la carga de acuñado de monedas de 25mm de diámetro

Material	**Resistencia al acuñado (kg/mm^2) [8]**	**Fuerza de acuñado (t)**
Latón	150 – 180	74 – 88
Cobre	80 – 100	39 – 49
Acero	120 – 150	59 – 74

2.2 Resultados del relevamiento de la profundidad de grabado:

Previo a la simulación computacional y con el fin de estimar la profundidad del grabado, se relevó la superficie correspondiente al número de la moneda. De acuerdo con las mediciones realizadas, el acuñado presenta una profundidad máxima aproximada de 80µm.

En las figuras siguientes se muestran sucesivamente, una imagen de la cara con el grabado de 50 centavos, con la indicación de los puntos relevados, y un gráfico con las diferencias de altura observadas sólo para el grabado correspondiente al número 50.

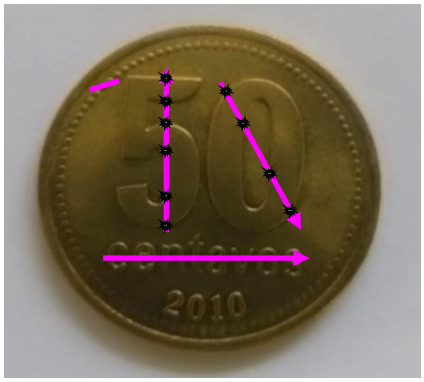


Figura 7: Puntos relevados de la cara de la moneda de 0,50$

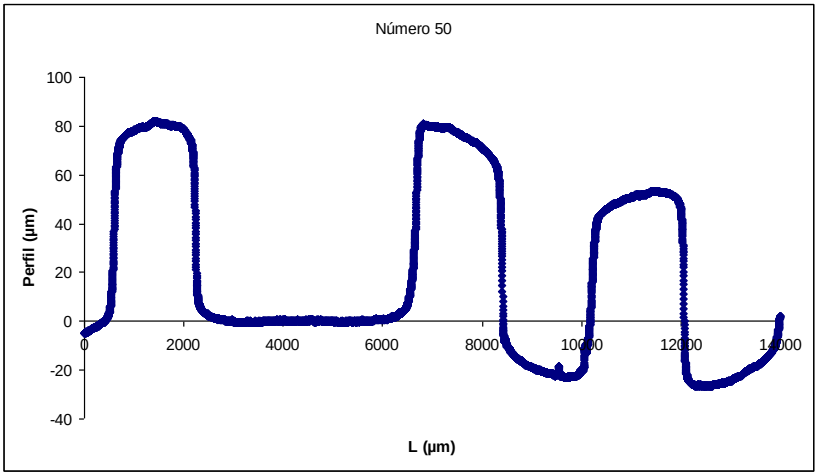


Figura 8:Profundidades determinadas de acuerdo al relevamiento de la figura anterior

2.3 Simulación numérica del proceso de acuñado:

Se analizaron cinco materiales para el cospel, seleccionados de la librería del software Simufact.Forming:

1) Tres aleaciones base cobre.

2) Dos acerosde bajo carbono.

2.3.1 Cospeles de acero:

A continuación se muestra el proceso de deformación para los cospeles de acero obtenidos mediante simulación por elementos finitos del proceso de acuñado:



Figura 9: Resultados geométricos del conformado del cospel de acero

Existe una herramienta dentro del software de simulación que permite visualizar que zonas del material tomaron contacto con la superficie de la matriz. A partir de ella, se pudo establecer que, para alcanzar la profundidad de grabado, el recorrido del punzón superior debe ser de 0,1 mm a partir del primer contacto.



Figura 10: Contacto cuño-cospel al inicio y a 0,1 mm de carrera de deformación

Tomando como profundidad del grabado el valor antes determinado, se obtuvo que las cargas necesarias resultaron:1) para el acero SAE 1006de 87 t, y 2) en el SAE1020 de 109t. Los diagramas de carga superpuestos se aprecian en la figura siguiente:



Figura 11: Cargas de acuñado para los cospeles de acero SAE 1006 y SAE 1020

2.3.2 Cospeles de aleación base cobre:

A continuación se muestra el proceso de deformación para los cospeles de aleación base cobre, obtenido mediante simulación por elementos finitos del proceso de acuñado:

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 12: Resultados geométricos del conformado del cospel de aleación base cobre

Al igual que para el caso de los cospeles de acero, para lograr la profundidad de grabado fue necesario que el recorrido del punzón superior, a partir del contacto con el material, recorra 0,1 mm. Tomando como profundidad del grabado el valor antes determinado, se obtuvo que las cargas necesarias resultaron; para la aleaciónCuZn15 de unas 65 t, CuZn30 de 70t y CuZn39Pb2 de 75t, tal como se aprecia en la figura siguiente:

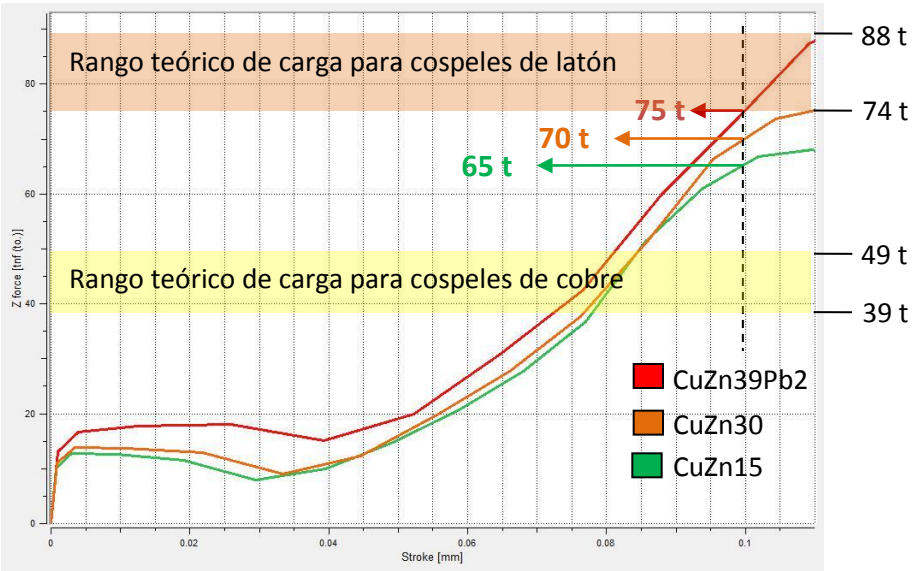


Figura 13: Cargas de acuñado para los cospeles base Cobre

2.4 Comparación entre valores teóricos de carga y simulados:

Se puede inferir al observar la figura 11 que, la carga obtenida mediante simulación aumenta conforme se incrementa el porcentaje de carbono del acero, como también la profundidad del acuñado. Por otra parte, los valores teóricos muestran un rango de cargas sensiblemente inferior. Las zonas de coincidencia para los valores de carga simulados en relación a los teóricos se presentan entre los 0,07 mm y 0,085 mm de recorrido del cuño.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En cuanto a la figura 13, la carga obtenida mediante simulación computacional aumenta al incrementar el porcentaje de Zinc en la aleación, como así también, con la profundidad de acuñado. Por otra parte, los valores teóricos muestran un rango de cargas para cobre sin alear sensiblemente inferior, mientras que para Latón (CuZn) los valores de carga son mayores.

3. CONCLUSIONES

Los valores de obtenidos por simulación muestran que, para la acuñadora seleccionada (de capacidad nominal máxima 100t), los cospeles realizados en acero SAE 1020 están por fuera de su capacidad nominal.

Las cargas de acuñado son especialmente sensibles, en un cospel de acero, al porcentaje de carbono, mientras que en uno base cobre, al porcentaje de Zinc de la aleación.

En cuanto a la elección de materiales para cospeles por su costo y factibilidad de conformado, si bien con excepción del acero 1020, todas las aleaciones estuvieron por debajo de la carga nominal de la acuñadora seleccionada, en la toma de decisión sobre el material de cospel a utilizar, es imprescindible analizar previamente, la influencia del aumento de carga en la durabilidad del cuño.

Los valores de carga obtenidos mediante el uso de bibliografía, deben considerarse sólo a modo orientativo, por cuanto no tienen en cuenta en forma precisa ni la profundidad de acuñado, como tampoco las variaciones de los elementos en la aleación que describen.

4. REFERENCIAS

[1] B. Muñiz García, *Fabricación de la moneda a través de los tiempos,*www.bencoins.com , Versión revisada Enero 2012.

[2] J. Rodrigues et al, *A new type of bimetallic coin*, 1996.

[3] J. Rodrigues et al, *Theoretical and experimental development of an industrial process forminting bimetallic foiled coins*, EPMESC VII - International Conference on Enhancement, Practice and Promotion of Computation al Methods in Engineering, Macau, China; 1999.

[4] B. Muñiz García, *Metales empleados en las monedas*, www.bencoins.com , Versión revisada Junio 2015.

[5]www.graebener-minting.com/munzpragepressen.

[6]www.schulergroup.com/major/us/branchen/minting.

[7]www.mscsoftware.com/product/simufact.

[8] H. Tschaetsch, *Metal forming practice*, Springer Verlag, Berlin, Alemania, 2006.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO COMPUTACIONAL Y PROTOTIPADO DE UN ILUMINADOR UNIFORME UTILIZANDO DIODOS LED

Guillermo O. Larregay[1], Federico L. Pinna González[2], José A. Cuello[3] y O. Daniel Morán[4]

[1,2,3,4] Laboratorio de Mecatrónica – Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de San Luis
25 de Mayo 384, Villa Mercedes, San Luis, Argentina
[1] correo-e: golarregay@unsl.edu.ar [2] correo-e: fpinna@unsl.edu.ar
[3] correo-e: jacuello@unsl.edu.ar [3] correo-e: dmoran@unsl.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad de iluminar de forma uniforme un tablero de ajedrez para una aplicación de visión artificial con un robot antropomorfo de características industriales.

Para lograr el objetivo de que la iluminación sea uniforme, en primer lugar se utilizó un modelo teórico de la curva de iluminación de cada diodo LED, y en base a esta curva se diseñó un algoritmo genético que busca la mejor orientación de cada diodo mediante técnicas heurísticas para distribuir correctamente la iluminación media sobre la superficie.

Una vez encontrada una distribución lo suficientemente buena para la aplicación, el mismo algoritmo crea, utilizando el lenguaje de código abierto OpenSCAD, un modelo 3D de un soporte donde se montarán los LEDs de acuerdo a la orientación obtenida anteriormente. Este modelo tridimensional se exporta a formato STL y finalmente se construye un prototipo en plástico ABS utilizando una impresora 3D para luego evaluar su desempeño.

Se concluye que la metodología utilizada permite un diseño flexible y un prototipado rápido para la creación de un iluminador uniforme con diodos LEDs. Además, los algoritmos implementados se pueden modificar fácilmente para otros requisitos de iluminación o para superficies no planas.

Palabras Claves: *Iluminación, diseño, impresión 3D, prototipado.*

1. INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA), Universidad Nacional de San Luis (UNSL), se desarrolló un sistema que permite a una persona jugar un partido de ajedrez contra un robot antropomorfo ABB modelo IRB-120 de seis grados de libertad, de forma autónoma. Este sistema cuenta con una cámara y utiliza técnicas de visión artificial para detectar los movimientos llevados a cabo por el jugador humano.

Muchos autores [1-6] están de acuerdo en que, para la correcta implementación de un sistema de visión computarizado, es necesario que la iluminación sea uniforme sobre el plano de trabajo. Para este fin se han desarrollado iluminadores de diodos LED con lentes de formas arbitrarias [2], con arreglos de lentes [5], con guías de onda calculadas para las longitudes de onda ópticas [4] o con reflectores específicos para uniformidad de color [6]. Todos estos métodos tienen como inconveniente la dificultad de evaluar la configuración de iluminación, ya que la construcción de lentes, reflectores y guías de onda no está al alcance de una persona, tanto en costo como en tiempo de espera.

Otros autores optan por variar la ubicación de cada LED en el iluminador para lograr el objetivo [3]. El presente trabajo toma como base esta idea, ya que es mucho más simple para hacer un prototipo de iluminador utilizando una impresora 3D y posteriormente evaluar su desempeño en cuestión de minutos.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL

A diferencia de los trabajos citados anteriormente, en el caso de esta implementación se ha optado por establecer una ubicación fija para cada diodo LED en el iluminador y variar la orientación de cada uno de ellos, de tal forma que cada uno apunte a un lugar diferente sobre la superficie de trabajo. Este método tiene como objetivo diseñar un soporte impreso en 3D sobre el que se colocarán los diodos LED, y que será montado alrededor de la cámara, junto al gripper del robot, tal como se muestra en la figura 1.

Se utilizó una aproximación Lambertiana al modelo de iluminación de los diodos, que si bien no es exacta, es lo suficientemente buena para la aplicación. El cálculo de la orientación de cada LED se realiza de forma computacional utilizando el paquete de software libre Octave, donde se implementó un algoritmo genético [7] para crear y evaluar diferentes configuraciones de orientación, y mejorándolas entre generaciones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El proceso de diseño y posterior impresión 3D del soporte del iluminador se hace también de forma autónoma, mediante el lenguaje de programación y modelado 3D de código abierto OpenSCAD, y utilizando herramientas libres tales como Cura o Slic3r para el *slicing* del modelo y la posterior generación de código G específico para la impresora, una Prusa i3 Steel con firmware Marlin.

En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo del proceso completo de creación de una configuración de iluminador. En rojo se indica el software utilizado en cada sección, mientras que en azul se destacan los pasos del algoritmo genético explicado en la sección 4.



(a) (b)

Figura 1: (a) Ubicación de la cámara junto al gripper del robot. (b) Detalle del iluminador montado alrededor de la cámara.

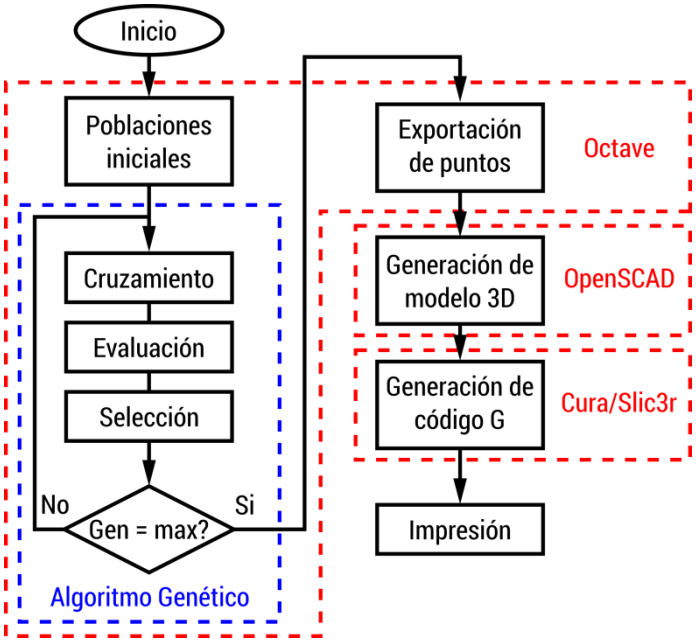


Figura 2: Esquema del proceso de diseño e impresión del iluminador

3. MODELADO DE LOS DIODOS LED

Como se dijo anteriormente, si bien un diodo LED no es una fuente Lambertiana perfecta debido a que no es una fuente puntual de luz, y además no es coherente, se puede aproximar el modelo de iluminación de un LED mediante una ecuación Lambertiana [1] de la forma mostrada en la ecuación (1), ya que la zona de emisión de fotones es muy pequeña comparada con la distancia al objeto a iluminar.

$$E(r,\theta) = E_0(r)\cos^m\theta \tag{1}$$

En la ecuación (1) la expresión $E_0(r)$ representa la irradiancia del LED en el eje $\theta = 0$, a una distancia r del diodo, y el valor del exponente m depende del ángulo de iluminación del diodo de acuerdo a la ecuación (2).

$$m = -\frac{\ln(2)}{\ln\left(cos\left(\theta_{\left(\frac{1}{2}\right)}\right)\right)} \tag{2}$$

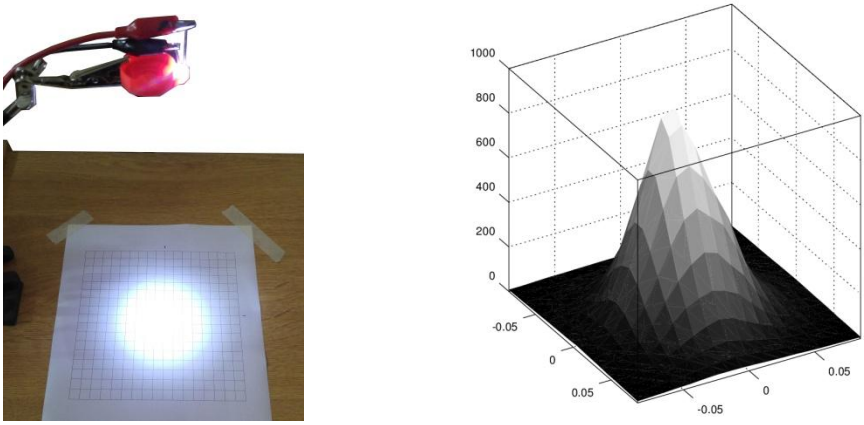
En teoría, tanto el valor de E_0 y el valor de m vienen especificados en las hojas de datos del fabricante de diodos LED. Sin embargo, tras numerosas pruebas se determinó que los valores provistos por estas hojas de datos no son exactos, y estas variaciones afectan al modelo de iluminación calculado. Para evitar este problema, se decidió tomar mediciones de los valores de iluminancia de un diodo y extraer de estos datos unos valores de E_0 y m más exactos, utilizando un luxómetro en cada uno de los puntos de una matriz ubicada sobre un plano a una distancia conocida del LED, tal como se puede ver en la figura 3a. La iluminancia medida en cada punto se muestra en la figura 3b, y ejecutando un algoritmo de ajuste de superficie sobre estos datos, se obtuvieron los valores necesarios, $E_0 = 63.81$ y $m = 6.767$.

Es importante destacar que, debido a que la intensidad lumínica de un LED varía en función de la corriente que circula por el mismo, se utilizó una fuente de laboratorio calibrada para hacer circular una corriente constante en el proceso de medición. Esta corriente debe coincidir también con la que se utiliza sobre el iluminador completo una vez impreso y montado sobre el robot.

Una vez obtenido el modelo de los diodos LED utilizados, se debe calcular la iluminancia sobre el tablero de ajedrez. Para esto se utiliza la ecuación (3) de componente horizontal de la iluminación de una fuente puntual, y se suma, para cada punto del tablero, la iluminación de cada uno de los diodos del iluminador.

$$E_H = \frac{I\cos^3\alpha}{h^2} \tag{3}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7



(a) (b)

Figura 3. (a) Configuración para la medición de iluminancia. (b) Valores medidos en cada punto

Este algoritmo se implementó en una función dentro del entorno Octave, para poder evaluar los niveles de iluminación de cada configuración de diodos generada. Entre los datos evaluados están los niveles mínimo, máximo y medio de iluminancia, y el error medio cuadrático entre la iluminancia de cada punto y la media.

Como el objetivo del trabajo es lograr una iluminación uniforme sobre el plano del tablero de ajedrez, una buena configuración de iluminador debería tener un valor medio de iluminancia lo más alto posible, y un error medio cuadrático lo más bajo posible. Además, por una cuestión de diseño, se decidió utilizar 36 diodos LED en el iluminador, ubicados en tres círculos concéntricos, como muestra la figura 4.

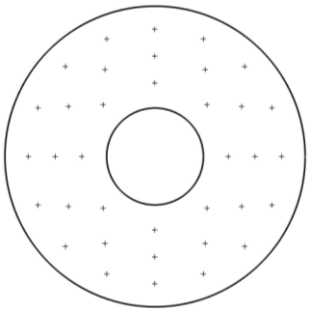


Figura 4. Esquemático del iluminador, donde cada LED está señalado por un punto.

4. ALGORITMO GENÉTICO

Un algoritmo genético es un modelo computacional de optimización que usa operadores de combinación y selección para generar nuevos puntos de búsqueda sobre un espacio de soluciones [8]. Estos algoritmos, inspirados en la evolución y en la selección natural, buscan soluciones

heurísticas mínimas, en términos de una función de evaluación, a un problema determinado. Las funciones de evaluación se aplican sobre cada “cromosoma”, que representa, en el caso del presente trabajo, a una configuración determinada de orientaciones de los diodos LED del iluminador.

Para implementar un algoritmo genético se necesita una población inicial, una función de evaluación y una función de recombinación (o descendencia) entre elementos de la población [7].

De las 15 poblaciones iniciales del presente trabajo, 5 se generaron de forma arbitraria, y las 10 restantes de forma aleatoria. Las poblaciones iniciales arbitrarias se muestran en la figura 5. Es importante destacar que estas poblaciones iniciales representan los puntos sobre el tablero de ajedrez a los que apunta cada uno de los LEDs del iluminador ubicado en la cámara.

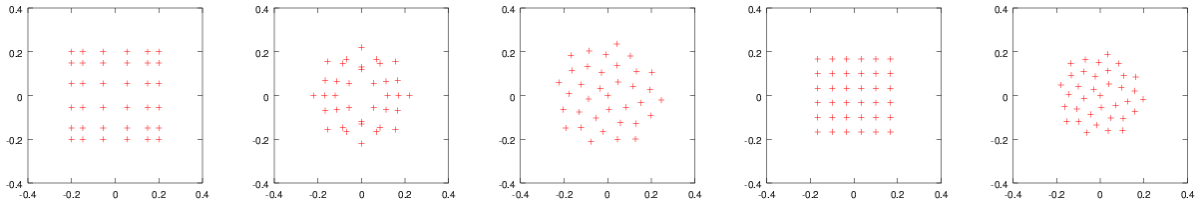


Figura 5. Algunas poblaciones iniciales del algoritmo genético

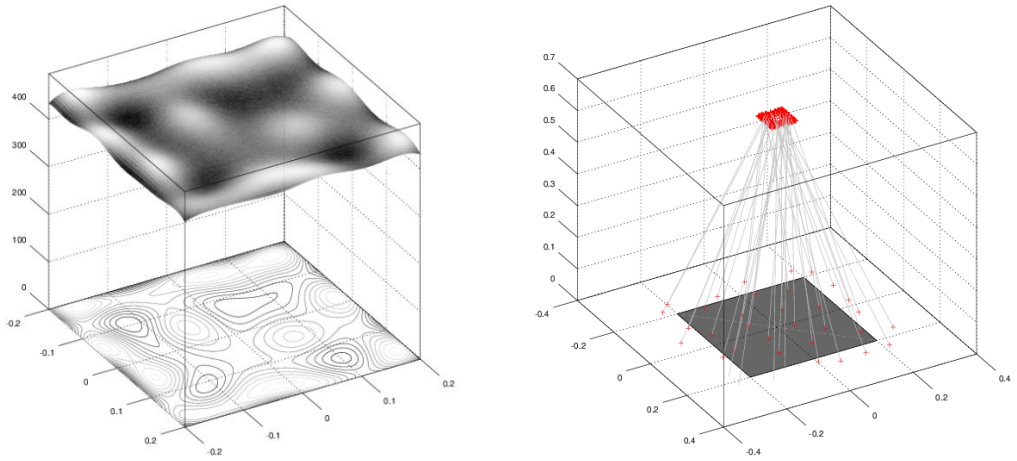
Teniendo en cuenta que en este trabajo la variación de los niveles de iluminación sobre la superficie del tablero de ajedrez se lleva a cabo cambiando la orientación de cada LED (es decir, la dirección en la cual ilumina), un conjunto de orientaciones en particular puede evaluarse mediante una función que tenga en cuenta los valores de iluminancia máxima y mínima sobre el plano del tablero.

La recombinación o descendencia de dos configuraciones se calcula como el promedio entre las coordenadas de los puntos de igual índice de ambas configuraciones, y se le añade un valor aleatorio para evitar que todas las soluciones sean combinaciones lineales de las iniciales.

El algoritmo se ejecuta, de acuerdo a los pasos marcados en azul de la figura 1, por una cierta cantidad de generaciones. En el caso de este trabajo, se calcularon 10000 generaciones, sin embargo, es posible establecer criterios de parada basados en la uniformidad de la distribución de luz, o en un tiempo máximo de ejecución del algoritmo.

La mejor distribución encontrada por el algoritmo en esta ejecución se muestra en la figura 6a. La relación entre la iluminación mínima y la máxima en esta configuración es de 1.0472, es decir, de menos del 5%. En la figura 6b se muestra, en forma de puntos, la ubicación de los LED del iluminador y los destinos sobre el tablero a los que apunta cada uno de ellos.

ISBN: 978-987-1676-63-7



(a) (b)

Figura 6. (a) Niveles de iluminación sobre el tablero de ajedrez. (b) Orientación de cada diodo LED

5. GENERACION DEL MODELO 3D

Una vez obtenida una distribución lo suficientemente buena, se exportan a un archivo de texto las coordenadas de la ubicación de los diodos LED en el iluminador y las coordenadas de los puntos sobre el tablero a los que apunta cada diodo. Posteriormente, se importan estos puntos en un script de OpenSCAD que se encarga de generar el soporte de los diodos, calculando la orientación espacial de cada diodo, y generando agujeros tridimensionales donde irá montado cada LED. En este paso también es posible especificar la forma con la que se creará el soporte. En la figura 7 se muestra una captura de pantalla del software OpenSCAD con el modelo del iluminador cargado, mientras que en la figura 8 se muestran algunos soportes impresos con formas y configuraciones diferentes para la evaluación de cada una de ellas.

Si bien el lenguaje de programación y modelado de OpenSCAD tiene una curva de aprendizaje empinada, es una excelente opción a la hora de generar programáticamente piezas tridimensionales, ya que se puede especificar exactamente y de forma textual cada una de las dimensiones de las partes.

OpenSCAD entrega como salida un modelo tridimensional del soporte, y lo exporta en el formato STL (stereolitography), un estándar en el ámbito del diseño 3D. Este archivo exportado se envía a un *slicer*, que es el programa encargado de crear el código G para el control de la impresora 3D. Siguiendo con la idea de aplicar software libre en la totalidad del proceso, se decidió por utilizar los

paquetes de software Cura y Slic3r. En la figura 9 se muestra una captura de pantalla del software Cura, generando el código G para la impresora.

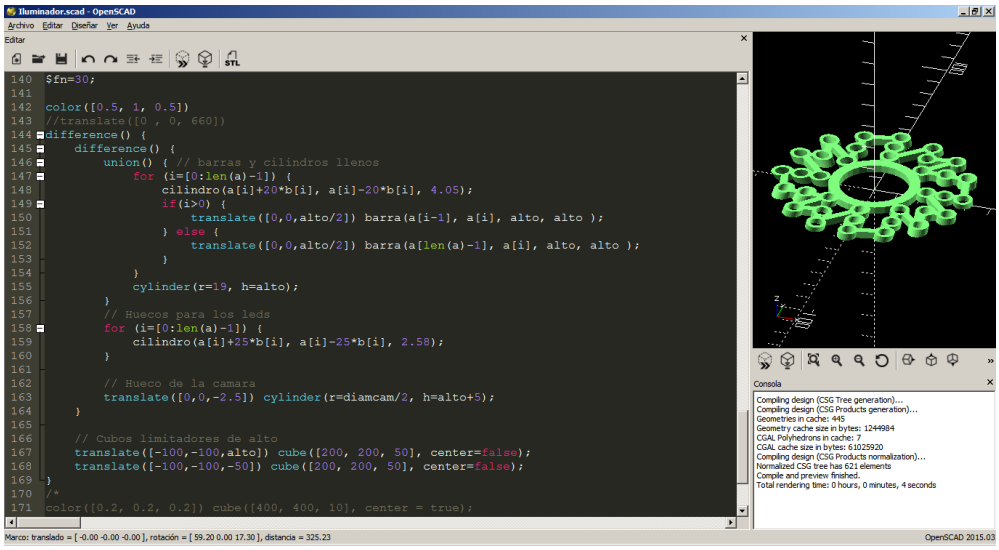


Figura 7. Script de OpenSCAD que genera el modelo 3D del iluminador

Para los prototipos creados en el laboratorio se estableció como objetivo el menor tiempo de impresión posible, para lograr una evaluación rápida del modelo. Por lo tanto la configuración de altura de capa y de velocidad de impresión son relativamente altas. Sin embargo, una vez que el prototipo tiene un buen desempeño, se vuelve a imprimir con mayor calidad.

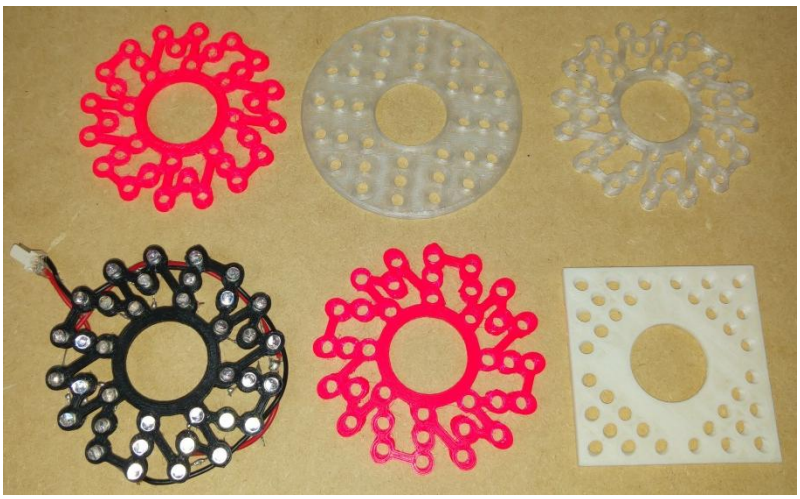


Figura 8. Algunos modelos de soporte para los diodos impresos en 3D.

ISBN: 978-987-1676-63-7

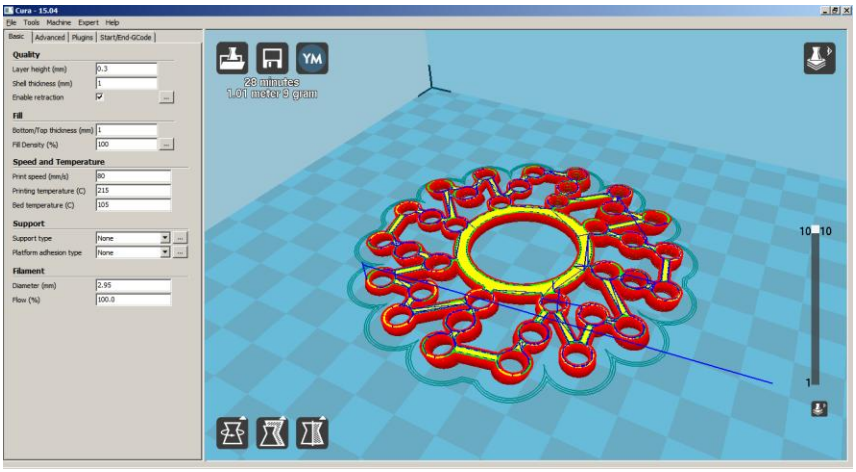


Figura 9. Software Cura, encargado de la generación del código G para la impresora.

Luego de finalizada la impresión, se montan los diodos sobre el soporte, y este sobre la cámara para la evaluación de la iluminación. Si bien el software de visión artificial encargado de la detección de piezas realiza ciertas correcciones sobre la imagen para mejorar su calidad, se demostró que se obtienen mejores resultados cuando el tablero está iluminado de manera uniforme.

6. CONCLUSIONES

Se implementó y evaluó un sistema de cálculo de iluminadores LED uniformes utilizando algoritmos genéticos, y modelos estándar de iluminación. Esto tiene aplicaciones inmediatas en lo que respecta a los trabajos de visión artificial llevados a cabo en el Laboratorio de Mecatrónica.

Se estableció un flujo de trabajo para obtener prototipos físicos de iluminadores de bajo costo en plazos cortos, del orden de decenas de minutos, gracias a la fabricación con impresora 3D. Debido a esto se pueden fabricar y evaluar diferentes configuraciones de iluminadores para necesidades específicas, sin depender de un proceso de fabricación externo.

7. TRABAJOS FUTUROS

Como posibles trabajos a futuro, se mencionan: la posibilidad de mejorar el modelo de iluminación para tener en cuenta la reflectividad de la superficie de trabajo, y la generalización del método para iluminar uniformemente superficies no planas, de formas arbitrarias.

Además, se tiene la intención de mejorar el tiempo de ejecución del algoritmo migrando de la plataforma Octave a un software específico desarrollado en lenguaje C++. Esto está actualmente en desarrollo en el Laboratorio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

8. REFERENCIAS

[1] Wu, Feng-tie and Huang, Qi-lu. *A precise model of LED lighting and its application in uniform illumination system*. Optoelectronic Letters, Volume 7, Number 5, pp 334-336, 2011.

[2] Yi Ding, Xu Liu, Zhen-rong Zheng, and Pei-fu Gu. *Freeform LED lens for uniform illumination*. Optoelectronics Express, Volume 16, pp 12958-12966, 2008.

[3] Moreno, Iván. *Configurations of LED arrays for uniform illumination*. 5th Iberoamerican meeting on Optics, Lasers and their applications. Proceedings of SPIE Volume 5622, pp 713-718, 2004.

[4] Gu, Yimin and Narendran, Nadarajah. *Design and evaluation of an LED-based light fixture*. Third international conference on solid state lighting. Proceedings of SPIE Volume 5187, pp 318-329. 2004.

[5] Whang, Allen; Chen, Yi-Yung and Teng, Yuan-Ting. *Designing Uniform Illumination Systems by Surface-Tailored Lens and Configurations of LED Arrays*. Journal of Display Technology, Volume 5 Issue 3, pp 94-103. 2009.

[6] Zhu, Zhen-min; Qu, Xing-hua; Jia, Guo-xin and Ouyang, Jian-fei. *Uniform Illumination Design by Configuration of LED Array and Diffuse Reflection Surface for Color Vision Application*. Journal of Display Technology, Volume 7 Issue 2, pp 84-89. 2011.

[7] Goldberg, David, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley Professional, 1989.

[8] Whitley, David. *A genetic algorithm tutorial*. Statistics and computing, Volume 4, Number 2, pp 65-85. 1994.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE UM AÇO INOXIDÁVEL UTILIZANDO A MOAGEM DE ALTA ENERGIA E COM ADIÇÃO DE CARBETOS

C. S. P. Mendonça [1] **V. D. Oliveira** [1] **A. N. O. Dias**[1] **M. R. Silva** [1] **V. A. R. Santos**[2]

M. L.N.M. Melo[1] **G. Silva**[1]

[1] Universidade Federal de Itajubá.
Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho. Itajubá- Minas Gerais, Brasil.

correo-e: claudiney.sales@unifei.edu.br; valescadooliveira@yahoo.com.br; aottoboni@yahoo.com.br; mrsilva@unifei.edu.br; vanderalkmin@gmail.com; mirianmottamelo@unifei.edu.br; gilbert@unifei.edu.br;

[2] Departamento de Engenharia Civil– Centro Universitario de Itajubá-FEPI.
Av. Dr. Antônio Braga Filho, 687 - Porto Velho, Itajubá - Minas Gerais, Brasil.

correo-e: vanderalkmin@gmail.com.

RESUMO

Os aços inoxidáveis duplex são materiais de grande aplicação no setor industrial, devido a sua elevada resistência à corrosão e resistência mecânica; sendo sua microestrutura constituída por duas fases distintas: ferrita e austenita. Componentes de aço inoxidável produzidos por metalurgia do pó constituem um segmento importante e crescente na indústria. Para melhorar as propriedades mecânicas dos aços produzidos por metalurgia do pó, a criação de um compósito metálico-cerâmica, com adição de carbetos como reforços, é vantajosa. Este trabalho tem como objetivo a produção de um aço inoxidavel duplex por metalurgia do pó através do reaproveitamento de cavacos com adição de carbetos. A moagem de alta energia foi realizada num moinho de alta energia durante o tempo de 20 horas em atmosfera de argônio, numa rotação de 350 rpm e relação de massa/bola de 1/15. Neste trabalho foi realizado um estudo das propriedades magnéticas das amostras utilizando um Magnetômetro de Amostra Vibrante. A análise granulométrica e a microscopia eletrônica de varredura foram usadas na caracterização e identificação do tamanho de partícula. A técnica de difração de raios X foi utilizada na identificação das fases antes e após o processo de moagem. Com a adição de carbetos no processo de moagem observou-se uma diminuição do tamanho médio das partículas em comparação com o material sem adição de carbetos. Com o aumento do tempo de moagem foi observado o aumento dos valores de magnetização de saturação (MS) e conseguentemente da quantidade de fase ferromagnética; Na moagem de 20 horas os valores de MS foram menores para amostras submetidas à moagem com adição de carbetos. A deformação plástica acarretou mudanças nos picos de difração de raios x, que podem estar relacionadas com uma possível transformação de fase induzida por deformação.

Palavras Chaves: *Aço inoxidável. Moagem de alta energia; tamanho de partículas; magnetização de saturação; Carbeto.*

1. INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis duplex e superduplex são caracterizados por uma estrutura de duas fases, constituído de quantidades aproximadamente iguais de ferrita e austenita. A fase ferritica é responsável pelo aumento da resistência, enquanto austenita assegura a dureza e melhor resistência à corrosão [1-4].

O processo de obtenção destes aços por fundição é bastante difícil, devido ao fato da metalurgia física desses sistemas ser complexa. A microestrutura dúplex pode ser obtida através do balanceamento dos elementos de liga e de tratamento termomecânico [5]. O balanceamento dos elementos de liga, nos aços inoxidáveis dúplex tem, por objetivo, controlar os teores de elementos estabilizadores de austenita, ou gamagênicos, tais como níquel, carbono, nitrogênio e de elementos estabilizadores da ferrita, ou alfagênicos, cromo, molibdênio e silício. Esses elementos constituem a composição química dos dúplex. O tratamento termomecânico é, usualmente, realizado em temperaturas entre 1000°C e 1250°C. Nessa faixa de temperatura, os aços inoxidáveis apresentam um comportamento muito próximo do equilíbrio estável e metaestável, produzindo uma estrutura lamelar com grãos alongados na direção de laminação e composta por uma matriz ferrítica com ilhas de austenita [6].

O aumento dos custos da matéria-prima utilizados nos processos de fabricação, e o aumento dos custos de energia verificados nos últimos anos têm levado os pesquisadores a desenvolver novos métodos que permitam reutilizar os cavacos de usinagem como matéria-prima barata para fabricar componentes mecânicos. A reutilização dos materiais recicláveis tem como principais objetivos a minimização dos impactos ambientais e racionalização das cadeias energéticas [7].

Tem sido crescente a aplicação de metalurgia do pó (MP) para a produção de peças de ligas resistentes à corrosão [8]. Brytan e colaboradores (2009), obtiveram aço inoxidável duplex a partir de pó de aço inoxidável ferrítico (16,86% Cr, 1,15% Si, 0,18% Mn, 0,02% C) com adição controlada de pós dos elementos, sintetizaram a 1250°C num forno a vácuo com uma atmosfera de argônio [9]. Yonekubo (2010) obteve um aço inoxidável superdúplex partindo de cavacos de usinagem de uma chapa de um aço superduplex UNS S32250, através da moagem de alta energia, realizada com moinhos do tipo Spex, Attritor e Planetário [10]. A técnica de processamento de pós por moagem de alta energia (MA) permite a obtenção de materiais mais homogêneos [11].

Apesar dos aços inoxidáveis duplex apresentarem um bom desempenho em serviço, sob efeito de temperatura podem formar a fase frágil sigma a partir da fase ferrita [2-12] e quando submetidos à

ISBN: 978-987-1676-63-7

deformação plástica a frio podem apresentar a formação da fase martensítica induzida pela deformação a partir da fase austenítica [13-14]. A moagem de alta energia gera uma severa deformação plástica podendo acarretar mudanças na microesturura do material com uma possivel transformação da martensita induzida por deformação.

Neste sentido, estudos que tornem estes aços inoxidáveis mais estáveis são relevantes. Neste trabalho, o objetivo é a obtenção de aço inoxidável duplex, via metalurgia do pó, a partir de cavacos do aço e com a adição de carbeto de nióbio para a produção de um compósito de metal-cerâmico. Visto que, carbonetos metálicos apresentam propriedades importantes, como estabilidade em alta temperatura, dureza elevada, boa condutividade elétrica e térmica [15-16]. Após a obtenção do aço inoxidável duplex e da produção do compósito metal-cerâmico, isto é, o aço duplex com carbeto de nióbio foi avaliado: as microestruturas, as fases formadas e as propriedades magnéticas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizados cavacos de um aço inoxidável duplex UNS S31803 como material de partida, com composição apresentada na Tabela 1. Foram adicionados na moagem 3% de carbetos de nióbio (NbC) com tamanho inicial entre 5 μm e 15 μm adquirido da empresa Hermann C. Starck.

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável duplex UNS S31803.

%C	%Cr	%Mn	%Ni	%Mo	%Si	%Co	%Cu	%Fe
0,018	22,200	1,480	5,590	3,080	0,450	0,130	0,280	66,500

Utilizou-se um moinho de alta energia da marca Noah-Nuoya modelo NQM 0,2L. A velocidade de moagem foi de 350 rpm e a relação de massa/bola é de 1/15, a moagem foi realizada durante o tempo de 5 e 20 horas com atmosfera de argônio para evitar a oxidação dos pós.

Para a determinação e identificação das fases antes e depois da moagem utilizou-se um difratômetro de raios X marca Panalytical, modelo X'Pert Powder, com radiação de cobalto, tensão 40 kV e corrente 40 mA. O ângulo de varredura 2θ foi de 45° à 130° e passo de 0,02° por segundo.

Para a determinação e distribuição dos tamanhos de partículas utilizou-se um analisador de tamanho de partícula da marca Malvern Mastersizer modelo 2000. Para a caracterização da morfologia, identificação dos tamanhos e distribuição de partículas utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura da marca Carl Zeiss e modelo EVO MA15, modo elétrons secundários.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A caracterização magnética foi realizada em um Magnetômetro de Amostra Vibrante de marca Lake Shore modelo VSM 7404. A quantidade de fase ferromagnética, obtida em função da magnetização de saturação, foi obtida através da formula desenvolvida por Tavares, et. Al.(2006) [14].

$$C_{\alpha} = \frac{M_S}{133} \qquad (1)$$

Onde: Cα é a quantidade de ferrita

Ms é a magnetização de saturação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a imagem do aço inoxidável duplex UNS S31803 na forma de cavaco de usinagem com um tamanho médio de 1200 µm. A Figura 2 apresenta a fotomicrografia do pó de carbeto de nióbio, conforme adquirido é possível observar que as partículas se apresentam na forma de aglomerados.

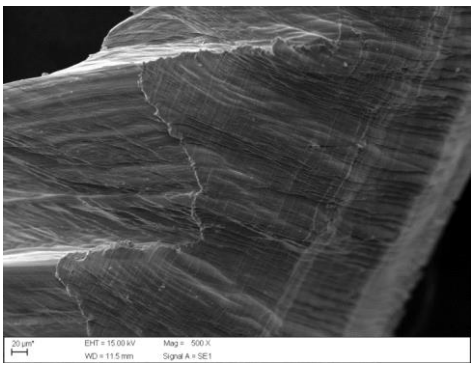


Figura 1: Aço inoxidável duplex UNS S31803 na forma de cavacos.

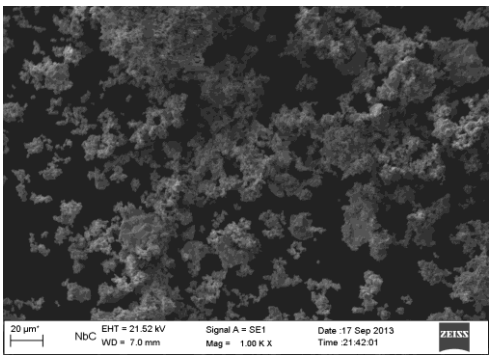


Figura 2: Pó de carbeto de nióbio na forma de aglomerados.

Pode-se observar na Figura 3(a) que, depois de 5 horas de moagem, o aço inoxidável UNS S31803 da forma de cavacos, foi transformado em partículas com morfologia irregular com dimensões entre 150 μm e 450 μm. Com o aumento do tempo de moagem para 20 horas as partículas mantiveram o formato irregular, no entanto, ocorreu a diminuição do tamanho das partículas, neste caso, variou de 65 μm a 250 μm.

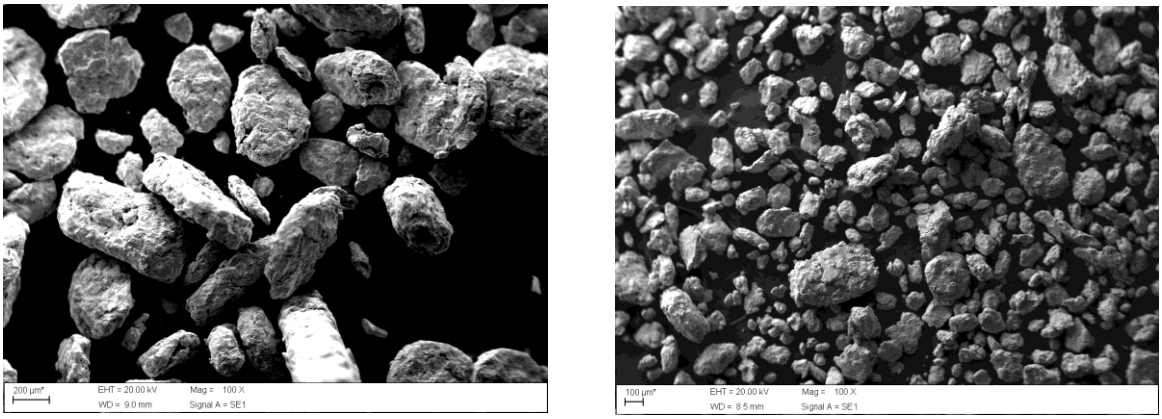


Figura 3: Partículas de aço inoxidável duplex após (a) 5 horas e (b) 20 horas de moagem.

A Figura 4(a) apresenta partículas do aço inoxidável UNS S31803 com uma adição de 3% de NbC, após 5 horas de moagem. A comparação das Figuras 3(a) e 4(a) demonstra que para 5 horas de moagem, a adição de 3% de NbC não alterou a morfologia, porém ocorreu uma diminuição do tamanho médio das partículas. As Figuras 3(b) e 4(b) apresentam as partículas do aço sem e com 3% de NbC, respectivamente, num tempo de moagem de 20 horas, nota-se uma maior eficiência com a diminuição do tamanho de partículas entre 65 μm e 150 μm.

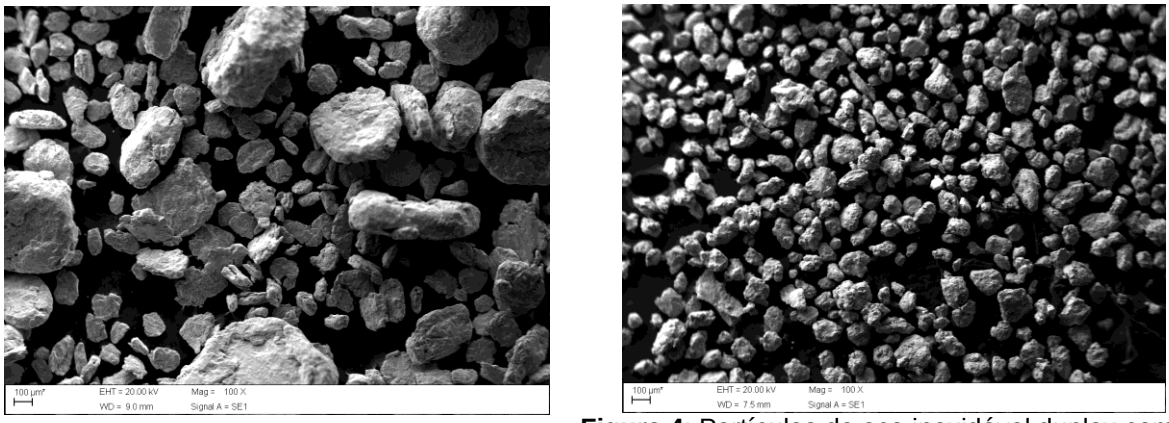


Figura 4: Partículas de aço inoxidável duplex com adição de 3% de NbC após (a) 5 horas e (b) 20 horas de moagem.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A Tabela 2 apresenta a distribuição de tamanho de partículas após 20 horas, sem e com adição de NbC. Os parâmetros D10, D50 e D90 representam os tamanhos de partícula abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% da massa do material. Analisando os resultados, nota-se que a distribuição de partículas D50 e D90 são reduzidas pela adição de 3% NbC. Estes resultados evidenciam que a adição de carbeto de niobio provoca um aumento na eficiência do processo de moagem do aço inoxidável duplex. A adição de 3% NbC, para o mesmo tempo de moagem de 20 horas ocorre uma redução do tamanho médio de 20% nas particulas de aço inoxidável dúplex.

Tabela 2: Parâmetros D10, D50 e D90 e tamanhos médios de partículas do aço inoxidável duplex após moagem de 20 horas.

Partículas do aço inoxidável duplex após moagem	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Tamanho médio (μm)
sem carbeto	65,3	134,8	473,3	219,7
com adição de 3% de NbC	65,6	115,8	355,7	175,6

Figura 5 apresenta uma distribuição homogênea dos carbetos de niobio (NbC) sobre a superfície das partículas de aço inoxidável dúplex após 20 horas de moagem. A Figura 6 apresenta todos os elementos químicos obtidos por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Foram encontrados os elementos individuais do aço inoxidável dúplex: Fe, Cr, Ni, Si, bem como do carbeto de nióbio: Nb e C.

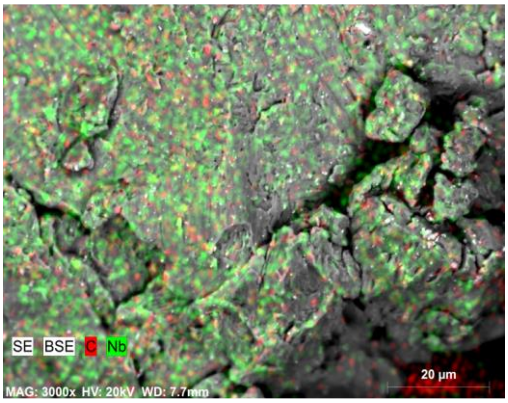


Figura 5: Distribuição das partículas de carbeto de nióbio (verde) sobre as partículas do aço inoxidável duplex (cinza).

ISBN: 978-987-1676-63-7

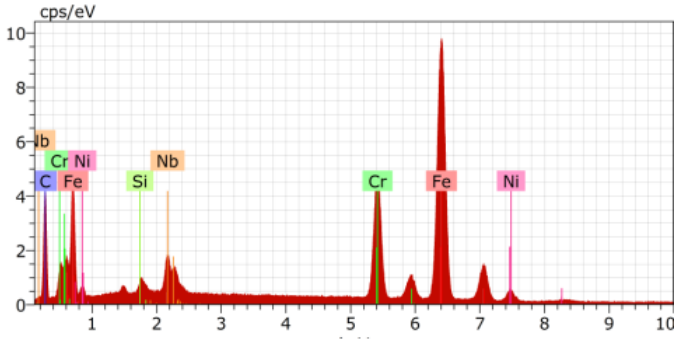
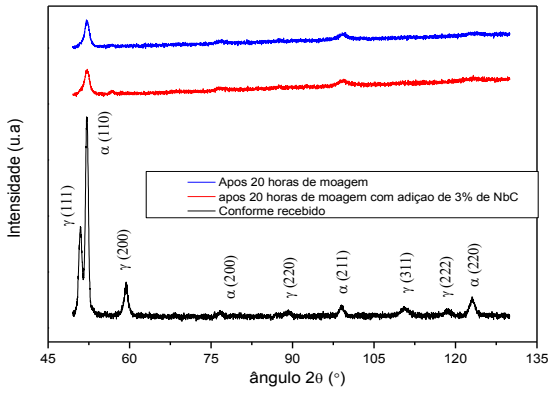


Figura 6: Espectro de EDS do aço dúplex com adição de 3% NbC após moagem por 20 horas.

A Figura 7 apresenta os resultados da difração de raios X do aço inoxidável duplex UNS S31803 nas seguintes condições: (a) conforme recebido; (b) após 20 horas de moagem; (c) após 20 horas de moagem com adição de 3% de NbC. Observa-se que para a condição (a) são identificadas as fases austenita (γ) e ferrita (α).

Para as condições (b) e (c), nota-se que a deformação provocada pela moagem de alta energia resultou em uma alteração significativa nos picos de difração. Note-se ainda o desaparecimento dos picos de austenita (200), (200), (311) e (222) e do pico de intensidade relativa da ferrita (220). Os picos de intensidade relativa da fase austenítica (111) e da fase ferrítica (110), após o processo de moagem desaparecem e ocorre o surgimento de um pico de intensidade relativa das fases ferrítica e martensita. Convém esclarecer que os picos das fases ferrita e martensita não são distinguidos porque ambas as fases apresentam a mesma reflexão. Estas alterações no perfil dos padrões de difração podem ser causadas por uma possível transformação de fase da austenita em martensita induzida por deformação.



ISBN: 978-987-1676-63-7

Figura 7: Difratograma do aço inoxidável duplex UNS S31803 nas condições: (a) conforme recebido; b) após 20 horas de moagem; (c) após 20 horas de moagem com adição de 3% de NbC.

A magnetização de saturação depende apenas da fração de volume da fase magnética que se encontra presente nos aços, portanto, estudos relacionaram o aumento no valor da magnetização de saturação com a transformação da austenita em martensítica induzida por deformação [13,14].

A Figura 8, apresenta o comportamento magnético do aço inoxidável duplex UNS S31803 nas seguintes condições: (a) conforme recebido; (b) após 5 horas de moagem; (c) após 20 horas de moagem; (d) com adição de 3% de NbC após 5 horas de moagem; (e) com adição de 3% de NbC após 20 horas de moagem.

Analisando os resultados da Figura 8, nota-se que amostras do aço inoxidável duplex após moagem apresentam um aumento da magnetização de saturação, isto significa que houve a formação de martensita, e este aumento é função do tempo de moagem.

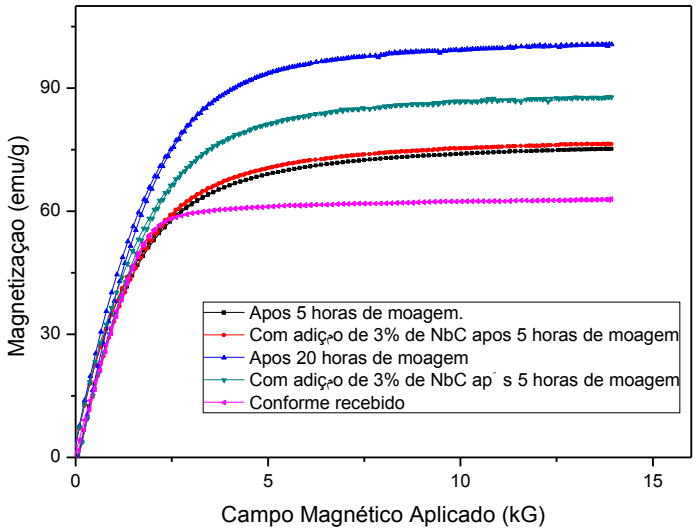


Figure 8: Curva de magnetização x campo magnético aplicado nas amostras de aço inoxidável dúplex nas diferentes condições: (a) conforme recebido; (b) após 5 horas de moagem; (c) após 20 horas de moagem; (d) com adição de 3% de NbC após 5 horas de moagem; (e) com adição de 3% de NbC após 20 horas de moagem.

A Tabela 3 apresenta os valores da magnetização de saturação, do campo coercitivo e magnetização remanente, e dos valores de porcentagem de fase ferromagnético, este dado obtido através da formula desenvolvida por (Tavares et al., 2006) [14] para o aço inoxidável duplex UNS S31803, nas

seguintes condições: (a) conforme recebido; (b) após 5 horas de moagem; (c) após 20 horas de moagem; (d) com adição de 3% de NbC após 5 horas de moagem; (e) com adição de 3% de NbC após 20 horas de moagem.

Analisando os resultados, nota-se que o tempo de moagem aumenta a magnetização de saturação, portanto, acarreta a formação de martensita induzida por deformação, pois os maiores valores são para 20 horas.

Tabela 3. Parâmetros Magnéticos: magnetização de Saturação (M_S), Campo coercivo(H_C) , magnetização remanente (M_R) e porcentagem de fase ferromagnética do aço inoxidável duplex em diferentes condições:

Condições:	Magnetização de Saturação (emu/g)	Campo Coercivo (G)	Magnetização remanente (emu/g)	(%) Fase Ferromagnética
Como recebido	62,12	22,48	2,05	46,71
Após 5 horas de moagem	75,18	65,95	2,99	56,53
Após 5 horas de moagem + 3% NbC	76,35	78,97	3,32	57,41
Após 20 horas de moagem	100,62	71,25	3,29	75,65
Após 20 horas de moagem + 3% NbC	87,83	84,73	3,63	66,04

A Tabela 4 apresenta o percentual de fase Ferromagnética (ferrita + martensita) obtida pela equação (1), assim como o percentual das fases presentes no aço inoxidável duplex em diferentes condições: (a) conforme recebido; (b) após 5 horas de moagem; (c) após 20 horas de moagem; (d) com adição de 3% de NbC após 5 horas de moagem; (e) com adição de 3% de NbC após 20 horas de moagem.

Nota-se que o aumento do tempo de moagem promove o aumento percentual da fase ferromagnética (ferrita + martensita). Durante a moagem não houve alteração na temperatura, assim, não houve condição para a transformação da ferrita em fase sigma. Portanto, o percentual de fase ferrítica se mantém constante. O aumento do percentual da fase ferromagnética se deve a transformação da fase austenita em martensita.

Nota-se ainda, que a adição de 3% de NbC na moagem de 20 horas reduz a transformação de austenita em martensita por deformação, além de uma redução do tamanho médio das partículas de 20%, conforme Tabela 2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 4. Percentual de fase Ferromagnética e das fases presentes no aço inoxidável duplex em diferentes condições:

Condições:	(%) Fase Ferromagnética	(%) Austenita	(%) Ferrita	(%) Martensita
Como recebido (cavacos)	46,7	53,3	46,7	0,00
Após 5 horas de moagem	56,5	43,5	46,7	9,8
Após 5 horas de moagem + 3% NbC	57,4	42,6	46,7	10,7
Após 20 horas de moagem	75,6	24,4	46,7	28,9
Após 20 horas de moagem + 3% NbC	66,0	33,9	46,7	19,4

4. CONCLUSÃO

Ao utilizar o processo de moagem de alta energia, foi possível obter pós de aço UNS S31803 do material com e sem adições de carbeto de nióbio. O tempo de moagem propiciou aumento dos valores de magnetização de saturação (MS) evidenciando uma transforamação da austenita em martensita induzida pela deformação. A adição de 3% de NbC na moagem de 20 horas reduz a transformação de austenita em martensita por deformação, além de uma redução do tamanho médio das partículas de 20%,

5. REFERENCIAS

[1] GHOSH, S.K., MAHAT, D., ROYCHAUDHURI, R., MONDAL, R. Effect of rolling deformation and solution treatment on microstructure and mechanical properties of a cast duplex stainless steel.Bulletin of Materials Science, 35, 2012.839-846

[2] GUNN, R. N. Duplex stainless steels- Microstructures, properties and applications. Woodlhead publishing, Cambridge, 2003.

[3] FRÉCHARD, S.; MARTIN, F.; CLÉMENT, C.; COUSTY, J. AFM and EBSD combined studies of plastic deformation in a duplex stainless steel. Materials Science and Engineering: A. v. 418.n.1-2. p 312-319. 2006.

[4] Dobrzánski, L.A.; Brytan, L. A. Actis Grande., Z. M.; Rosso, M. Corrosion resistance of sintered duplex stainless steels in the salt fog spray test. Journal of Materials Processing Technology. V. 192–193, p. 443–448. 2007.

[5] SOLOMON,H.D., DEVINE, T.M. Duplex stainless steels - a tale of two phases. IN: LULA, R. A. (Ed.) Proc. Conf. Duplex Stainless Steels'82,ed. ASM, Materials Park, OH, EUA, 1984, p.693-756

[6] SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro and PEREA, Eduardo. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2007, vol.60, n.1, pp.175-181. ISSN 1807-0353. http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672007000100027.

[7] DELFORGE, D. Y.M. FERREIRA, I. DA SILVA, C.G.R. PARIS, E.A.G. MARCELO, A.L. NOVAES, R.H. Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? Rem: Rev. Esc. Minas vol.60 no.1 Ouro Preto Jan./Mar. 2007.

[8] KLAR, E., SAMAL, E. Powder Metallurgy Stainless Steels. Processing, Microstructures, and properties. ASM International, 2007. 243p.

[9] BRYTAN, Z. DOBRZÁNSKI, L. A., ACTIS GRANDE, M., ROSSO, M. The influence of sintering time on the properties of PM duplex stainless steel. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. v. 37, n.2, p.387, 396, 2009.

[10] YONEKUBO, A. E. Caracterização Microestrutural do aço inoxidável Superduplex UNS S32520 (UR 52N*) Processado por moagem de alta energia. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Ponta Grossa- Ponta Grossa, 2010.

[11] SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science, v. 46, n. 1-2, p.1-184, 2001.

[12] POHL, M.; STORZ, O.; GLOGOWSKI, T. Effect of intermetallic precipitations on the properties of duplex stainless steel. Materials Characterization, v. 58, p. 65–71, 2007.

[13] BALDO, S., MÉSZÁROS, I. Effect of cold rolling on microstructure and magnetic properties in a metastable lean duplex stainless steel.Journal of Materials Science, 45, 2010. 5339-5346.

[14] TAVARES, S.S.M., SILVA, M.R., PARDAL, J.M., ABREU, H.F.H., GOMES, A.M. Microstructural changes produced by plastic deformation in the UNS S31803 duplex stainless steel. Journal of Materials technology, 180, 2006.318-322.

[15] GUBERNAT, A., ZYCH, L. The isothermal sintering of the single-phase non-stoichiometric niobium carbide (NbC1−x) and tantalum carbide (TaC1−x). Journal of the European Ceramic Society, v. 34, p. 2885-2894, 2014.

[16] KOSOLAPOVA, T. Y. Carbides properties, production and applications. New York: Springer Publishing, 1971. 316p.

Agradecimientos

Os autores agradecem as agências brasileiras, **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG**, pelo suporte financeiro.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

"APORTES PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL APLICADO EN ACOPLADOS Y SEMIRREMOLQUES"

Marcelo Costamagna*[1], Pesci Martin*[2], Huber Fernández*[3]

*[1,2,3] Departamento de Mecánica – Facultad Regional Villa María UTN.
Av. Universidad 450 Villa María Córdoba Argentina
correo-e: costamagna_m@frvm.utn.edu.ar.

RESUMEN

En los productos metalúrgicos con recubrimientos de pintura el espesor de la capa afecta en primer lugar a la protección del producto, y en segundo lugar a la estética de la misma.

Aunque el proceso de recubrimiento superficial no es crítico en el tipo de productos objeto de este estudio en cuanto a factores de seguridad o de performance, las exigencias de los clientes requieren que el mismo mejore de manera continua y eleve su estándar de calidad para cumplir con los requisitos funcionales y estéticos asociados al mismo. El deterioro prematuro de las superficies pintadas atentan contra la imagen de la compañía y más aún contra el valor de reventa del equipo en cuestión.

Si bien la empresa en la cual se analizará el proceso cuenta con certificación ISO 9001, del análisis visual realizado a los productos se presume que el mismo no se encuentra bajo control estadístico, existiendo por lo tanto, causas atribuibles presentes en el mismo.

El objetivo general de este proyecto es realizar un análisis profundo de los defectos producidos en las superficies pintadas, como así también de los factores intervinientes en el proceso de aplicación de los componentes de protección, en acoplados y semirremolques, para determinar las causas raíces que originan los mismos y proponer la aplicación de las acciones correctivas correspondientes.

El abordaje metodológico utilizado para este proyecto incluye técnicas tanto cualitativas como cuantitativas para la detección de las debilidades existentes en el proceso [1], las cuales están relacionadas a factores humanos y tecnológicos. Se emplearán diferentes "herramientas de la calidad", como por ejemplo análisis de la normalidad de la variable, recolección y análisis de datos, evaluación de los instrumentos de medición utilizados y la aplicación de otras, en la medida que fuera necesario.

Palabras Claves: *proceso, pintura, control estadístico, gestión de calidad, ISO 9001.*

1. INTRODUCCIÓN.

La calidad del acabado superficial, es un aspecto de vital importancia en el grado de satisfacción que el cliente pueda tener sobre el producto, ya que repercute directamente en su valoración. Por otro lado, también la duración y prestación del revestimiento definen su calidad. Los procesos de pintura involucran gran cantidad de aspectos a tener en cuenta, cada uno de ellos con sus diferentes variables, lo que hace que, no sea una tarea fácil mantener la calidad, repetibilidad y eficiencia, evitando reprocesos y demoras en la producción.

En esta primera etapa del proyecto se realiza un análisis de la variabilidad existente en la capa de pintura aplicadas a las superficies de acero al carbono que forman parte de la estructura de los semirremolques. Las especificaciones de la empresa para esta variable están definidas en 80 micrones mínimo y 130 micrones máximo, estos valores incluyen fondo y color, ambos de esmalte poliuretánico. La distribución uniforme de las capas de pintura es esencial para garantizar la vida útil de producto, debido a que la presencia de óxido disminuye la misma y por otra parte afecta al precio de reventa del producto.

El gráfico de control es una herramienta importante en el control estadístico de la calidad, esta junta a otras aplicadas de manera conveniente, se convierten en elementos sustanciales para la mejora continua de la calidad. La fuerza de la técnica de Shewhart [2] reside en su capacidad para distinguir las causas atribuibles a la variación de calidad. Esta hace posible el diagnóstico y la corrección de muchos problemas de producción, y a menudo, produce mejoras sustanciales en la calidad del producto, así como en la cantidad de productos desechables y recuperables. Un proceso se encuentra bajo control estadístico cuando la variación del mismo está sujeta solo a causas naturales aleatorias, y por ende no se encuentran causas atribuibles.

1.1. Objetivo General:

El Objetivo general de este proyecto es realizar aportes para mejorar el proceso de aplicación de pinturas en superficies de acero al carbono laminadas en frío, a partir del análisis de los defectos encontrados y la determinación de las causas que originaron los mismos.

1.2. Objetivos Específicos:

En esta primera etapa se proponen los siguientes objetivos específicos.

1. Estudiar el tipo de distribución de la variable “espesor de la capa de pintura”, para verificar la normalidad de la misma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. Determinar si el proceso de aplicación del recubrimiento superficial, está bajo control estadístico o si existen causas atribuibles que pongan al mismo fuera de control.

2. METODOLOGÍA.

El abordaje metodológico utilizado para este proyecto incluyó técnicas tanto cualitativas como cuantitativas. Luego de la observación detallada de los productos pintados y del análisis del proceso utilizado, se realizó un primer estudio que consistió en investigar el comportamiento de la variable "espesor de pintura" tomando mediciones en diferentes puntos de la superficie terminada. Estas mediciones se realizaron con un instrumento adecuado para mediciones de espesores de recubrimiento y cuya apreciación es de 1µm. Antes de comenzar con el proceso de medición, se realizó un análisis de la capacidad de proceso que posee el sistema de medición para evaluar la aptitud del mismo [3].

Se seleccionó la muestra a estudiar, en este caso un semirremolque de 14.50 m de largo, con barandas de 0,8 m de alto por 2,3 m de largo. Sobre este producto y cuya superficie estimada es de 28 m^2, se tomaron aproximadamente cuarenta datos distribuidos en toda la superficie. Con estos datos se realizó el estudio de normalidad de la variable en cuestión.

Posteriormente para determinar si el proceso (máquinas, operarios, medio ambiente, materia prima y método) es apto o no, se analizaron ocho semiremolques pintados de manera consecutiva, tomandose cinco mediciones sobre cada uno, resultando un total de cuarenta datos. Estos se tabularon en registros elaborados a tal fin, de modo tal, de facilitar su recolección y posterior análisis [4].

Posteriormente se analizaron individualmente las puertas del semirremolque para determinar el grado de uniformidad del espesor en las distintas partes.

3. RESULTADOS OBTENIDOS.

3.1 Estudio de Normalidad de la Variable.

En una primera instancia se analizó el comportamiento del espesor de pintura en forma gráfica a través del histograma de frecuencia y también con la recta de bondad de ajuste para determinar su grado de normalidad o no. Con el soporte de un software específico se realizó el análisis de los datos relevados, veinticuatro en total. En la Figura N°1 se muestra el histograma de frecuencias de la distribución de estos valores, los cuales fueron medidos en micrones.

En la Figura N°2 se puede apreciar como ajustan los datos obtenidos a la distribución normal. En ambos casos se puede observar que existe un sesgo importante de los valores, encontrándose una importante cantidad de datos en el sector izquierdo de la Figura. Esto

ISBN: 978-987-1676-63-7

puede ser indicio de la presencia de causas asignables al proceso que pongan en peligro su aptitud de consistencia dentro tolerancias.

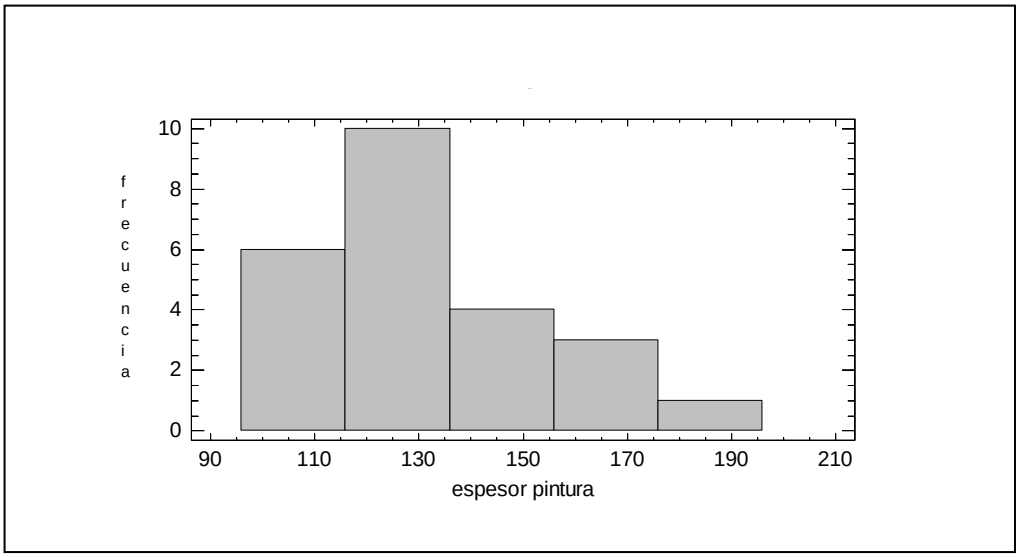


Figura N°1: Histograma de frecuencias de mediciones de espesor en puertas.

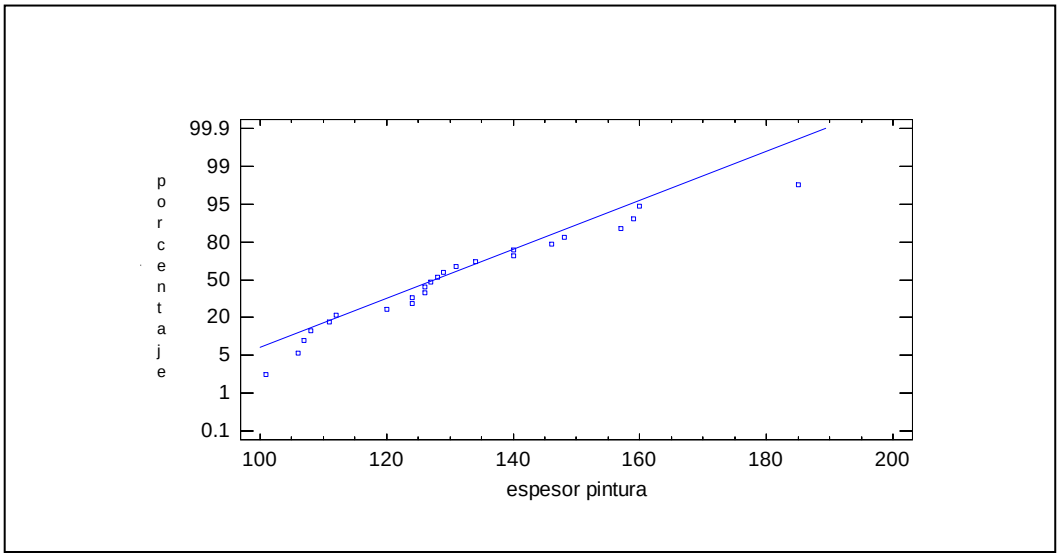


Figura N°2: Ajuste de Normalidad.

3.2 Análisis del proceso.

Para comprobar si el proceso de pintado se encuentra bajo control estadístico se realiza un muestreo en ocho semirremolques, en los cuales se toman cinco muestras de cada uno en distintas puertas, en un mismo lugar. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla N°1. Dichas mediciones fueron realizadas en distintos meses, en función de la secuencia de

ISBN: 978-987-1676-63-7

fabricación de estas unidades, debido a que no es el único modelo producido en la empresa. La característica común de estos meses es homogeneidad de las condiciones ambientales en dicho período dado que si bien puede variar diariamente, mantienen una cierta constancia en sus valores, evitando así los valores extremos del tipo verano/invierno.

Los mismos se agruparon en subgrupos de cinco observaciones y fueron tratados estadísticamente con un software adecuado [5].

Tabla N°1: Valores obtenidos.

Fecha	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
	14-12-2015	14-12-2015	14-12-2015	18-01-2016	16-02-2016	16-02-2016	16-02-2016	16-02-2016
R1	115	94,5	112	124	84,4	87,2	124	135
R2	121	77,1	88,8	104	101	99,7	104	121
R3	163	79,1	95,1	133	66,9	91,2	133	127
R4	123	76,5	98,6	102	109	75,4	102	105
R5	115	88,3	97,2	106	96,2	105	106	113
Suma	637	415,5	491,7	569	457,5	458,5	569	601
Promedio	127,4	83,1	98,34	113,8	91,5	91,7	113,8	120,2
Rango	48	18	23,2	31	42,1	29,6	31	30

AVG Medias = 104.98

AVG Rango = 31,6125

UCL_X = AVG Medias + A2 * AVG Rango = 123,31525

LCL_X = AVG Medias – A2 * AVG Rango = 86,64475

UCL_R = AVG Rango * D4 = 66,7024

LCL_R = AVG Rango * D3 = 0

Cálculo de escalas para el gráfico

Max X = 127,4

Min X = 83,1

Rango X = Max X – Min X = 44,3

2 * Rango X = 88,6

Max R = 48

ISBN: 978-987-1676-63-7

Escala Superior = 1,5 * MAX R = 72

Nomenclatura:

AVG Medias: valor medio de los Promedios

AVG Rango: valor medio de los Rangos

UCL_X : Límite de Control Superior – gráfico de medias

LCL_X : Límite de control Inferior – gráfico de medias

UCL_R: Límite de Control Superior - gráfico de rangos

LCL_R : Límite de Control Inferior - gráfico de rangos

Max X : Valor máximo de la fila Promedio de la tabla N°1

Min X : Valor mínimo de la fila Promedio de la tabla N°1

Rango X : diferencia entre Max X y Min X. Este resultado multiplicado por dos se utiliza para fijar los valores máximo y mínimo del eje Y en el Gráfico de Medias de la Figura N°4.

Max R : Valor Máximo de la fila de RANGO

Escala Superior : El valor de Max R multiplicado por 1,5 se utiliza para fijar el valor máximo del eje Y en el Gráfico de Rangos Figura N°5

En esta Tabla, además de los valores medidos, se pueden apreciar los valores medios de cada subgrupo y la media de esos promedios AVG Medias y los límites de control correspondientes, LCLx (Límite de Control Inferior de las medias) y UCLx (Límite de control Superior de las medias). Además se observan los valores correpondiente al Rango Máximo y los límites de control de este, LCLR y UCLR.

En la Figura N°4 se muestra el gráfico de control estadístico con los límites ±3 sigmas, en el mismo se puede apreciar que existen puntos fuera de estos límites, punto 1 y punto 2.

Mientras que en la Figura N°5, Gráfico de Rangos, todos los puntos se encuentran dentro de los límites.

ISBN: 978-987-1676-63-7

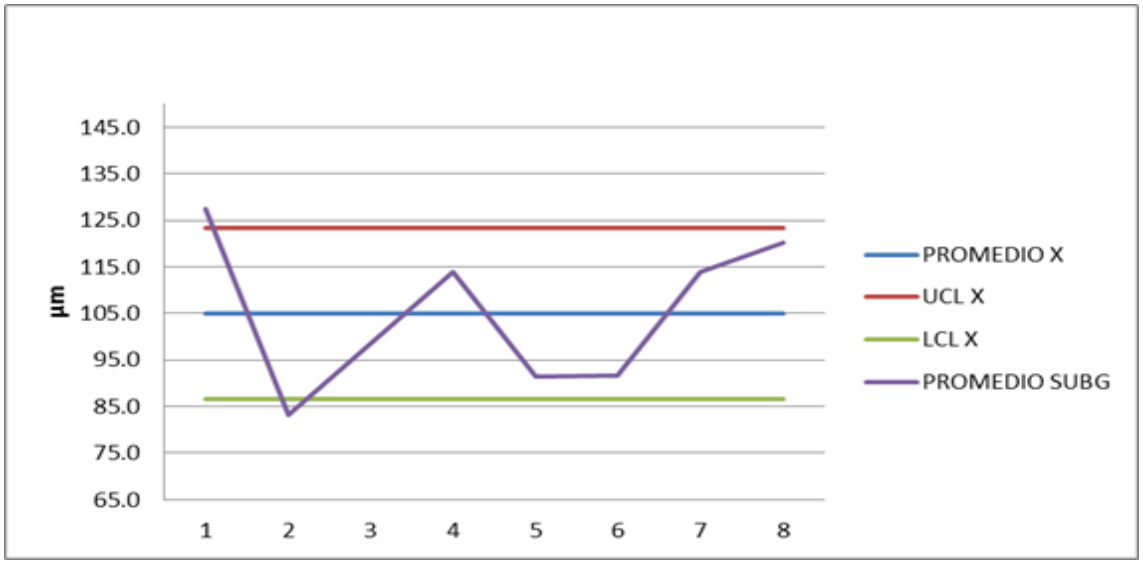


Figura N°4: Gráfico de medias de los 8 subgrupos.

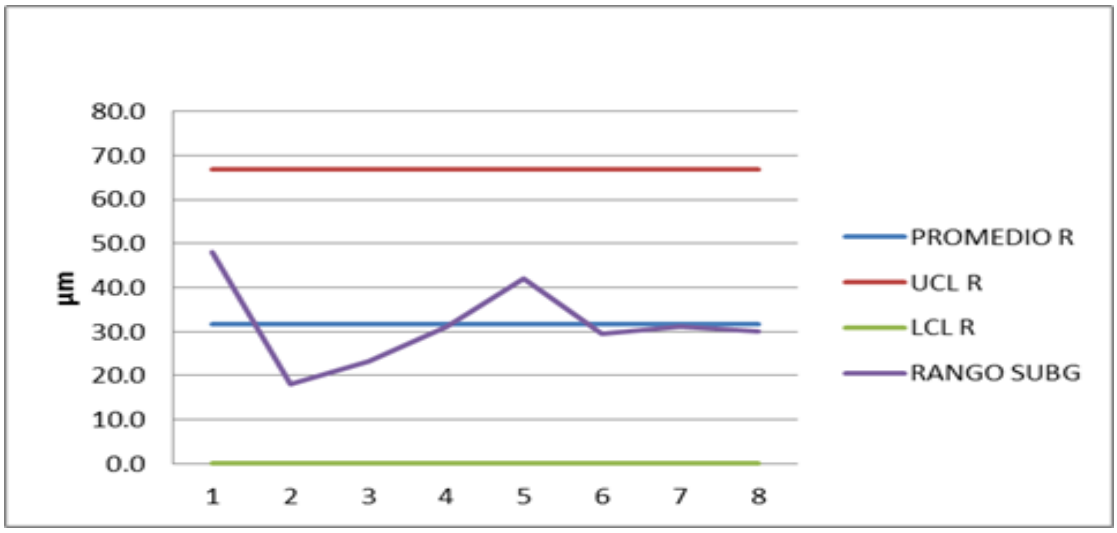


Figura N°5: Grafico de Rangos.

3. CONCLUSIONES PRELIMINARES Y RECOMENDACIONES.

A partir de los resultados preliminares y de las experiencias recogidas en las entrevistas que se realizaron a los responsables de la planta de pintado, podemos concluir que la variable “espesor de pintura” no tiene una distibución que responda a una curva normal, los datos están

ISBN: 978-987-1676-63-7

distribuidos con un cierto sesgo hacia la izquierda Figura N°1, encontrándose la mayoría de estos valores entre 95 y 130 micrones, llegando a un máximo de 190. Del análisis de los gráficos de control estadístico, se puede mencionar la falta de control que se presenta en el gráfico de las medias, dos puntos fuera de los límites, mientras que en el gráfico de Rangos todos los puntos están dentro de los límites de control. Esto permite concluir que el proceso no se encuentra estadísticamente controlado y por lo tanto existen causas atribuibles presentes en el mismo.

A los fines de mejorar la uniformidad de la capa de pintura se propone documentar claramente mediante instructivos de trabajo, la secuencia de operaciones a realizar, las especificaciones que se deben cumplir con sus repectivas tolerancias, los tiempos de espera entre cada aplicación y toda otra operación relevante para el proceso. Por otra parte se deberá poner especial énfasis en la capacitación del personal que se dedica a la aplicación del recubrimiento a los fines de garantizar el cumplimiento de lo establecido en los instructivos.

Además se recomienta realizar un control de los diferentes equipos de trabajo utilizados para detectar su influencia en la distribución y uniformidad de la variable analizada.

Se propone continuar recolectando información para evaluar el impacto de las acciones implementadas y la detección otras causas atribuibles que se encuentren en el proceso.

4. REFERENCIAS.

[1] Metodología y Técnicas Cuantitativas de Investigación, Universitat Politécnica de Valencia Primera Edición, 2012.

[2] Control Estadístico de Calidad, Eugene L. Grant. Richard S. Leavenworth. Compañia Ed. Continental, S.A de C.V. México. Tercera Edición 1986.

[3] Measurement System Analysis, AIAG (Automotive Industry Action Group), Cuarta Edición 2010.

[4] Introduction to Statistical Quality Control, Douglas C. Montgomery, 6th edition, 2009.

[5] Statiscal Process Control (SPC). Chrysler Corporation, Ford Motor Company, and General Motors Corporation. Segunda Impresión 1995.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE UM AÇO 4340 UTILIZANDO MOAGEM DE ALTA ENERGIA

C. S. P. Mendonça[1] **M. R. Silva** [1] **L. A. Oliveira** [1] **A. N. O. Dias**[1]
A. Silva[1] **M. L.N.M. Melo**[1] **G. Silva**[1]

[1] Universidade Federal de Itajubá.
Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho. Itajubá- Minas Gerais, Brasil.

correo-e: claudiney.sales@unifei.edu.br; mrsilva@unifei.edu.br; leonardoeng1@gmail.com; aottoboni@yahoo.com.br; alinesilva9@yahoo.com.br; mirianmottamelo@unifei.edu.br; gilbert@unifei.edu.br;

RESUMO

AISI 4340 é um aço de médio carbono, a de baixa liga com alta resistência, sendo utilizado em componentes para automóveis e aeronaves, vasos de alta pressão para plantas nucleares, devido à sua dureza, boa resistência à fadiga á altas temperaturas. Este trabalho tem como objetivo a produção de um aço AISI 4340 por metalurgia do pó através do reaproveitamento do cavaco proveniente da usinagem. A reutilização dos materiais recicláveis tem como principais objetivos a minimização dos impactos ambientais e racionalização das cadeias energéticas. Materiais fabricados por metalurgia do pó oferecem vantagens em relação ao processo convencional, tais como na produção de peças pequenas de formas complexas geralmente de motores e engrenagens. A moagem foi realizada num moinho planetário durante o tempo de 30 horas em atmosfera de argônio, numa rotação de 350 rpm e relação de massa/ bola de 1:15. A análise granulométrica e a microscopia eletrônica de varredura foram usadas na caracterização, e identificação do tamanho de partícula. O material foi compactado a uma pressão de 400Mpa e sinterizado a temperatura de 1100 °C por 1 hora. O tamanho médio das particulas ficou em torno de 37 μm. O material sinterizado apresentou uma porosidede baixa de 6,98 %. Os resultados serão discutidos levando em consideração a metalurgia física do aço antes e após o processo de Moagem e sinterização.

Palavras-Chaves: *Aço 4340, Moagem de alta energia; tamanho de partículas; sinterização, carbetos.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de Metalurgia do Pó tem amplas aplicações industriais devido a uma série de vantagens técnico-económicas. Moagem de alta energia (MA) é uma técnica de processamento de pó que permite produção de materiais homogêneos a partir de misturas de elementos de pós[1].

AISI 4340 é um aço de médio carbono, de alta resistência, aço de baixa liga utilizado para aplicações estruturais, tais como componentes de construção, componentes para automóveis, vasos de alta pressão para plantas nucleares e componentes de aeronaves, devido à sua dureza, alta resistência e uma boa resistência à fadiga a temperaturas elevadas. A demanda por ligas mais baratas, mas de alta resistência estrutural tem impulsionado a indústria de P/M para buscar composições mais recentes com aplicações mais amplas de ligas Fe -C. Tais ligas encontrar aplicações para ferramentas de automóvel , aeroespacial e de energia [2-4].

O aumento dos custos da matéria-prima utilizados nos processos de fabricação e o aumento dos custos de energia verificados nos últimos anos têm levado os pesquisadores a desenvolver novos métodos que permitam reutilizar os cavacos de usinagem como matéria-prima barata para fabricar componentes mecânicos. A reutilização dos materiais recicláveis tem como principais objetivos a minimização dos impactos ambientais e racionalização das cadeias energéticas [5].

Processamento de materiais através de metalurgia do pó convencional começa com a consolidação de pós-metálicos ou de liga, aplicando pressão uniaxial ou biaxial seguido por uma sinterização [6]. No processo de sinterização ao aquecer o compactado verde, a uma temperatura maior que a metade da temperatura de fusão do material, ocorre união entre as partículas metálicas e estas tendem a alcançar as características físicas, químicas e mecânicas intrínsecas do material. Uma delas é a densificação, que ocorre via transporte de massa [5,7-8].

Para melhorar as propriedades mecânicas dos aços produzidos por metalurgia do pó, a criação de um compósito de metal-cerâmica com adição de carboneto como reforço é vantajoso [9]. Carbonetos são os compostos formados por átomos de carbono e de metais. Os carbonetos metálicos apresentam propriedades importantes, como estabilidade a alta temperatura, grande dureza, e boa condutividade elétrica e térmica [10-11]. Este trabalho investiga a influência da adição de carbetos de nióbio nas propriedades microestruturais de um aço AISI 4340 sinterizado a temperatura de 1100°C, através de pós de cavacos de usinagem submetido à moagem de alta energia.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. Procedimento experimental

Neste trabalho foram utilizados cavacos de um aço AISI 4340 como material de partida. O processo de moagem foi realizado com a presença de carbetos de nióbio obtido da empresa Hermann C. Starck com granulometria variando de 3-6 µm. Tabela 1 mostra a composição química do aço AISI 4340.

Tabela 1: Composição química do Aço AISI 4340.

%C	%Mn	%Cr	%Si	%Ni	%Mo	%Fe
0,4	0,75	0,8	0,3	1,9	0,25	Balanço

Os cavacos do aço AISI 4340 foram submetidos à moagem com adição de 3% de carbeto de nióbio num moinho de bolas planetário durante o tempo de 30 horas numa atmosfera inerte de argônio para evitar a oxidação dos pós, a uma velocidade de moagem de 350 rpm e uma relação de massa/esfera de 1/15. Para a caracterização da morfologia, e identificação do tamanho de partícula utiliza técnica de microscopia eletrônica de varredura no modo elétrons secundário, modelo Carl Zeiss EVO MA15. A distribuição de tamanho de partícula foi realizada num analisador de tamanho de partícula Malvern Mastersizer 2000.

Após a moagem os corpos de prova foram prensados em uma prensa uniaxial com pressão de 400 MPa. Em sequência os corpos de prova foram sinterizados a vácuo em forno (EDG Five-PQ). A rampa de aquecimento utilizada foi de 10ºC/min com permanência de patamar de 1100 ºC por 1 hora. As amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente dentro do forno.

A densidade foi avaliada utilizando o principio de Arquimedes equação (1), e o cálculo da porosidade foi obtida através da equação (2), foi analisado um corpo de prova. A amostra foi imersa em água destilada por 24 horas, de acordo com a NBR 6220:2011 [12].

$$Densidade\,(\rho) = \frac{m_U}{m_U - m_I} \cdot \rho_{água} \qquad (1)$$

$$Porosidade\,(\%) = \frac{m_U - m_S}{m_U - m_I} \qquad (2)$$

Sendo: m_S: A massa seca da amostra em g,

m_U: A massa úmida da amostra em gramas,

m_I: A massa imersa agua destilada.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

3.1. Caracterização inicial das partículas.

A caracterização inicial dos cavacos de aço AISI 4340 e do pó de carbeto de nióbio é mostrada nas Figuras 1 e 2. Pode-se observar que os cavacos do aço 4340 processados por usinagem apresentam um tamanho médio de 2000 μm (Figura 1), e observam-se regiões de deformação plástica na superficie originadas pela ferramenta de usinagem. A Figura 2 mostra a fotomicrografia do carbeto de nióbio. Nesta figura, é possível observar que as partículas apresentam aglomerados.

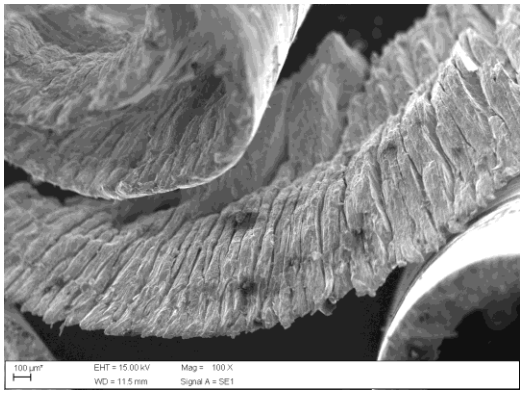


Figura 1: Cavaco do aço AISI 4340.

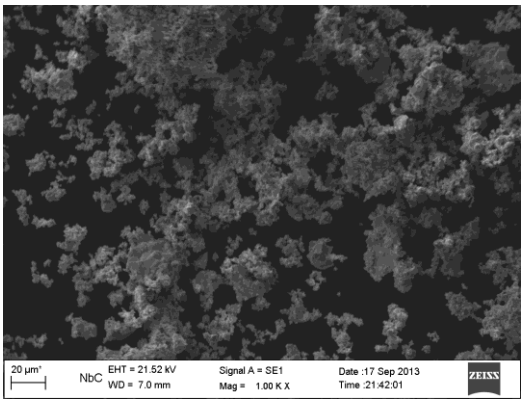


Figura 2: Fotomicrografia do Po de carbeto de niobio.

3.2. Caracterização Microestrural e analise granulométrica das partículas.

A moagem do aço 4340, com uma adição de 3% de NbC, observou-se que a morfologia das partículas na moagem no tempo de 10 horas apresentam partículas no formato irregulares, com

tamanho em sua maioria variando de 300 a 700µm. Pode-se observar a existência de partículas com tamanho menores que 100 µm. Mantendo os valores da percentagem NbC a 3 % e a moagem sendo feita no tempo de 30 horas, observou uma maior eficiência do processo de moagem, com uma diminuição do tamanho de partículas, o tamanho varia entre 10 e 30 µm.

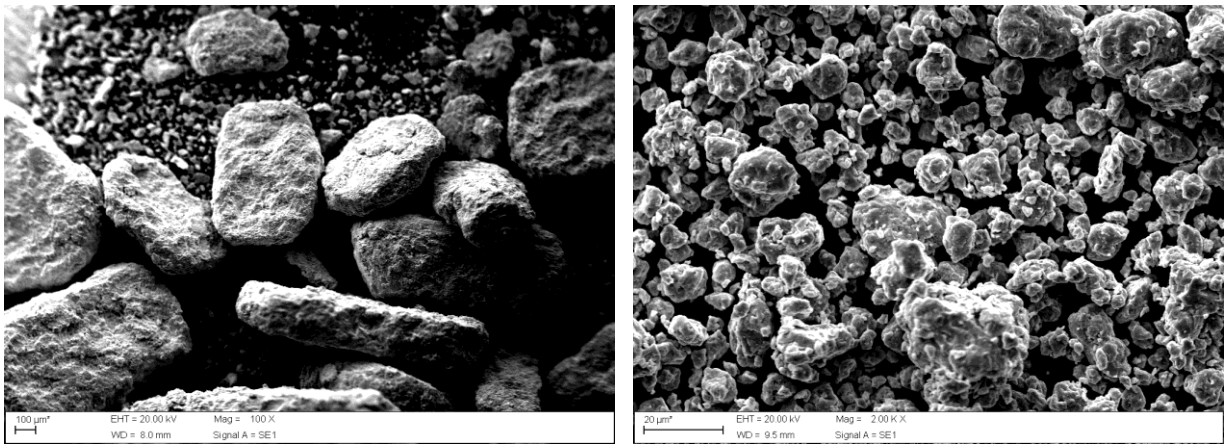


Figura 3: Morfologia das partículas do aço AISI 4340 com adição de 3% de carbeto de nióbio moagem por (a) 10 horas (b) 30 horas.

Os resultados do ensaio de distribuição de tamanho de partículas são mostrados na Tabela 2. Os Parâmetros D10, D50, D90 representam os tamanhos de partícula abaixo dos quais se encontram 10 %, 50 % e 90 % da massa do material. É possível observar que os valores de distribuição de partículas D50 esta com um tamanho de 3,25 µm e uma diminuição do tamanho de partícula médio de 26,16 µm. Os resultados evidenciam a eficiência do processo de moagem com a adição de NbC.

Tabela 2: Tabela dos tamanhos médios de partículas, e dos parâmetros D10, D50 e D90 das amostras submetidas à moagem com a adição de 3% de NbC no tempo 30 horas.

Amostra	D10(µm)	D50 (µm)	D90(µm)	Tamanho Medio (µm)
Moagem aço 4340 com adição de 3% de NbC- 30 horas.	9,39	13,25	55,79	26,16

A distribuição do carbeto foi avaliada através do microscópio eletrônico de varredura utilizando o modo de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) (Figura 4). Observou-se que as partículas de Nb estão distribuídas de forma homogénea sobre a superfície das partículas de aço. Os espectros de EDS na Figura 5 indicam a presença dos elementos individuais presentes no aço (Fe, Cr, Ni , Si, C) e do carbeto de nióbio.

ISBN: 978-987-1676-63-7

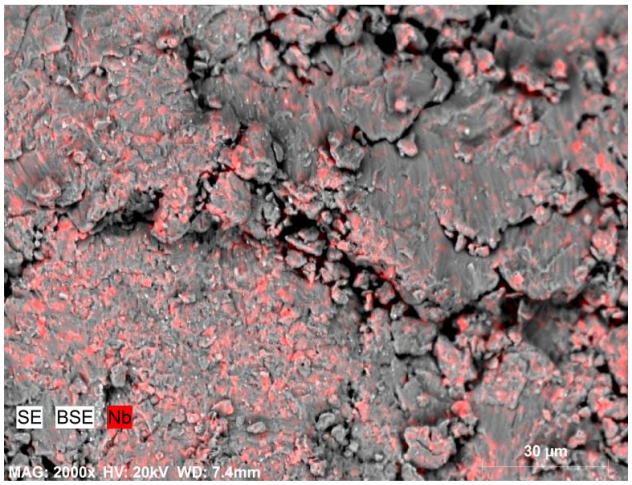


Figure 4: Identificação dos elementos químicos de Nióbio tempo de 10 horas.

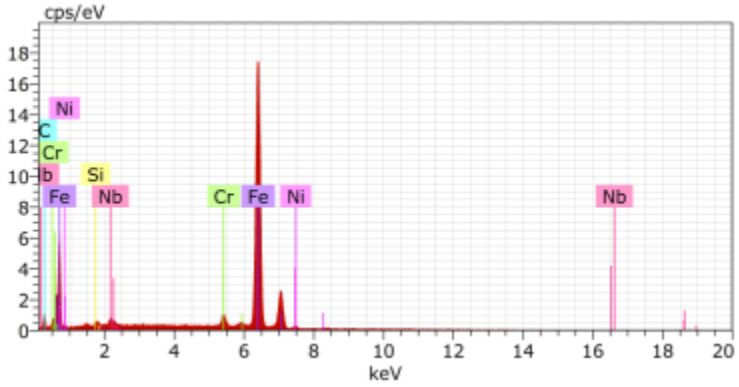


Figura 5: Espectro de EDS da amostra submetida a Moagem por 10 horas com adição de 3 de NbC mostrando os picos de Fe, Cr, Ni, Si, C e Nb.

3.3. Caracterização Microestrural e medidas de densidade do aço AISI 4340 sinterizado.

As medidas de densidade foram realizadas nas peças à verde logo após a prensagem, e pelo método de Arquimedes após a etapa de sinterização. A comparação direta entre as duas medidas teve o intuito de avaliar a densificação do compacto antes e após a etapa de sinterização. De acordo com a Tabela 3, observa-se que a média das densidades a verde foi de 4,54 g/cm³. Após a sinterização, a média das densidades das amostras produzidas com adição de 3% de carbeto de nióbio foi de 5,92 g/cm³, valores inferiores àquele do aço produzido via processo de fusão, que é de 7,88 g/cm³. Este decréscimo na densidade do aço fundido para o sinterizado é esperado devido à maior presença de poros nas peças fabricadas via metalurgia do pó.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 3: Valores de densidade a verde, densidade do material sinterizado e densidade teórica do aço AISI 4340.

Composição	Pressão de compactação 400±10 MPa		
	Densidade a verde (g/cm^3)	Densidade sinterizado, (g/cm^3)	Densidade teórica (g/cm^3)
AISI4340	4,54	5,92	7,88

Os resultados da porosidade das amostras com a adição de carbeto de nióbio são apresentados na Figura 6. Observa-se através de análise em microscopia ótica que as amostras apresentam uma baixa porosidade residual e concentrada entre os contornos das partículas, e que em algumas regiões observou-se uma sinterização muito intensa, material torna-se homogêneo. A porosidade obtida através do método de Arquimedes e da equação 2, foi de 6,98%.

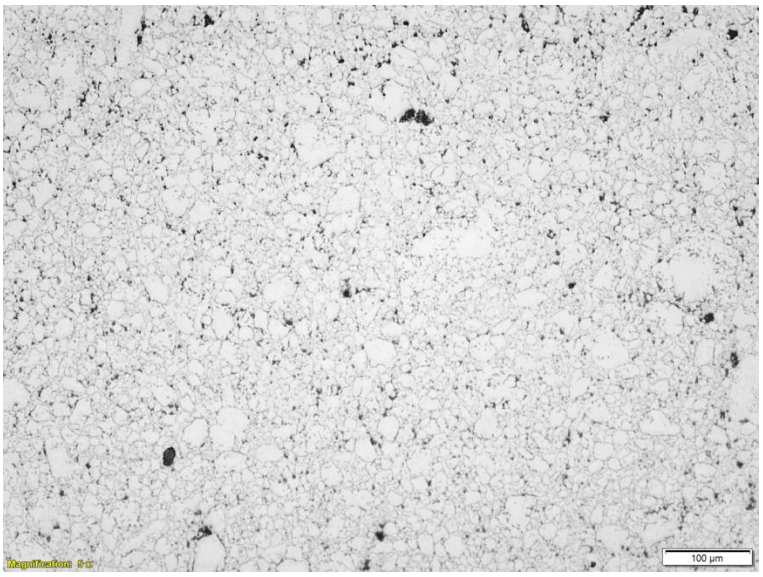


Figura 6: Microestrutura do aço AISI 4340 sinterizado a temperatura de 1100°C. Ampliação 100x.

4. CONCLUSÃO

Ao usar o processo de moagem de alta energia, foi possível obter pós de aço AISI 4340 com adições de carbeto de nióbio. O tamanho médio das particulas obtido ficou em torno de 37 µm. O material sinterizado apresentou uma porosidede baixa de 6,98%, apresentando regiões com uma sinterização muito intensa, no entanto a densidade obtida ficou abaixo do material produzido via

fundição. Este processo pode ser uma rota alternativa para o reaproveitamento do cavaco desse tipo de material. Além de ser um procedimento que envolve menor aporte de energia, pois o cavaco não passa por processos de fundição.

5. REFERENCIAS

[1] SURYANARAYANA, C. *Mechanical alloying and milling.* Progress in Materials Science, v. 46, n. 1-2, p.1-184, 2001.

[2] N. Ozdemir, Mater. Lett. 59 (2005) 2504–2509.

[3] R.L. McDaniels, S.A. White, K. Liaw, L. Chen, M.H. McCay, P.K. Liaw, Mater. Sci. Eng. A 485 (2008) 500–507.

[4] S. Bhattacharya, G.P. Dinda, A.K. Dasgupta, J. Mazumder. *Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition*. Materials Science and Engineering A 528 (2011) 2309–2318.

[5] Delforge, D. Y.M. Ferreira, I. da Silva, C.G.R. Paris, E.A.G. Marcelo, A.L. Novaes, R.H. *Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?* Rem: Rev. Esc. Minas vol.60 no.1 Ouro Preto Jan./Mar. 2007.

[6] J. Arivudainambi, G. Ranganath, R. Mariappan. *Densification and mechanical properties of sintered powder metallurgy aisi 4340 steel preforms*. Journal of Engineering and Applied Sciences V. 6, N. 5, 2011.

[7] Metal Powder Industries Federation. *Method for determination of green strength of compacted metal powder specimens*. Princeton, N.J.,08540, USA,1985.

[8] Kaysser W.A. Solid State Sintering. The institute of metals series on powder metallurgy - an overview. London, p45-53, 1991.

[9]TRUEMAN, A. R., SCHWEINSBERG, D.P., HOPE, G.A. *A study of the effect of cobalt additions on the corrosion of tungsten carbide/carbon steel metal matrix composites*. Corrosion Science, v. 41, n. 7, p. 1377-1389, 1999.

[10] GUBERNAT, A., ZYCH, L. *The isothermal sintering of the single-phase non-stoichiometric niobium carbide (NbC1−x) and tantalum carbide (TaC1−x)*. Journal of the European Ceramic Society, v. 34, p. 2885-2894, 2014.

[11] KOSOLAPOVA, T. Y. *Carbides properties, production and applications.* New York: Springer Publishing, 1971. 316p.

[12] ABNT NBR 6220:2011, "*Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, densidade de massa aparente porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida,*" São Paulo, Norma Brasileira 2011.

Agradecimientos

Os autores agradecem às agências brasileiras, **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq, Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG**, e do Brasil para o suporte financeiro.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

PROTECCIÓN ANTIVIBRATORIA DE HACES DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS. PRECALIFICACIÓN TÉCNICA

Germán G. Keil [1], **Damián F. Campos** [1] **y Marcelo T. Piovan** [2]

[1]Dpto. Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina
correo-e: german.keil@fain.uncoma.edu.ar
damian.campos@fain.uncoma.edu.ar
[2]Centro de Investigaciones de Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional FRBB y CONICET. 11 de Abril 461, Bahía Blanca. Argentina.
correo-e: mpiovan@frbb.utn.edu.ar

RESUMEN

En la instalación de nuevas líneas de transmisión eléctrica en muy alta tensión, un aspecto a considerar, es la performance del sistema de protección antivibratoria de conductores. Estos están compuestos por espaciadores amortiguadores. Una de sus funciones, es disipar parte de la energía que transfieren los fenómenos eólicos al haz. El objetivo es proteger al conductor, elemento crítico por costo asociado. Para ello se debe reducir la amplitud de las vibraciones de los mismos, que generan fatiga.

El diseño de las líneas prevé generalmente, una vida útil de 50 años. Las articulaciones elásticas de los espaciadores amortiguadores, constituidas por polímeros, sufren en operación una alteración de sus propiedades elásticas y amortiguantes. Por ello se debe controlar su evolución.

Si bien es usual realizar ensayos de fatiga de espaciadores amortiguadores, debiendo cumplir con estándares normativos, no hay a priori certezas de la incidencia de esa degradación en el comportamiento antivibratorio.

Para salvar la incertidumbre planteada, como innovación, se propone colocar a modo experimental en vanos tipo de líneas operativas, espaciadores disponibles en el mercado, prefatigados en diversos estadios, realizar mediciones de vibraciones, y hacer análisis de correlación. Los resultados permitirían visualizar el comportamiento vibracional de los conductores, con espaciadores amortiguadores con distintos grados de degradación.

Dada la existencia en nuestro país de muchas líneas de transmisión con diversidad técnica, la propuesta que se desarrolla, propone que, para nuevos sistemas de protección a instalar, además de cumplir con las especificaciones técnicas usuales, deberían estar avalados por una precalificación técnica, incluyendo pruebas en líneas con espaciadores amortiguadores prefatigados.

La propuesta permite luego, con la línea de transmisión con años en operación, determinado las características de un espaciador amortiguador, visualizar el estado del sistema de protección, y hacer un análisis predictivo en cuanto a vida útil remanente y ajustar el plan de vida.

Palabras Claves: *Transmisión eléctrica, espaciadores amortiguadores, precalificación técnica.*

1. INTRODUCCIÓN

En las líneas de transmisión eléctrica en muy alta tensión con haces múltiples de conductores, como consecuencia de la acción del viento, se tienen dos fenómenos vibratorios característicos, que son las denominadas vibraciones eólicas y las oscilaciones de subvano.

Las vibraciones eólicas son generadas por los denominados vórtices de Von Karman, cuyo desprendimiento inducen las vibraciones señaladas, que se manifiestan en el rango de 3 a 100 Hz, para velocidades de viento de 0.5 a 7 m/seg. Las vibraciones del conductor por dicho fenómeno, generan en los puntos de suspensión que se constituyen en un pseudo empotramiento que restringe el movimiento libre del conductor (ver Figura 1), elevadas tensiones normales por flexión alternativa, con inducción de fenómenos de fatiga en los hilos constituyentes del mismo. En una situación límite puede significar la rotura correspondiente, tal como se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 1: Grapa de suspensión

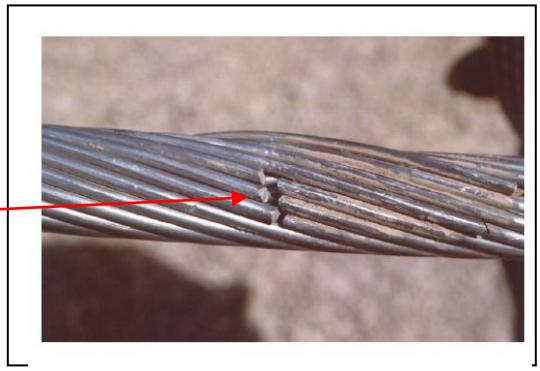


Figura 2: Conductor con hilos rotos por fatiga

Las oscilaciones de subvano surgen en haces de conductores cuando de mínima, dos de los mismos están acoplados y uno de ellos está ubicado en la estela del otro. En haces de conductores usualmente un subconductor se encuentra en la estela del de barlovento. Este último no esta influenciado por el de sotavento. El fenómeno se presenta para velocidades de viento mayores de 10 m/seg., y no son tan comunes como las vibraciones eólicas. El movimiento de los conductores es elíptico con máximo desplazamiento en el plano horizontal. Las amplitudes pueden ser de tal magnitud, de provocar el contacto entre conductores. Las observaciones de campo, muestran que el movimiento ocurre a frecuencias próximas a 1 Hz, son armónicas en el tiempo, de forma sinusoidal a lo largo del vano, con un antinodo entre espaciadores.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A los fines de proteger a los conductores y cables de guardia en las líneas de transmisión eléctricas por la acción eólica que induce las vibraciones señaladas, se instalan las denominadas protecciones antivibratorias. Para haces múltiples de conductores, dicha protección está constituida por una serie de espaciadores amortiguadores con su respectiva tabla de posicionamiento. Dicho conjunto de espaciadores amortiguadores, definen el denominado sistema de protección antivibratoria de conductores. En esencia la función del sistema mencionado, es mantener la distancia de diseño entre los conductores de una fase, además de absorber y disipar parte de la energía transferida por el viento a los conductores, manteniendo a las vibraciones éolicas y a las oscilaciones de subvanos, en niveles que no comprometan la seguridad de los diversos componentes de la línea. En la Figura 3 se puede observar un haz de cuatro conductores y el correspondiente espaciador amortiguador.



Figura 3: Espaciador amortiguador

Las articulaciones elásticas de los espaciadores amortiguadores que vinculan los brazos con el cuerpo central, están constituidas por materiales poliméricos con distintas configuraciones, y tienen por objeto disipar parte de la energía eólica transferida al sistema. Los movimientos alternativos a las que están sometidas, generan en el tiempo, una degradación de las propiedades elásticas y amortiguantes de los componentes poliméricos.

A los fines de determinar el comportamiento de los espaciadores se somete a los mismos a ensayos de fatiga con las siguientes características típicas: A) Vibraciones eólicas (V.E.), ver Figura 4, con una amplitud de +/- 2 mm y una frecuencia de 15 Hz.; B) Oscilaciones de subano (O.S.) como se puede observar en la Figura 5, con una frecuencia de 1.5 Hz., y una amplitud del 90% de la carrera o desplazamiento admitido por los brazos.

Los movimientos generados en los dispositivos de ensayo, simulan para cada caso, las condiciones operativas maximizadas en la línea.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 4: Máquina de ensayo por V.E.



Figura 5: Máquina de ensayo por O.S.

Pre y post ensayos de fatiga, se determinan las características elásticas y amortiguantes de los brazos sometidos al ensayo, en una mesa de relevamiento (ver Figura 6). Dichas características se obtienen para diversas amplitudes de desplazamiento de la grapa. Con el empleo de una celda de carga y un transductor de desplazamiento, se obtienen los valores de rigidez y de amortiguamiento a partir de la determinación del ciclo de histéresis y su área correspondiente.



Figura 6: Mesa de relevamiento de características

Una vez instalado el sistema de protección antivibratoria en la línea de transmisión, y previo a la puesta en servicio comercial, es usual realizar mediciones de vibraciones eólicas y de subvano, a los fines de visibilizar su comportamiento y el cumplimiento de las especificaciones técnicas del pliego de licitación. En la Figura 7, se puede observar un medidor de vibraciones eólicas.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 7: Medidor de vibraciones eólicas

2. NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

La norma IEC 61854 *Overhead Lines – Requirements and tests for spacer* [1], presenta recomendaciones de uso internacional, que sirven de base para la elaboración de las especificaciones técnicas y los ensayos de tipo y de remesa recomendables para espaciadores amortiguadores.

Específicamente plantea que los espaciadores amortiguadores deben ser diseñados para que mantengan la configuración del haz, minimizando la posibilidad de contacto entre conductores excepto para cortocircuito, con restauración en dicha condición a las condiciones geométricas de base. También establece que, en operación, no se deben detectar deformaciones permanentes inaceptables en componentes, aflojamientos y ruidos audibles críticos. Además, el diseño debe presentar facilidades para la instalación y remoción de componentes en líneas energizadas. La norma también plantea, pautas para los materiales no metálicos. La diferencia de potencial entre partes metálicas no deberán causar daños por descarga. Cualquier flujo de corriente entre subconductores, no generará alteraciones en los diversos componentes del espaciador.

También hace referencia a ensayos de fatiga por vibraciones eólicas y oscilaciones de subvano a someter a los espaciadores amortiguadores, presentando límites aceptables para las variaciones de las características elásticas y amortiguantes.

El comportamiento real del sistema de protección de antivibratoria se determina en la línea instalada previo a la puesta en servicio comercial, con la medición en determinados vanos adecuadamente seleccionados, de vibraciones eólicas, oscilaciones de subvano, desplazamientos de los brazos de algunos espaciadores amortiguadores, temperatura ambiente y velocidad del viento normal a la línea. Los dos últimos parámetros permiten realizar estudios de correlación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los valores límites aceptables, se fijan en base a las propuestas de diversas normas y entes especializados (EPRI *Electric Power Research Institute* – IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – CIGRE *Internacional Council on Large Electric Systems*), que permiten generar certidumbres en relación a la integridad de componentes para plazos estimados.

3. DESARROLLO

En la provisión de sistemas de protección antivibratoria de conductores de líneas de transmisión en muy alta tensión, se plantean algunas alternativas. Lógicamente el volumen de la misma, juega un rol preponderante. Entre dichas metodologías, siempre centrando en primera instancia la mirada en las cuestiones técnicas, una posibilidad es realizar una precalificación técnica para determinar performances en vanos experimentales y el comportamiento a la fatiga de los espaciadores amortiguadores, mediante ensayos previstos a tal efecto. Otra alternativa es en base a antecedentes, y la presentación de protocolos de ensayos de tipo y de mediciones en línea realizados para sistemas similares.

Las especificaciones contractuales también establecen generalmente, la realización de mediciones de campo de diversos parámetros vinculados a las vibraciones eólicas y de oscilaciones de subvano, y en algunos casos la ejecución de ensayos de fatiga por oscilaciones de subvano y por vibraciones eólicas conforme a muestreos durante la fabricación.

Hasta mediados de la década del 80 del siglo pasado, en los contratos de provisión de los sistemas de protección antivibratoria de conductores, de las líneas de transmisión troncales en muy alta tensión, era común en nuestro país, la realización de precalificaciones técnicas, consistentes en ensayos de componentes y evaluación del comportamiento en líneas experimentales. En provisiones posteriores esta metodología no se aplicó, haciéndose hincapié en el tema antecedentes.

Para la opción de la precalificación técnica, si tanto las mediciones de campo como los resultados de los ensayos de fatiga satisfacen los requerimientos de las especificaciones, para el Comitente en principio la situación estaría resuelta y ajustada a su satisfacción. Otra posibilidad es que las mediciones de campo hayan sido satisfactorias, pero no así el ensayo de fatiga. Problema difícil de abordar en lo hechos. A los fines prácticos, puede surgir una inquietud, el ensayo de fatiga realizado, focalizando la atención en el correspondiente a oscilaciones de subvano, desde la racionalidad, con un margen de mayoración adecuado, ¿es o ha sido representativo de la actividad de los brazos del espaciador amortiguador en la línea en operación?

Bajo las modalidades de ensayo de fatiga típicas señaladas, se puede estar penalizando a sistemas, que tienen por las características propias del diseño de los espaciadores amortiguadores asociado a la cantidad de los mismos y distribución dentro del vano, una buena performance, en

ISBN: 978-987-1676-63-7

nuestro caso baja amplitud de desplazamiento de los brazos, respecto a otro sistema que puede tener mayores amplitudes de desplazamiento de los mismos, y para ser sometidos ambos al mismo ensayo de fatiga por oscilaciones de subvano. Para el primero de los sistemas señalados, incluso puede darse, como ocurre en muchos casos en la realidad, un mejor comportamiento relativo a las vibraciones eólicas que generan fenómenos de fatiga en los conductores, pero que luego eventualmente pueden ser penalizados por un ensayo a la fatiga por oscilaciones de subvano impropio.

La cuestión que se plantea, se relaciona a las características de los ensayos de fatiga por oscilaciones de subvano. En la mayoría de los casos, no se tiene una relación directa entre el comportamiento real en la línea a las oscilaciones de subvano, y las características de los ensayos en la máquina de fatiga. Se puede presentar una situación, que puede perjudicar a un determinado diseño, caracterizado por una baja rigidez de sus articulaciones, pero que, por una optimizada cantidad y distribución de espaciadores en la línea, tenga por resultado un comportamiento que puede llegar a limitar significativamente los desplazamientos de los brazos en el marco de las oscilaciones de subvano [2].

Una vez instalado un sistema de protección antivibratoria en una línea, de detectarse un comportamiento anormal del sistema de protección antivibratoria de conductores durante el período de recepción, la realidad demuestra que cualquier intervención remedial resulta de extrema complejidad, pudiendo resultar muy onerosa, y las discusiones entre partes toman la forma de un galimatías. Esto significa que racionalmente y previo a una eventual adjudicación de la provisión de un sistema de protección antivibratoria para una línea de importancia, se deberían tomar todos los recaudos y reaseguros necesarios, para minimizar los riesgos que se presenten situaciones como la señalada. En tal sentido consideramos una precalificación técnica es una alternativa que genera certidumbres en dicho sentido.

También para las dos metodologías de adquisición de sistemas de protección presentadas, para el caso donde las mediciones de campo de vibraciones eólicas y oscilaciones de subvano durante el período de recepción, hayan sido satisfactorias, puede plantearse el interrogante generalmente omitido: que pasará con la performance real del sistema de protección, a medida que sus componentes vayan modificando sus características elásticas y amortiguantes por el proceso de fatiga acumulativa. Sobre el particular, una alternativa a evaluar, para generar mayor certidumbre en el Comitente, es realizar durante la fase de prueba de la línea, mediciones sobre un vano tipo, pero con amortiguadores prefatigados, bajo un criterio establecido. Lo señalado generará certidumbres en cuanto a poder inferir el real comportamiento del sistema de protección antivibratoria cuando sus componentes registren un proceso de fatiga acumulativa de significación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En esencia la propuesta que se somete a discusión a través del presente trabajo, se constituye en un nuevo enfoque, para abordar la relación entre el comportamiento en línea de los sistemas de protección antivibratoria, que va evolucionando, degradando con el transcurrir del tiempo, y el alcance de los ensayos de componentes y mediciones de comportamiento.

Corresponde señalar que aún son muchas las incertidumbres asociadas con la predicción del comportamiento vibracional de haces de conductores múltiples. En este contexto consideramos que la modelización matemática es una herramienta de aplicación, para inferir comportamientos, pero que deben nutrirse, del estado en cuanto a rigidez y capacidad amortiguante de las articulaciones elásticas de los espaciadores amortiguadores.

Para ajustar, los modelos para realizar las predicciones de vida útil de los conductores como consecuencia de la degradación de las propiedades elásticas y amortiguantes de los espaciadores amortiguadores, y mejorar los índices de correlación entre el estado elástico amortiguante de los espaciadores amortiguadores, y la performance vibracional de los conductores, se propone en la etapa de recepción y previa a la puesta en servicio comercial, colocar en vanos tipo, espaciadores amortiguadores prefatigados en diversos estadíos. Por ejemplo, tres casos: espaciadores a amortiguadores nuevos, con una fatiga equivalente a cinco millones y diez millones de ciclos respectivamente. En tal sentido se pueden analizar alternativas de prefatiga por vibraciones eólicas, y/u oscilaciones de subvano, o un mix.
Lo señalado precedentemente, se constituye en el fundamento de la necesidad de: a) Articular adecuadamente la performance del sistema de protección antivibratoria, y los ensayos usuales sobre los componentes para garantizar una adecuada vida útil; b) Establecer mediciones de vibraciones de conductores, para ver el comportamiento real de la línea con un sistema de protección constituido por espaciadores artificialmente fatigados, con una degradación de sus propiedades análoga a la que van a sufrir durante un período, compatible con la vida útil prevista para los componentes de la línea.

Una vez habilitada una línea nueva, es decir en operación comercial, y fuera del período de garantía, no hay metodologías consensuadas, para hacer un seguimiento de la evolución de los sistemas de protección antivibratoria, analizar las consecuencias emergentes sobre la integridad de los conductores, y realizar, de corresponder la planificación y programación de intervenciones en los mismos.

A los fines de ir monitoreando con el transcurrir del tiempo, el comportamiento del sistema de protección antivibratoria, las opciones que entendemos como complementarias, son: a) Medir en vanos típicos y especiales, vibraciones eólicas y oscilaciones de subvano; estas se comparan con los valores admisibles y/o bien con la estimación de la vida útil remanente del conductor; b) Retirar

ISBN: 978-987-1676-63-7

de la línea, con el reemplazo correspondiente, un espaciador amortiguador y realizar la medición de sus características elásticas y amortiguantes. Con los estudios realizados durante el proceso de precalificación y /o durante la puesta en servicio, permite asociar estado del espaciador con el comportamiento antivibratorio expectable.

La implementación de la propuesta de precalificación técnica para la provisión de sistemas de protección antivibratoria, incluyendo la alternativa de espaciadores amortiguadores prefatigados, resulta de aplicación posible, en atención a la infraestructura disponible en el laboratorio de ensayo de conductores y espaciadores LEC, perteneciente al Departamento de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue en la ciudad de Neuquén.
Para el prefatigado de espaciadores amortiguadores, tanto en la simulación de la acción de las vibraciones eólicas y las oscilaciones de subvano, se puede disponer de un dispositivo electromecánico de bajo costo, como el que se puede observar en la Figura 8. En función de la cantidad de muestras a prefatigar, conforme a diversos estados (amplitud y cantidad de ciclos) se puede ajustar el diseño del mecanismo señalado, para permitir el ensayo simultáneo con una disposición en paralelo de varios espaciadores.



Figura 8: Diseño mecanismo tipo para prefatigado de espaciadores

En el mismo sentido, la disponibilidad de una mesa de relevamiento de características visualizada en la Figura 6, con un sistema de adquisición de datos digitalizados y procesamiento correspondiente, permite en tiempos muy acotados determinar las características elásticas y amortiguantes, a partir de la obtención del ciclo de histéresis con medición de desplazamientos y fuerzas.
En una línea en operación, focalizando la atención en aquellas con muchos años de servicio, la información de campo, resultado de las mediciones de vibraciones y relevamientos de estado de espaciadores amortiguadores, permite en función de antecedentes y resultados de las evaluaciones realizadas durante la puesta en servicio comercial, ir ajustando el plan de vida previsto para la línea en relación a la temática de interés, para asegurar la vida útil de los conductores. La propuesta permite detectar en forma temprana y práctica, fallas sintomáticas en el sistema, predecir funcionales [3] y corregir, revertir tendencias (mantenimiento proactivo). Esta

ISBN: 978-987-1676-63-7

última alternativa requiere del reemplazo de los espaciadores amortiguadores, y donde sea posible empleando el criterio de la reutilización de los mismos [4], con la posibilidad de una instrumentación "*slow*" a largo plazo.

4. CONCLUSIONES

En líneas de transmisión con varias décadas en operación, toda la temática relacionada a la determinación de la vida útil de los conductores que está íntimamente asociada a los sistemas de protección antivibratoria, resulta trascendente y compleja. La presente propuesta, que parte de una pretendida visión holística, plantea los fundamentos de una metodología de acción, con una mirada puesta en el ciclo de vida de la línea a partir del diseño del sistema de protección antivibratoria con un primer emergente que es la precalificación técnica, hasta el ajuste del plan de vida durante la operación.

Como lo plantea el experto Humberto Cosmai [5], los estudios técnicos experimentales de sistemas de protección antivibratoria de conductores para nuevas provisiones, se limitan a centros de investigación y desarrollo y en particular a sistemas de transmisión relevantes.

La propuesta de acción que se presenta, está en directa vinculación y complementa las anteriores realizadas, referidas a la reformulación de los ensayos de fatiga de espaciadores amortiguadores conforme a la real performance en una línea en particular [2], la reutilización de espaciadores amortiguadores [4] y plan de vida para una línea de transmisión [6].

La propuesta de precalificación técnica, y mediciones de vibraciones en la línea con espaciadores nuevos y degradados en diversos estados, permite aumentar las certidumbres en cuanto a la predicción del comportamiento a mediano y largo plazo del sistema de protección antivibratoria por un lado, y por ende la vida útil del conductor.

La propuesta conlleva la posibilidad de aprovechar las muy extensas líneas de transmisión existentes en nuestro país, con recursos humanos muy calificados en su operación y mantenimiento, no en un campo de experimentación, por la seguridad que meritan, sino con estudios perfectamente acotados y correctamente instrumentados, que no generan ningún riesgo sobre el activo físico, evaluar el comportamiento de sistemas que se podrán instalar en el futuro en nuevas líneas o en la mismas en las cuales se están haciendo las pruebas para eventuales procesos de recambio. Por el contrario, obrar sin previsibilidad, verdaderamente sin pretenderlo las líneas en operación se pueden transforman en un campo de experimentación con los riesgos que ello conlleva.

Se considera que el plan de trabajo expuesto es de absoluta viabilidad, con acciones concretas de aplicación, que permitirán ganar en confiabilidad operativa del sistema de transmisión, y optimizar el uso de recursos, en atención a una mirada puesta en todo el ciclo de vida de la línea.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS.

[1] CEI IEC 61854 - INTERNATIONAL STANDARD. Overhead lines – Requirement and tests for spacers. First edition 1998-09.

[2] Keil, Germán; Jurasics, Américo; Maranghello, Daniel. *Componentes de líneas eléctricas de muy alta tensión: Explorando nuevas pautas de provisión a partir de los requerimientos de las especificaciones técnicas actuales de los contratos*. INTERCON 2010. Puno, PERÚ.

[3] Pistarelli, A. *Manual de mantenimiento – Ingeniería, Gestión y Organización.* Edición propia, Buenos Aires, 2010.

[4] Keil, Germán; Jurasics, Américo; Maranghello, Daniel. *Aplicación de la técnica de reutilización en el diseño de espaciadores amortiguadores de haces de conductores eléctricos.* III CAIM 2012, Buenos Aires.

[5] Cosmai, Humberto. Assesment of Aeolian vibration severity. Convenor CIGRE WG B2.25 Bangkok 28 February 2009.

[6] Keil, Germán; Campos Damián; Marcelo Piován Espaciadores amortiguadores de haces de conductores eléctricos. La necesidad de definir un plan de vida. IV CAIM 2014, Resistencia – Chaco.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DETECCIÓN DE FALLAS MECÁNICAS UTILIZANDO AL MOTOR DE INDUCCIÓN COMO SENSOR: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Esteban Giraldo [1], Carlos Verucchi [1] y José M. Bossio [2]

[1] CIFICEN-INTELYMEC, Facultad de Ingeniería, UNICEN. Av. del Valle 5737, Olavarría, Argentina.
correo-e: esteban.giraldo@fio.unicen.edu.ar; verucchi@fio.unicen.edu.ar
[2] GEA–CONICET. Facultad de Ingeniería UNRC, RN36 Km 601, Río Cuarto, Argentina.
correo-e: jbossio@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN

Durante las últimas décadas se han desarrollado e implementado a nivel industrial nuevas técnicas de detección de fallas eléctricas y mecánicas en motores de inducción. Dichas técnicas presentan diferencias significativas respecto a las herramientas tradicionales como el análisis de vibraciones o la medición de la resistencia de aislación de los devanados. Algunas de las ventajas destacadas son la implementación de carácter no invasivo y la medición y el diagnóstico con la máquina en servicio u online. Entre las nuevas alternativas, el sensado de la corriente de estator o la estimación del torque eléctrico transmitido por el motor, permiten detectar fallas debido a daños en las barras del rotor, excentricidades en el rotor o cortocircuitos en los bobinados, entre otras.

Recientemente, algunos autores han mostrado la posibilidad de extender el empleo de algunas de estas técnicas a la detección de fallas en la carga accionada por el motor y en la cadena cinemática. De tal modo, puede concebirse al motor de inducción como un sensor apto para monitorear el comportamiento del acoplamiento mecánico, el reductor de velocidad y la carga misma (cavitaciones en sistemas hidráulicos, desbalances de masa, fallas en compresores, etc.).

Las propuestas que presenta la literatura en este aspecto son variadas y se encuentran en diferentes estados de evolución. El objetivo de este trabajo consiste en presentar una revisión bibliográfica que permita comparar el alcance de las principales propuestas, analizar la posibilidad de su implementación a escala industrial y analizar la potencialidad de cada una de ellas. Asimismo se realiza una comparación sobre el costo de implementación de ellas, y el grado de dificultad para su ejecución; y finalmente el análisis de los resultados en cada una de ellas.

Las conclusiones obtenidas se centran en las virtudes que presentan dichas técnicas y a su posible implementación a futuro como una nueva herramienta de mantenimiento predictivo a nivel industrial.

Palabras Claves: *Motor de inducción, fallas mecánicas, detección de fallas, accionamientos eléctricos, accionamientos mecánicos*

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento eléctrico y mecánico en procesos de fabricación continuos constituye un desafío de grandes proporciones. Para alcanzar un desempeño eficiente, las instalaciones deben minimizar sus tiempos improductivos y evitar paradas imprevistas. Las técnicas de mantenimiento preventivo, basadas en las horas de servicio de las máquinas que forman parte de una instalación, utilizan una estimación de la vida útil media de cada componente. Así, cuando las horas de servicio se aproximan a la vida útil esperada se decide el reemplazo de una máquina o parte de ella durante una detención programada de la producción. Sin embargo, diferentes estudios demuestran que dicha estrategia es incapaz de evitar fallas prematuras además de ser muy costosa debido al reemplazo de piezas que a pesar de haber agotado la vida útil prevista, en algunas ocasiones, se encuentran en buen estado [1].

El mantenimiento predictivo ofrece una solución más apropiada. Consiste en la implementación de técnicas de diagnóstico que pueden aplicarse con las máquinas en servicio (on-line) y sin interferir con su funcionamiento (no invasivas). De este modo, cada elemento de una instalación industrial puede ser observado periódicamente de manera tal de identificar señales que delaten una inminente falla [2].

Dichos sistemas de monitoreo on-line han comenzado a utilizarse en accionamientos de gran potencia o en accionamientos críticos, esto es, máquinas cuya detención intempestiva puede ocasionar serios inconvenientes líneas de producción. Las variables que se utilizan para la detección de fallas son muy variadas y dependen en gran medida del tipo de proceso. En [1] se presenta un listado de las posibles variables a monitorear y su aplicación en componentes eléctricos o mecánicos. Entre otras se mencionan el análisis de vibraciones, la humedad, señales acústicas, termografías, medición de resistencia de aislación y la corriente absorbida por motores eléctricos. En [2] se sugiere aprovechar el monitoreo on-line no sólo con el fin de detectar posibles anormalidades sino también de verificar el rendimiento de motores eléctricos, el nivel de carga, las condiciones de alimentación, entre otros.

En lo que se refiere específicamente a motores eléctricos de inducción, los sistemas de monitoreo on-line se utilizan desde hace aproximadamente 15 a 20 años [3-5]. Las estrategias de detección y diagnóstico de fallas utilizadas son muy variadas, las más conocidas consisten en el análisis de vibraciones, de las corrientes y tensiones de estator, del torque estimado, de la potencia activa o del flujo axial del motor [6-8].

En una primera etapa, estas técnicas tenían como propósito detectar fallas propias de los motores de inducción. Recientemente, se observó la posibilidad de extender la detección y diagnóstico a los sistemas de transmisión de potencia (acoples elásticos [9], reductores de velocidad [10], etc.) o, inclusive, a la carga accionada [11-13]. Estas nuevas líneas de investigación presentan un largo camino por recorrer y obligan a revisar técnicas utilizadas para otros tipos de fallas [14].

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este trabajo se presenta una revisión de las técnicas desarrolladas hasta el momento tendientes a detectar fallas en sistemas mecánicos a partir del seguimiento de las variables eléctricas de motores de inducción. Se pone énfasis en las posibilidades, alcance y facilidad de implementación de cada una de ellas. En las secciones siguientes, se analizan las técnicas orientadas a detección de desalineación en acoplamientos elásticos, las distintas posibilidades para detección de fallas en reductores de velocidad, desbalance de masas y, finalmente, se describen algunos casos interesantes para la detección de fallas en las cargas accionadas. Posteriormente se presenta una discusión sobre la importancia de estas técnicas.

2. DESALINEACIÓN EN ACOPLES ELÁSTICOS

Problemas de desalineación se producen cuando en un accionamiento, la carga mecánica que está unida solidariamente al eje del motor (eje de rotación o eje geométrico) mediante un acople, modifica su posición respecto al eje del motor. Si ese cambio de posición se da alejando un extremo de la carga más que otro, se habla de una desalineación angular. El grado de desalineación, en tal caso, queda determinado por el ángulo entre cada eje. En la Figura 1 (a), el ángulo α representa la desalineación angular. También se puede dar el caso en que el eje de la carga se desplace paralelamente con respecto al eje de rotación, en este caso se habla de una desalineación radial o paralela que en la Figura 1(b), esta desalineación se muestra con la letra d.

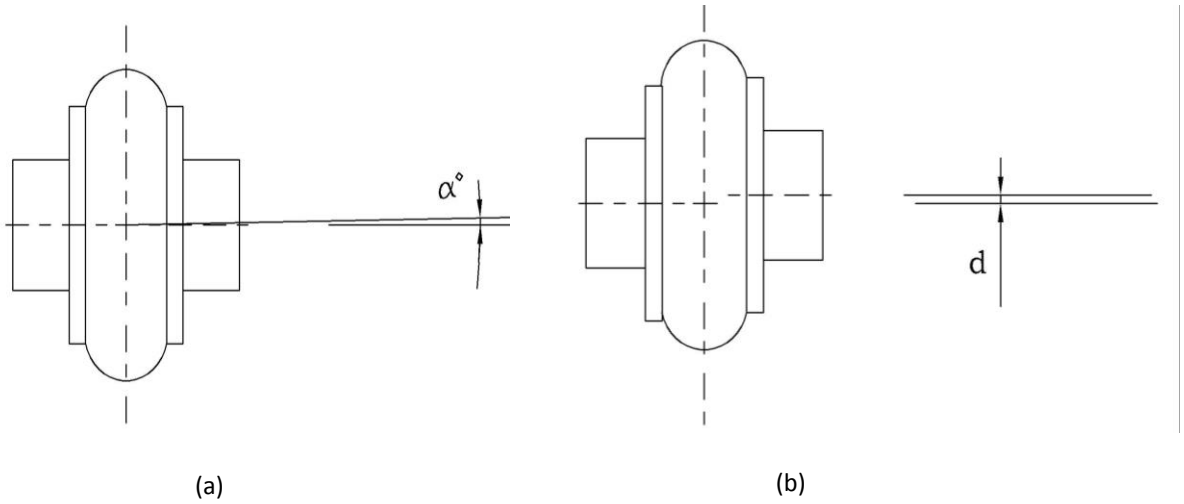


Figura 1: Desalineación angular (a), Desalineación radial (b).

La desalineación es una de las fallas más comunes en las máquinas rotativas, de hecho es la causante del 70% de las vibraciones indeseadas a que son sometidas las máquinas. Este tipo de vibraciones puede ocasionar daños en el rotor de un motor de inducción, como por ejemplo fisuras en las barras [15]. Cabe observar por otro lado, que la desalineación provoca esfuerzos

de flexión sobre el eje del motor, y podría provocar excentricidad mixta [16]. Otras consecuencias de este tipo de anormalidad, son el deterioro prematuro de los acoples y pérdidas adicionales, producto de las altas temperaturas que pueden alcanzar dichos elementos. De situaciones como éstas, surge la necesidad de poder realizar un buen diagnóstico y detectar tempranamente las desalineaciones.

Los primeros intentos de detectar en forma on-line este tipo de fallas consisten en el análisis del espectro de frecuencias de la corriente del estator, o bien, de la estimación del torque eléctrico transmitido por el motor. En este caso, el torque no es medido directamente sino estimado a partir de la medición de las tensiones aplicadas sobre el motor y las corrientes del estator de acuerdo con el modelo matemático presentado en [17].

Las desalineaciones angulares y radiales, provocan componentes armónicas a la frecuencia de rotación del acoplamiento (fr) y a dos veces dicha frecuencia (2fr) en el torque estimado y en la potencia activa y a f+-2fr en las corrientes de estator, siendo f la frecuencia de la fuente de alimentación del motor [16]. Estas componentes de frecuencias que se observan en la corriente de estator suelen denominarse bandas laterales, ya que se hallan a ambos lados de la frecuencia fundamental e igualmente distanciadas.

En [18] se presenta un estudio sobre la posibilidad de detectar desalineación y desbalance de masa en el motor midiendo las componentes espectrales de la corriente de estator. El estudio permite llegar a la conclusión de que la amplitud que toman las bandas laterales varía con el factor de carga del motor. De este modo el diagnóstico se vuelve más complejo debido a que los indicadores de falla deben ser ponderados en función de las condiciones de funcionamiento. En [19], por su parte, se presenta un algoritmo de diagnóstico que consta de una rutina de inicialización (en la que deben registrarse los valores de cada indicador de falla para distintos niveles de desalineación y cargas del motor) y otra de diagnóstico que se ejecuta automáticamente cuando el motor funciona en condiciones normales. Esta rutina emite señales de alarma cuando los indicadores de falla superan los niveles calculados por la rutina de inicialización.

Adicionalmente, apoyando lo dicho en [18 y 19], aparecen como un gran complemento estrategias como el caso de [20] que propone la técnica ANFIS, la cual usa recursos de la lógica difusa y de las redes neuronales, estima la velocidad del motor, el torque mecánico y la magnitud de la corriente del estator, con solo medir una tensión y dos corrientes del motor. En el caso de [15,21] propone el modelo estocástico AR que con realizar la estimación del torque únicamente, puede determinar el grado de desalineación angular y radial que tiene el motor.

Otra alternativa consiste en el monitoreo simultáneo de vibraciones radiales en el motor y corriente de estator. De este modo, aplicando una combinación lineal ponderada que fusiona a ambas señales, es posible obtener indicadores de falla más confiables que los anteriores [22].

3. FALLAS EN REDUCTORES DE VELOCIDAD

Los reductores de velocidad son muy utilizados en procesos industriales que llevan consigo motores de inducción. Estos reductores de velocidad basan su funcionamiento en ruedas dentadas (piñones y coronas) o tornillos sin fin, que se relacionan entre sí y hacen posible transmitir la potencia mecánica del motor, reduciendo la velocidad y a su vez aumentando el torque mecánico [23]. El contacto entre los dientes de los elementos que contienen al reductor de velocidad, pueden sufrir desgates y/o daños. En la Figura 2 (a) se puede apreciar la ruptura de un diente. En la Figura 2 (b) desgastes anormales en los flancos. Y en la Figura 2 (c) desgastes típicos por uso en los flancos del elemento.



a) b) c)

Figura 2: Fallas en ruedas dentadas: (a) Diente roto, (b) Desgastes anormales, (c) Desgastes en los flancos debido al uso.

Este tipo de fallas mecánicas se pueden dar por varias circunstancias como una lubricación no adecuada, suciedad que se filtra en la caja reductora, desgaste natural de sus materiales, altas temperaturas, etc; ocasiona que se genere una oscilación en el torque mecánico [24].

Tradicionalmente se ha detectado este tipo de fallas mediante el análisis de vibraciones y también el de nivel acústico [23], teniendo el inconveniente de ser métodos invasivos al utilizar sensores sobre el motor. Sin embargo el método de análisis de la corriente de estator, aplica también en estas fallas, al poder observar que la falla se ve reflejada en la amplitud de la componente espectral de la frecuencia de rotación del reductor de velocidad [25] y en sus múltiplos.

De acuerdo a lo anterior, en [24], se presenta la detección de fallas en la superficie del diente de una rueda dentada, basándose en el análisis del vector de Park [26], y en [25] se propone analizar la influencia de la excentricidad del piñón y de la corona. En [27] se realizó un experimento con el desgaste y posteriormente con un diente faltante en una corona, los resultados obtenidos comprueban que la falla aparece en las componentes espectrales dadas en [24-25, 27].

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. DESBALANCE DE MASA

El desbalance de masa se puede plantear como una masa puntual que se suma en algún punto de la masa que tiene la pieza que rotará sobre un eje. En tales casos, la masa puntual hace aparecer un torque resistente adicional al que ya tiene la pieza, el cual varía cíclicamente con la velocidad de giro de la pieza [28]. El desbalance genera una fuerza centrífuga [29, 30] que a niveles considerables, ocasiona que el rotor tienda a moverse generando una excentricidad dinámica en el motor [29].

En la Figura 3 puede apreciarse un esquema de un caso de desbalance de masas.

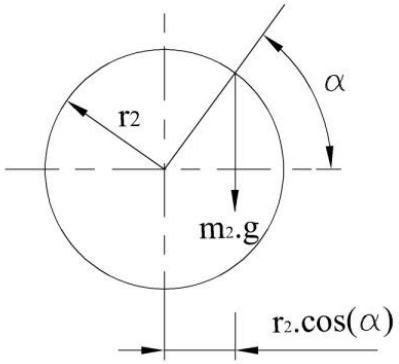


Figura (3): Torque producido por una masa desbalanceada sobre un eje de rotación horizontal.

Los desbalances de masa pueden deberse a roturas en algún elemento de la carga, excentricidades, desprendimiento de materiales de recubrimiento (hornos), o, en general, a cualquier variación en las condiciones de carga a la que se ve sometido un accionamiento. Hay que tener en claro que la misma construcción del rotor de un motor de inducción [29], o bien la carga misma, pueden traer consigo desbalances propios originados en defectos de fabricación o bien, en el caso de la carga, en su propia naturaleza.

De la misma manera que en el caso de desalineación, ha sido demostrado que los desbalances de masas pueden ser detectados a través del seguimiento de las variables eléctricas del motor, como en [28] que plantea detectarlo mediante la estimación del torque eléctrico del motor. Allí se propone analizar la componente espectral del torque eléctrico a la fr (del motor o la del reductor de velocidad), y de acuerdo a su amplitud determinar la severidad del desbalance.

En [31] se menciona otra técnica de detección de desbalance, utilizando una referencia sin falla del motor, por medio de herramientas estadísticas. Esta técnica utiliza el espectro de la corriente de estator [12], y al tener la referencia mencionada anteriormente, se logra independizar el indicador de la falla de las condiciones que tenga de trabajo como por ejemplo diferentes potencias, inercias, acoples, cargas, entre otras.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. DETECCIÓN DE FALLAS EN CARGAS ACCIONADAS

Hasta el momento se han analizado las principales fallas que se pueden presentar en un accionamiento. La carga impulsada por el accionamiento también es susceptible de fallas. Cada carga presenta una característica de funcionamiento que se refleja en las variaciones del torque resistente, y por ende del torque eléctrico del motor. Estas variaciones, por su parte, se manifiestan en la corriente del motor. Por ende, tanto a través del toque como de la corriente de estator es posible monitorear el comportamiento de la carga y detectar cualquier anormalidad.

En [13], por ejemplo, se pone en práctica esta posibilidad sobre un accionamiento que impulsa a una bomba centrífuga. Tanto la estimación del torque como el análisis de las componentes espectrales de la corriente de estator, permiten detectar casos de cavitación en la bomba. En [33] también se analiza la cavitación en la bomba accionada. Para este caso se obtienen las componentes espectrales de la corriente de estator y por medio de lógica difusa se propone un método de detección y reconocimiento de la falla, para tomar una decisión en el mantenimiento predictivo. Esta posibilidad resulta muy ventajosa cuando en una planta de producción existen varias líneas idénticas, lo cual permite comparar dos o más accionamientos gemelos, en tal caso, cualquier anomalía se observa por comparación.

6. CONCLUSIONES

La detección de fallas en accionamiento eléctricos por medio de técnicas on-line y no invasivas se ha ido imponiendo en el mundo durante las últimas décadas. Sus virtudes ya han sido probadas en el ámbito industrial. La posibilidad de extender estas técnicas de detección y diagnóstico a los demás componentes de un accionamiento ha sido observada recientemente. Muchos son los estudios que se realizan en este momento con el fin de avanzar en tal dirección. La bibliografía muestra que dichos avances se orientan a casos de desalineación en acoplamientos, fallas en engranajes, fallas en la carga, etc. Sin embargo, el futuro de estas estrategias de diagnóstico no se limita a dichos casos sino que podría incorporar otras variantes.

De las técnicas analizadas en este trabajo se observa que el análisis espectral de la corriente de estator resulta de muy fácil implementación y ofrece resultados alentadores. La estimación de torque requiere de mayor cantidad de sensores para medir tensiones y corrientes y, además, emplea un algoritmo de mayor complejidad. Su ventaja radica en que las frecuencias asociadas a la falla resultan más fáciles de identificar. Existen otras técnicas más complejas, basadas en herramientas estadísticas, redes neuronales, y combinación de varias mediciones que, si bien ofrecen mayor confiabilidad en cuanto a los resultados, exigen mayor grado de especialización para su implementación y análisis de los resultados.

A modo de conclusión puede afirmarse que se vislumbra un largo camino por recorrer en este tipo de técnicas y, del mismo modo, la posibilidad de aplicación a nivel industrial resulta viable.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Esto último redundaría en la incorporación de una herramienta de gran valor para las acciones de mantenimiento preventivo.

7. REFERENCIAS

[1] Hashemian H. M., Bean W. C. *State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques.* IEEE Trans. On Instrumentation and Measurements, Vol. 60, No. 10, pp. 3480-3492, 2011.

[2] Lu B., Durocher D., Stemper P. *Predictive Maintenance Techniques.* IEEE Ind. Appl. Mag., pp. 52-60, 2009.

[3] Verucchi C., Acosta G., Benger F. *A Review of Fault Diagnosis of Induction Machines*. Latin American Applied Research, Vol. 38, No. 2, pp 113-121, 2008.

[4] Verucchi C., Acosta G. *Fault detection and diagnosis techniques in induction electrical machines*. IEEE Latinoamericana, Vol. 5, No. 1, pp. 41-49, 2007.

[5] Acosta G. G., Verucchi C., Gelso E. *A Current Monitoring System for Diagnosing Electrical Failures in Induction Motors*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, No. 4, pp 953-965, 2006.

[6] Verucchi C., Benger F., Acosta G. *Detección de fallas en rotores de máquinas de inducción: Evaluación de distintas propuestas*. X RPIC – Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, 8 – 10 de Octubre de 2003, San Nicolás, Argentina.

[7] Verucchi C., Acosta G., Gelso E. *Detección en línea de fallas de aislamiento en devanados de máquinas de inducción*. XIX Congreso Argentino de Control Automático, AADECA 2004, Septiembre de 2004, Buenos Aires, Argentina.

[8] Verucchi C. *Detección de fallas en máquinas de inducción mediante análisis de flujo axial*. XI RPIC – Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, ISBN 950-665-340-2, 21 – 23 de Septiembre de 2005, Río Cuarto, Argentina.

[9] Verucchi C., Santillán G., Bossio G., Bossio J. *Detección de fallas en acoplamientos elásticos mediante el estudio de variables eléctricas*. VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, 28 - 30 de Abril de 2015, Cartagena, Colombia.

[10] Verucchi C., Bossio G., Bossio J., Acosta G. *Fault detection in gear box with induction motors: an experimental study*. Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, 6 - 9 de Octubre de 2015, Córdoba, Argentina.

[11] Bellini A., Filippetti ., Franceschini G., Tassoni C., Passaglia R., Saottini M., Giovannini M. M*echanical Failures Detection by Means of Induction Machine Current Analysis: a Case History*. IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, ISBN 0-7803-7838-5, 2003, Valencia, España.

[12] Thomson W., Fenger M. *Current signature analysis to detect induction motor faults*. IEEE Industry Application Magazine, Vol. 7, No. 4, pp. 26-34, 2001.

[13] Stopa M., Cardoso Filho B., Martinez C. *Incipient Detection of Cavitation Phenomenon in Centrifugal Pumps*. IEEE Transactions on industry applications, Vol. 50 No. 1, pp. 120-126, 2014.

[14] Henao H., Capolino G., Fernández-Cabanas M., Filippetti F., Bruzzese C., Strangas E., Pusca R., Estima J., Riera-Guasp M., Hedayati-Kia S. *Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques*. IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 8 No. 2, pp.31-42, 2014.

[15] Haroun S., Nait Seghir A., Touati S., Hamdani S. *Misalignment Fault Detection and Diagnosis using AR Model of Torque Signal,* International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), IAN 15582374, 1-4 Sept. 2015, Guarda, Portugal.

[16] Bossio J., Bossio G., De Angelo C. *Angular Misalignment in Induction Motors with Flexible Coupling.* Industrial Electronics, IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, ISBN 978-1-4244-4648-3, 3-5 Noviembre 2009, Oporto, Portugal.

[17] Comanescu M., Xu L., *An Improved Flux Observer Based on PLL Frequency Estimator for Sensorless Vector Control of Induction Motors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 1, pp 50 – 56, 2005.

[18] Obaid R., Habetler T. *Effect of Load on Detecting Mechanical Faults in Small Induction Motors.* SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, ISBN 0-7803-7838-5, 24-26 Aug. 2003, Atlanta, GA, USA.

[19] Obaid R., Habetler T. *Current-Based Algorithm for Mechanical Fault Detection in Induction Motors with Arbitrary Load Conditions.* Industry Applications Conference. 38th IAS Annual Meeting, ISBN 0-7803-7883-0, 12-16 Oct. 2003, Salt Lake City, UT, USA.

[20] Guzinski J., Abu-Rub H., Iqbal A., Ahmed S. *Shaft Misalignment Detection Using ANFIS for Speed Sensorless AC Drive with Inverter Output Filter.* IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISBN 978-1-4244-9310-4, 27-30 June 2011, Gdansk, Polonia.

[21] Haroun S., Nait Seghir A., Touati S., Hamdani S. *AR Model of The Torque Signal For Mechanical Induction Motor Faults Detection and Diagnosis*. Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 2015 3rd International, INSPEC 15418584, 25-27 May 2015, Tlemcen, Algeria.

[22] Chaudhury S., Sengupta M., Mukherjee K. *Experimental study of induction motor misalignment and its online detection through data fusion.* IET Electric Power Applications, Vol. 7, No. 1, pp 58 – 67, 2013.

[23] Kia S., Henao H., Capolino G. *A comparative study of acoustic, vibration and stator current signatures for gear tooth fault diagnosis*. Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference, ISBN 978-1-4673-0143-5, 2-5 Sept. 2012, Marseille, France.

[24] Kia S., Henao H., Capolino G. *Gear Tooth Surface Damage Fault Detection Using Induction Machine Stator Current Space Vector Analysis*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 62, No. 3, pp. 1514 – 1519, 2015.

[25] Kia S., Henao H., Capolino G. *A Modeling Approach for Gearbox Monitoring Using Stator Current Signature in Induction Machines*. Industry Applications Society Annual Meeting. IAS '08. IEEE, ISBN 978-1-4244-2278-4, 5-9 Oct. 2008, Edmonton, Canadá.

[26] Memala A., Rajini V. *Park's Vector Approach for Online Fault Diagnosis of Induction Motor*. Information Communication and Embedded Systems (ICICES), ISBN 978-1-4673-5786-9, 21-22 Feb. 2013, Chennai, India.

[27] Verucchi C., Bossio G., Bossio J., Acosta G. *Detección de fallas en reductores a engranajes impulsados por motores de inducción: un estudio experimental*. XVI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control, 6 al 9 de octubre de 2015, Córdoba, Argentina.

[28] Verucchi C., Bossio G., Bossio J., Acosta G. *Detección de desbalances de masa en sistemas rotacionales de eje horizontal*. VII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, 28 al 30 de abril de 2015, Cartagena de Indias, Colombia.

[29] Salah M., Bacha K., Chaari A. *Stator Current Analysis of a Squirrel Cage Motor Running Under Mechanical Unbalance Condition.* ISBN 978-1-4673-6459-1, 10th International Multi Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), March 18-21, 2013, Hammamet, Tunisia.

[30] Salah M., Bacha K., Chaari A. *Load Torque Effect on Diagnosis Techniques Consistency for Detection of Mechanical Unbalance*. Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), ISBN 978-1-4673-5547-6, 6-8 May 2013, Hammamet, Tunisia.

[31] Fournier E., Picot A., Régnier J., Yamdeu M., Andréjak J., Maussion P. *Current-Based Detection of Mechanical Unbalance in an Induction Machine Using Spectral Kurtosis With Reference*. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, No. 3, pp. 1879 – 1887, 2015

[33] Perovic S., Unsworth P., Higham E. *Fuzzy Logic System to Detect Pump Faults from Motor Current Spectra*, Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE ISBN 0-7803-7114-3, Sept. 30 2001-Oct. 4 2001, Chicago, IL, USA.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a las Facultades de Ing. de la Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires y de la Universidad Nacional de Río Cuarto, a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y al CONICET.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN TORNO A LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO HOSPITALARIO EN INSTITUCIONES DE SALUD DE MEDELLÍN, COLOMBIA

William Orozco Murillo[1], Gonzalo Narváez Benjumea[2], Willton Uber García Gómez[3], Andrés Felipe Quintero Rodas[4], Adolfo Escobar Ordoñez[5], Andrés Felipe Ramírez Barrera[6]

[1]Facultad de Ingeniería - Institución Universitaria Pascual Bravo Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador, Medellín, Colombia
william.orozco@pascualbravo.edu.co

[2] Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas - Instituto Tecnológico Metropolitano Calle 73 No 76A-354 Vía al Volador, Medellín, Colombia
gonzalonarvaez@itm.edu.co

[3] Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas - Instituto Tecnológico Metropolitano Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador, Medellín, Colombia

[4] Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas - Instituto Tecnológico Metropolitano Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador, Medellín, Colombia

[5] Facultad de Ingeniería - Instituto Tecnológico Metropolitano Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador, Medellín, Colombia

[6] Facultad de Ingeniería - Instituto Tecnológico Metropolitano Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador, Medellín, Colombia

RESUMEN

Desde el año 2013 se viene realizando por parte del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), de la Institución Universitaria Pascual Bravo (IU Pascual Bravo), un nuevo estudio acerca del estado de la gestión de mantenimiento en el servicio de urgencias de tres clínicas y hospitales del área metropolitana de la ciudad de Medellín, Colombia, en el contexto del proyecto de investigación de producción más limpia en salud, con el fin de determinar su evolución con respecto a los resultados encontrados en el estudio de 2008 y su aporte desde el modelo de producción más limpia en las unidades de servicios de salud en los niveles III y IV.

En una de las instituciones de salud seleccionadas y en la cual ya se terminó la investigación, se encontró como resultado final que la Gestión de Mantenimiento de los equipos biomédicos utilizados en urgencias es muy buena con una valoración del 86% y la Metrología y Gestión de Mantenimiento en los equipos biomédicos es excelente con una valoración del 96%. Valor obtenido del análisis del instructivo aplicado para la recolección de información a partir de la Guía Sectorial de Producción más Limpia en Salud a algunos grupos de equipos de alto riesgo (monitores de signos vitales, desfibriladores, tensiómetros, servocunas, electrocardiógrafos y ventiladores mecánicos), lo que permitió concluir que en la actualidad la institución realiza una adecuada gestión de mantenimiento y un control metrológico excelente a los equipos de esta área, esto indica que los equipos solo requerirán mantenimiento correctivo cuando sea programado éste; con lo cual se reducen los paros de emergencia, los repuestos utilizados, los insumos, y los demás elementos utilizados en las reparaciones, por lo tanto, se reducen los contaminantes y residuos generados en esta actividad; ayudando así a la producción más limpia de la institución.

Palabras Claves: *Gestión de mantenimiento, hospitales, producción más limpia*

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de producción más limpia se relaciona estrechamente con el Uso Racional de la Energía, el mejoramiento de las prácticas en la prestación del servicio del sector salud y otras acciones derivadas de éste.

La producción más limpia desde los procesos de trabajo, es una de las metodologías de mayor aplicación recientemente en las empresas y en las instituciones prestadoras de salud tanto del sector público como privado [1], para generar desarrollo tecnológico e innovación de bienes y servicios. Estas metodologías implican la reducción de los impactos sobre el medio ambiente, la minimización de los riesgos en la salud de los trabajadores y la disminución de los costos generados en la producción de desechos y emisiones atmosféricas. De aquí, que producción limpia se perfile como la meta que será alcanzada con las nuevas inversiones, en tanto que la búsqueda sistemática del mejoramiento continuo, corresponde al concepto de producción más limpia, que obedece a un proceso dinámico y sistemático, el cual no se aplica una sola vez, sino permanentemente, en cada una de las fases del ciclo de vida del producto o en la prestación de los servicios.

Para la aplicación de la metodología de producción más limpia en una institución de salud debe considerarse que éste es un establecimiento donde se llevan a cabo un conjunto de actividades complejas, asistidas por sistemas también complejos, destinados a restaurar y/o recuperar la salud de personas, esto implica estar frente a un problema singular de servicios que debe tener seguridad y continuidad los 365 días del año, las 24 horas del día, de manera que otorgue confiabilidad al funcionamiento de todos los Departamentos o servicios que conforman el hospital [2].

Con el proyecto se busca la Identificación de acciones de mejora en la prestación del servicio de salud en tres [3] instituciones del nivel III o IV, ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), de Medellín Colombia, a través de la aplicación del modelo de Producción más Limpia (P+L)

Para lograr esto el personal encargado de la gestión de mantenimiento debe ser capaz de garantizar el funcionamiento de los equipos, ambientes o sistemas de manera que el hospital siga produciendo y brindando servicios de forma continua.

Debido a lo anterior es importante que en las instituciones de salud se realicen buenas prácticas en la gestión de mantenimiento; prácticas que permitan conservar y mantener las

instalaciones, equipos y máquinas, así como los edificios, espacios abiertos, en un estado lo más cercano posible a su estado inicial y, de ser posible, mejorarlo aún más [2].

Debido a esto las buenas prácticas en la gestión de mantenimiento, deben estar enfocadas a:

- La calidad, en el sentido más amplio, especialmente si se está hablando de mantener el Hospital en óptimas condiciones de funcionamiento, donde los servicios a los pacientes no pueden suspenderse ni postergarse [2].

La economía, no sólo aplicada al dinero, sino también referida a otros valores (el tiempo, los esfuerzos y recursos).

• El desarrollo del personal, pues cada día más se exige a la fuerza efectiva mayor eficiencia operativa que se obtiene con entrenamiento y formación, aun y cuando al inicio se mire como un gasto y no como una inversión [4].

• El orden como concepto, aplicado a la mejor forma de aprovechamiento del tiempo y los espacios.

Para lograr el cumplimiento de los parámetros establecidos anteriormente, la Gestión del Departamento de Mantenimiento se debe organizar de manera que se alcancen los siguientes aspectos [2]:

• Una infraestructura simple, con pocos niveles y agrupando actividades de acuerdo a las diferentes especialidades de atención dentro de un hospital.
• Una organización eficaz.
• Buena comunicación e información.
• Objetivos claros, mensurables y conocidos por todos.

Si lo anterior se logra dentro de las instituciones de salud, se podrá definir el plan de mantenimiento más adecuado para el equipo, de acuerdo a su nivel de riesgo, a su estado funcional, a su costo, se podrá llevar un historial de sus mantenimientos, se podrá realizar mantenimientos preventivos y predictivos a los equipos, máquinas e instalaciones y no mantenimientos correctivos no programados [5] que son los causantes de altos residuos en accesorios, insumos, repuestos y energía que no ayudan a cumplir con los principios de la producción más limpias en estas instituciones.

Por lo anterior desde el año 2008 en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín

ISBN: 978-987-1676-63-7

(Colombia) y a través del Grupo de Investigación e Innovación Biomédica (GI²B); se están formulando proyectos de investigación tendientes a determinar el estado de la gestión de mantenimiento de algunas instituciones de salud de tercer y cuarto nivel de atención.

2. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizara para la ejecución del proyecto ha sido adaptada del modelo establecido por la Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo Industrial (ONUDI) y la Guía Sectorial de Producción más Limpia en salud a algunos grupos de equipos de alto riesgo (monitores de signos vitales, desfibriladores, tensiómetros, servocunas, electrocardiógrafos y ventiladores mecánicos). Las primeras tres fases de este modelo metodológico están encaminadas a:

1. Las visitas de contacto para la sensibilización y el auto diagnóstico por parte de las instituciones de salud preseleccionadas. Se pretende también asegurar el respaldo, el apoyo y el compromiso decidido gerencial y el equipo directivo de primera línea, a través de comunicación escrita y la selección del equipo de trabajo.

2. Se aplicará una encuesta a los jefes y técnicos encargados de la gestión de mantenimiento en cada una de las instituciones seleccionadas. En el aplicativo se incluirán los siguientes aspectos:

Equipamiento en la sección de urgencias: Con qué equipos cuenta el servicio, antigüedad de los equipos, cuáles son los equipos que más fallan, cuáles son las fallas más comunes encontradas, existencias de hojas de vida, entre otros.

Personal dedicado al mantenimiento de equipos y dispositivos biomédicos: Cargo y profesión del personal encargado de planificar y controlar el mantenimiento de los equipos del servicio, número de personas que hacen parte de este proceso.

3. Gestión y desarrollo del mantenimiento: Procedimiento que se desarrolla para el mantenimiento de los equipos, frecuencia de estos mantenimientos, fortalezas y debilidades que tiene la gestión del mantenimiento en el hospital, articulación de la metrología y la gestión del mantenimiento en el servicio de urgencia y planes de habilitación, certificación y acreditación que tiene la institución.

4. Se realizará la interpretación de los hallazgos en las preguntas de la encuesta mediante una valoración cualitativa y porcentual que permita determinar el grado de cumplimiento de cada uno de los ítems definidos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. RESULTADOS

Entre 2008 y 2009 se realizó un proyecto de investigación cuyo objetivo fue caracterizar la gestión de mantenimiento en servicios de urgencia de clínicas y hospitales ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá de Medellín, a través de la realización de una encuesta, practicada a jefes y técnicos de mantenimiento en once (11) entidades prestadoras de servicios de salud, clasificadas en nivel 3, y pertenecientes a la red de salud del municipio de Medellín.

Entre las instituciones encuestadas se encontró que la causa de falla más común en los equipos del servicio de urgencia es el mal manejo de los equipos (80%) por parte de los operarios, y que el 70% del mantenimiento es realizado por personal con experiencia en el área (Tecnólogos en mantenimiento de equipo biomédico e Ing. Electrónicos); en las 11 instituciones públicas y privadas encuestadas, se encontró que solo se contaban con cronogramas de mantenimiento, y/o con información desactualizada concerniente a las hojas de vida de los equipos, planes de mantenimiento o adquisición y baja de equipos [6]. Además se encontró que no había políticas claras en cuanto al manejo de los residuos generados por la gran cantidad de mantenimientos correctivos no programados que se realizaban a los equipos, no se llevaba una trazabilidad de la información consignada en las hojas de vida y no había unas rutinas actualizadas de los mantenimientos preventivos y de los protocolos de mantenimiento utilizados para los diferentes equipos.

Desde el año 2013 se viene realizando por parte del ITM, de la Institución Universitaria Pascual Bravo (IU Pascual Bravo) en convenio con la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL Nor Occidente); Gestión y Servicios Ambientales S.A.S (GSA), ARP-COLMENA, un nuevo estudio acerca del estado de la gestión de mantenimiento en el servicio de urgencias de tres clínicas y hospitales del Área Metropolitana de la ciudad de Medellín, en el contexto del proyecto de investigación de producción más limpia en salud, con el fin de determinar su evolución y su aporte desde el modelo de la producción más limpia en las unidades de servicios de salud en los niveles III y IV.

En una de las instituciones de salud seleccionadas y en la cual ya se terminó la investigación, se encontró como conclusión final que la Gestión de Mantenimiento de los equipos biomédicos utilizados en urgencias es muy buena con una valoración del 86% y la Metrología y Gestión de Mantenimiento en los equipos biomédicos es excelente con una valoración del 96%. Valor obtenido del análisis del instructivo aplicado para la recolección de información a partir de la Guía Sectorial de Producción más Limpia en salud a algunos grupos de equipos de alto riesgo (monitores de signos vitales, desfibriladores, tensiómetros, servocunas, electrocardiógrafos y ventiladores mecánicos).

ISBN: 978-987-1676-63-7

Esta valoración también destaca la evolución y las mejoras logradas en esta institución desde el año 2009 al contar ya con las hojas de vida, protocolos de mantenimiento preventivos actualizados teniendo en cuenta el nivel de riesgo de los equipos, tener un plan presupuestal para hacer mantenimiento, reposición y actualización de los equipos, además de tener personal idóneo, capacitado, entrenado y con las competencias adecuadas, para llevar a cabo el mantenimiento seleccionado en los diferentes dispositivos y/o equipos; por último se realiza un uso racional de los repuestos e insumos de acuerdo al plan anual de mantenimientos correctivos, preventivos y predictivos establecidos.

Lo anterior muestra que en esta institución de salud se realiza con respecto al instructivo aplicado una adecuada gestión de mantenimiento a los equipos, esto indica que los equipos solo requerirán mantenimiento correctivo cuando sea programado éste; con lo cual se reduce el número de paros de emergencia, los repuestos utilizados, los insumos, y los demás elementos utilizados en las reparaciones, por lo tanto, se reducen los contaminantes y residuos generados en esta actividad; ayudando así a la producción más limpia de las instituciones.

4. DISCUSIÓN

Diversas instituciones del sector salud de la ciudad de Medellín, se unen en el año 2000 para firmar el Programa “Salud sin Fronteras”, en donde participaron la Clínica Cardiovascular Santa María, el Hospital Universitario San Vicente de Paul, el Hospital Universitario Pablo Tobón Uribe, la Clínica Medellín, la Clínica las Américas, la Clínica el Rosario, la Clínica las Vegas, Emergencia Médica Integral (EMI), como apoyo logístico [7].

La alianza de estas ocho [8] Instituciones permitió la disponibilidad de 107 médicos, especialistas y profesionales, 91 unidades de cuidados intensivos, 30 unidades de diagnóstico, 73 quirófanos y 1653 camas para prestar servicios en 15 ramas de la medicina.

Gracias a estas alianzas la ciudad de Medellín inicio la estrategia del Clúster de la salud en el año 2006 [9]. Un Clúster es la concentración geográfica de empresas e instituciones especializadas y complementarias en la actividad de medicina, odontología, educación, producción y/o comercialización de insumos hospitalarios, tecnología biomédica, telemedicina, producción y/o distribución de medicamentos, entre otros, creando un clima de negocios en el que todos pueden mejorar su desempeño, competitividad y rentabilidad gana/gana en el sector [10].

El papel de los gobiernos, individual y colectivamente, es el de crear las condiciones por las cuales las organizaciones productivas y prestadoras de servicios se vean encaminadas a adoptar métodos de producción más limpios en los distintos sectores económicos del país. Los problemas ambientales de las instituciones de salud son los resultantes del modo de

interacción entre el medio biofísico y una población humana [11], expresándose tanto en dicho medio biofísico como en la cultura construida por esa población. Su expresión más visible es el deterioro progresivo en los ecosistemas del planeta, con efectos al interior de los sistemas sociales que se traducen en la dificultad cada vez mayor para garantizar la sostenibilidad de las especies y el mantenimiento de la calidad de vida. Por lo anterior en el año de 2005 se expide la Guía de P+L en hospitales, clínicas y centros de salud [12].

El propósito de este estudio es mostrar como las instituciones de salud de la ciudad a través de la realización de unas buenas prácticas en la gestión de mantenimiento de los equipos e instalaciones; puede ayudar a la P+L de éstos. Lo anterior se logra realizando mantenimientos preventivos y predictivos, no realizando mantenimientos correctivos no programados [13], con personal calificado para los mantenimientos, con historiales, hojas de vida de equipos e instalaciones actualizados, con protocolos de mantenimiento bien diseñados, con formatos de planeación y programación bien definidos, con operación de los equipos por personal bien entrenado y capacitado [14]; prácticas que en muchas de las instituciones de salud públicas y privadas de la región y el país no se dan de acuerdo al estudio realizado por ITM en el 2008 [6].

5. CONCLUSIONES

La mayoría de las instituciones que fueron estudiadas en 2008 tienen deficiencias en la organización de la gestión de mantenimiento, ya que muchos de ellos solo cuentan con un cronograma de mantenimiento y la información concerniente a hojas de vida de los equipos, a planes de mantenimiento, a planes de adquisición y baja de equipos no se encuentra actualizada; esto no permite que desde la gestión de mantenimiento se dé un aporte valioso a la P+L de las instituciones de salud.

Los estudios realizados a partir del año 2013 en una de las instituciones de salud seleccionadas arrojaron que la Gestión de Mantenimiento de los equipos biomédicos utilizados en urgencias es muy buena con una valoración del 86% y la Metrología y Gestión de Mantenimiento en los equipos biomédicos es excelente con una valoración del 96%, lo que muestra la evolución y la ejecución de los planes de mejoramiento que ha tenido dicho tema en las instituciones de salud de la ciudad de Medellín.

Es necesario que las instituciones de educación superior con programas de biomédica realicen diagnósticos en las diferentes instituciones médicas, con el fin de formar tecnólogos y profesionales idóneos basados en las necesidades y debilidades encontradas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. REFERENCIAS

[1] Minprotecciónsocial. Resolución 1441, procedimientos y condiciones que debe cumplir los Prestadores de Servicio de Salud para habilitar los servicios. Santa Fe de Bogotá: Supersalud, 2014.

[2] Martinez, W. Gerencia del mantenimiento en hospitales. Maintenance Management Healthcare Administration. Honolulu, Hawai: Atlantic International University septiembre 2009; p 7.

[3] OMS. Sistema computarizado de gestión del mantenimiento. Suiza: Organización Mundial de la Salud, 2012, 42p.

[4] Cruz AM., Usaquén S., Vanegas N., Lopera C. Aplicación de técnicas de clustering para caracterizar proveedores de servicios de mantenimiento. Rev Salud Pública; 12 (3): 464-73. 2010.

[5] Ardila M, M. I., Hincapié Z, D. A., Rodríguez G, D., & Ardila M, J. G. (2015). La gerencia del mantenimiento: Una revisión del estado del arte. Disponible en: http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1719

[6] Orozco W., Cortés F. Caracterización de la gestión del mantenimiento de equipo biomédico en servicios de urgencia de clínicas y hospitales de Medellín en el período 2008-2009. En: Rev Cienc Salud; 11 (1), 35 – 44, 2013.

[7] Herrera CM. La evolución y el futuro de la producción más limpia en Colombia. Consultado: 25/09/2011. Disponible en: http://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/26a12.pdf

[8] Orozco W., Narváez G. Maintenance Management in Biomedical Equipments in the Context of the Research Project Cleaner Production in the Health Cluster of Medellín, Colombia. Revista Ingeniería Biomédica, 9 (18) ,15-19, 2015

[9] Marulanda JA., Correa G., Mejía LF. El clúster de salud en Medellín, ventaja competitiva alternativa para la ciudad. Consultado: 25/09/2011. Disponible en: http://journal.ean.edu.co/index.php/Revista/article/viewFile/285/253

[10] Abreu, J., Ventura M, P., Fernandes, S., & Zacarias, M. Business Processes Improvement on Maintennce Management: a Case study. Procedia Technology, 9, 320-330, 2013.

[11] Importancia de la Producción Más Limpia en IPS. Secretaría de Ambiente de Bogotá. Consultado: 25/09/2011. Disponible en: http://acercar.ambientebogota.gov.co/industria/biblioteca/MANUAL-DE-BUENAS-PRACTICAS/MANUAL%20SECTOR%20IPS/capitulo1.%20Importancia%20de%20la%20Producci%C3%B3n%20mas%20limpia%20en%20IPS..pdf

[12] Guía Sectorial de Producción más Limpia, hospitales, clínicas y centros de salud. Publicado por el Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales. Consultado: 02/09/2011. Disponible en: http://www.cnpml.org/templates/panalVerde/images/publicaciones/GuiaSectorialDePMLEnHospitalesClinicasyCentrosDeSalud.pdf.

[13] Mejía U, Fernando. Competencias en la formación del profesional de mantenimiento. ACIEM, 124 (3974), 22-25, 2015

[14] Potes R, P. A., Kamsu-Foguem, B., & Noyes, D. Knowledge reuse integrating the collaboration from experts in industrial. Knowledge-Based Systems, 171-186, 2013.

Agradecimientos

Los autores expresan los agradecimientos, por el apoyo y el compromiso asumido en el logro de resultados del proyecto de investigación a:

- Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM)
- Institución Universitaria Pascual Bravo (IU Pascual Bravo)
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL Nor Occidente)
- Gestión y Servicios Ambientales S.A.S (GSA)
- ARP-COLMENA
- Instituciones de salud del nivel III y IV de complejidad médica, que permitieron la recolección, el análisis de la información y la intervención de las oportunidades de mejoramiento en dichas unidades de servicios de salud.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANÁLISIS DE VARIACIONES DE LAS VELOCIDADES CRÍTICAS DE UN ROTOR PRODUCTO DE CAMBIOS DE RIGIDEZ DE LOS COJINETES

Fernando Palmieri *[1], Darío Violante [1] y Andreas Klempnow [2]

*[1] Facultad Regional San Nicolás. Universidad Tecnológica Nacional
Colon 332 San Nicolás Buenos Aires Argentina
correo-e: fpalmieri@frsn.utn.edu.ar
[2] Facultad Regional Delta. Universidad Tecnológica Nacional
San Martín 1171 Campana Buenos Aires Argentina.

RESUMEN

Las turbomáquinas modernas logran elevadas potencias de generación con menores dimensiones físicas respecto de sus predecesoras, esto implica que deben funcionar en condiciones donde los rotores se comportan como rotores flexibles y superan dos o más de sus velocidades críticas. Es por ello que el conocimiento de dichas velocidades es fundamental para su diseño, operación y mantenimiento.

Las velocidades críticas se relacionan con la distribución de masas del rotor, con su rigidez, con la rigidez de los cojinetes y pedestales. En este trabajo se analiza, como se comportan las velocidades críticas de un rotor real de una turbina de una central de generación, ante la variación de las propiedades de rigidez de sus cojinetes.

Se utiliza el método de la matriz de transferencia para determinación numérica de formas modales y frecuencias críticas de un rotor. Dicho método es de sencilla aplicación, se basa íntegramente en ecuaciones de la mecánica clásica y permite obtener resultados adecuados, empleando poca capacidad de cálculo y sin la necesidad de tener un modelo sólido del equipo. Además, es un método probado en la bibliografía del tema.

Las características del cojinete se estiman a partir de las dimensiones de los elementos que interactúan, de las propiedades físicas del lubricante y de los elementos mecánicos en contacto, empleando modelos y datos obtenidos de la literatura.

Finalmente, los resultados se utilizan para estudiar cómo, ante pequeñas variaciones de alineación y de temperatura del lubricante, se producen variaciones de las velocidades críticas del equipo real una vez en funcionamiento. A partir de ello se pueden comprender mejor ciertas diferencias que existen en las respuestas dinámicas de un par de equipos idénticos.

Palabras Claves: *Velocidades críticas, Turbogenerador, Matriz de Transferencia.*

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de las velocidades críticas es fundamental para las modernas turbo-máquinas. Un correcto diseño debe considerar que la máquina pueda superar, en caso de ser necesario, dichas velocidades sin comenzar a vibrar con amplitudes excesivas. La operación segura de la misma requiere también un conocimiento de estas velocidades por parte de los operarios.

La demanda creciente de equipos de alta potencia, elevado número de vueltas y bajo peso, ocasiona que en muchos casos, estos equipos funcionen por encima de una o varias de sus velocidades críticas. Además, las alteraciones que pueda sufrir el equipo en operación, con el correr de los años, pueden ocasionar que las mismas sufran ligeras variaciones. Algunas de estas variaciones se pueden deber a cambios de la viscosidad del lubricante, desgaste de los cojinetes o a modificaciones intencionales.

Como sugiere la literatura específica [1,2], la forma constructiva de los cojinetes puede alterar las velocidades críticas de un rotor. En líneas generales cuando la rigidez de los cojinetes es muy alta respecto a la del eje, la primera velocidad crítica se asemejará a la correspondiente a la primera forma modal de deformación como eje flexible soportado por cojinetes rígidos. Si, en cambio, la rigidez de los cojinetes es muy baja respecto de la del eje, la primera velocidad crítica se asemejará mas a la de un eje rígido soportado sobre resortes ideales. Finalmente las fuerzas viscosas introducidas por los cojinetes en el sistema pueden atenuar de la respuesta dinámica cuando el rotor gira en las velocidades críticas, pero también pueden producir inestabilidades o vibraciones auto inducidas.

Actualmente, el método de los elementos finitos y el método de la matriz de transferencia son los dos caminos más usuales para analizar el comportamiento de los sistemas rotor-cojinete. La aplicación de modelos de elementos finitos en dinámica de rotores ha sido exitosamente verificada [3]. No obstante, el principal inconveniente de este camino es que emplea una gran capacidad de cálculo, la programación es compleja y, en general, requiere un conocimiento preciso de la geometría.

El método de la matriz de transferencia, en cambio, resuelve el problema dinámico en el dominio de las frecuencias, utilizando un procedimiento de aproximación que consiste en partir de un extremo del rotor, donde las condiciones de contorno son conocidas. Luego usando expresiones lineales simples se va determinando los parámetros del rotor en determinados puntos característicos a lo largo del mismo (cambios de sección, apoyos intermedios, rodetes de alabes, etc.). Se continúa avanzando en forma progresiva hasta llegar al otro extremo. La satisfacción de las condiciones de contorno de este último extremo y en todos los puntos intermedios permite

ISBN: 978-987-1676-63-7

plantear un sistema de ecuaciones lineales para determinar las velocidades críticas. Luego con esa solución se puede obtener el estado del rotor en esos puntos característicos intermedios a través de las matrices de transferencia.

Este método tiene como principal ventaja que no requiere almacenar o manipular grandes matrices de datos, se puede trabajar con datos concretos, como son los diámetros del rotor y las masas de los componentes y resulta más rápido para obtener resultados cuando la capacidad de cálculo es reducida.

La idea fundamental del método de las matrices de transferencias fue propuesta por Holtzer para sistemas sometidos a vibraciones torsionales, luego Myklestad lo generalizó para sistemas sometidos a la flexión [4]. Desde entonces distintas publicaciones fueron ofreciendo generalizaciones del método para sistemas rotor-cojinete considerando el uso de la variable compleja, el comportamiento en dos direcciones, incluyendo los efectos giroscópicos, de torsión y flexión combinadas, usando distintos modelos para los cojinetes, etc. [3]

Como sugiere Murphy [5] este método en algunos casos puede presentar errores en la determinación de algunas de las velocidades críticas, pero existen técnicas para asegurar la precisión y mejorar los resultados. Este autor, en otro trabajo, sostiene que puede limitarse el error a un máximo del siete por ciento [6] si se tiene cuidado en optimizar correctamente el algoritmo de cálculo.

Lund en su trabajo [7] sugirió incluir la influencia de los soportes del rotor en el modelo incorporando constantes de rigidez y amortiguación de los cojinetes. De esta forma muchos autores han incluido los soportes y cojinetes [1,4] como elementos que se representa mediante un coeficiente o una matriz de coeficientes dentro del método de la matriz de transferencia, algunos de ellos tomaron modelos lineales, otros han considerado en su modelo el ancho del cojinete [8], e incluso se han considerando coeficientes no lineales [9] .

Para determinar estos coeficientes existen muchas expresiones que se relacionan con las dimensiones físicas (diámetro, ancho y juego radial), con la viscosidad del lubricante y la velocidad de rotación del equipo [1]. García en su Tesis [10] hace una recopilación de las formas de modelar numéricamente y determinar experimentalmente estos coeficientes y Sánchez en un trabajo reciente [11] analiza la influencia de la viscosidad en los coeficientes dinámicos de los cojinetes.

En este trabajo se analiza las variaciones de las velocidades críticas de un rotor de una turbina de generación ante variaciones en el juego radial en los cojinetes, para ello se emplea el método de la matriz de transferencia en la formulación descripta por Vance [1] que has sido descripta en un trabajo previo [12] y los coeficientes de los cojinetes se determinan usando el modelo empleado por García [10].

Este análisis se empleo para poder comprobar si variaciones de juego radial podían explicar las diferencias de respuesta durante el arranque de máquinas similares.

2. EQUIPO ANALIZADO

El equipo estudiado es una turbina Westinhouse 251 B11, que se muestra esquemáticamente en la figura 1. La turbina es de giro anti-horario y se acopla a un generador de giro horario viendo la máquina desde el escape. El rotor de la turbina de gas tiene una masa de aproximadamente 16000kg, una velocidad nominal de 5420rpm y se acopla al generador por una caja reductora simple. La potencia normal de funcionamiento es de 45MW y el combustible empleado es gas natural.

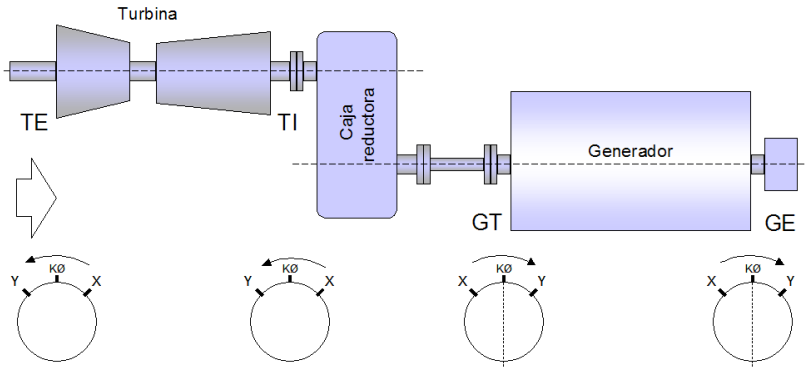


Figura 1: Esquema de la Turbina a gas con los puntos de medición en los cojinetes.

El rotor analizado está formado por dos ejes unidos por un acople mediante tornillos, el eje de la turbina propiamente dicho y el del piñón de la caja reductora. En la Figura 2 se presentan fotos de ambas partes y en el esquema de la Figura 3 se muestra como es el conjunto armado.

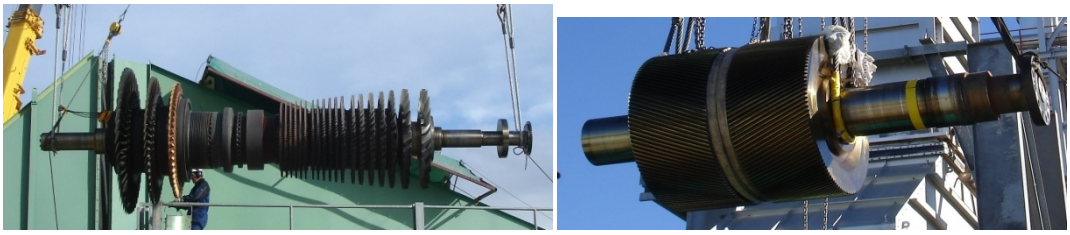


Figura 2 Fotos del eje y piñón que forman el rotor

ISBN: 978-987-1676-63-7

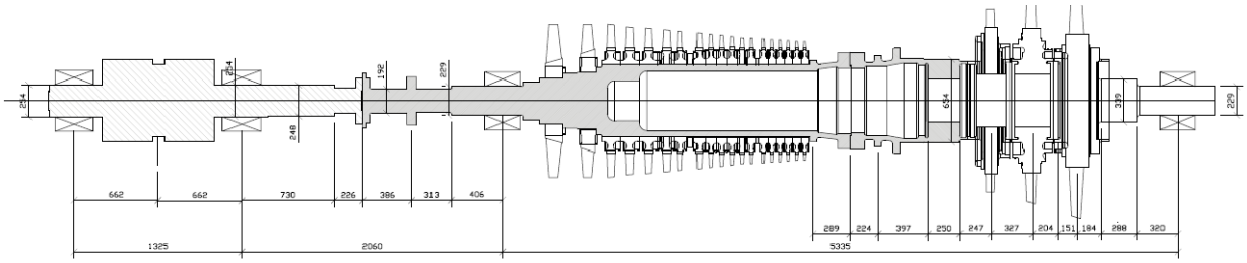


Figura 3 Esquema del conjunto armado

La tabla 1, resume las propiedades de los cuatro cojinetes del rotor cuyas constantes se deben determinar numéricamente. Todos los cojinetes se encuentran lubricados con aceite ISO 46 y la temperatura de operación promedio es de entre 45 y 50°C. La viscosidad del aceite en ese rango de temperaturas se encuentra entre 35 y 39 cSt.

Tabla 1: Dimensiones de los cojinetes

Cojinete	Posición	Carga estática	Diámetro	Ancho
1	Reductor lado libre	14,9kN	254mm	305mm
2	Reductor lado acople	17,2kN	254mm	305mm
3	Turbina lado Acople	61,7kN	230mm	275mm
4	Turbina lado Libre	58,7kN	230mm	275mm

3. MODELADO DE LAS CONSTANTES DINÁMICAS DE LOS COJINETES.

Las constantes de rigidez del cojinete dependen de la excentricidad del rotor respecto del cojinete y el ángulo de inclinación de la excentricidad máxima respecto de la vertical. A modo de ejemplo, algunas de las expresiones extraídas de la literatura [1,10] para determinar numéricamente estas constantes de resorte de los cojinetes son las siguientes:

$$K_{xx} = \frac{F}{C} 4\{2\pi^2 + (16 - \pi^2)\epsilon^2\} Q(\epsilon) \quad (1)$$

$$K_{yy} = \frac{F}{C} 4 \frac{\{\pi^2 + (32+\pi^2)\epsilon^2 + 2(16-\pi^2)\epsilon^4\}}{(1-\epsilon^2)} Q(\epsilon) \quad (2)$$

$$Q(\epsilon) = \frac{1}{\{\pi^2 + (16-\pi^2)\epsilon^2\}^{3/2}} \quad (3)$$

Donde F es la carga del cojinete; C es el juego radial y ϵ es la relación entre la excentricidad y el juego radial llamada excentricidad adimensional.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La excentricidad para un cojinete de película completa se relaciona con las dimensiones del cojinete mediante el número de Sommerfeld [1] por la siguiente expresión:

$$S = \frac{(1-\epsilon^2)}{\pi(L/D)^2\epsilon}\sqrt{\frac{1}{\pi^2+(16-\pi^2)\epsilon^2}} \quad (4)$$

Donde S es el número de Sommerfeld ($S = [(\mu NLD)/F][D/(2C)]^2$), L es el largo de cojinete, D el diámetro, C el juego radial, N las rpm del rotor, F es la carga del cojinete y C es el juego radial del mismo.

4. RESULTADOS.

4.1. Constantes de los cojinetes

Las constantes de rigidez se determinaron inicialmente como promedio para el rango de velocidades de trabajo de la turbina. El juego radial se estimo a partir de los diagramas polares obtenidos de los sensores de proximidad montados en el equipo. Para ello se graficó (Figura 4) la posición promedio durante el arranque como se muestra a continuación.

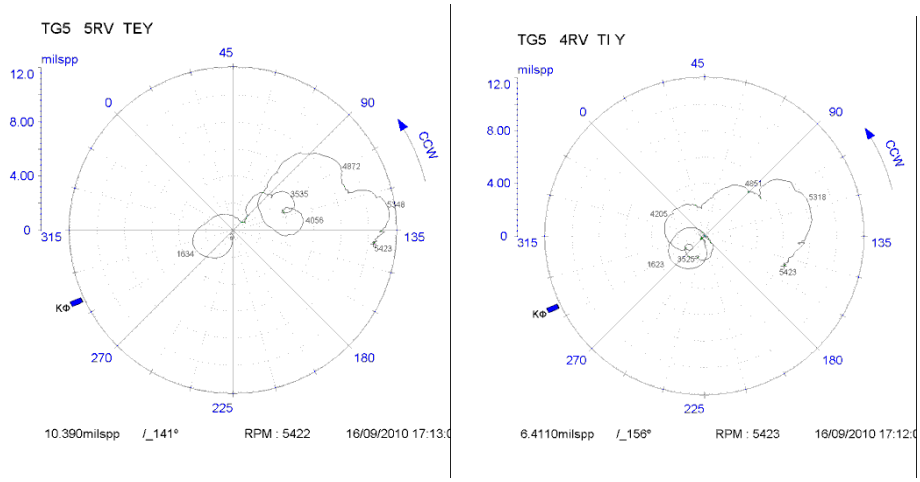


Figura 4 Diagramas polares de arranque

De estos diagramas se deduce que el eje tiene al menos 12mils (300µm) para moverse, entonces ante la imposibilidad de desarmar el equipo para medir este juego se tomo la decisión de resolver el modelo numérico con juegos radiales de entre 200 y 600µm.

Los valores promedio de rigidez vertical obtenidos se resumen en la Tabla 2. La variación teórica de la excentricidad con de la turbina se puede observar en la Figura 5 y la variación de la rigidez vertical del cojinete 1 y 3 con la velocidad angular para un juego radial de 400µm en la Figura 6.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2. Rigidez vertical de los cojinetes

Cojinete	Posición	Carga estática
1	Reductor lado libre	42,2MN/m
2	Reductor lado acople	55,9MN/m
3	Turbina lado Acople	200,1MN/m
4	Turbina lado Libre	190,2 MN/m

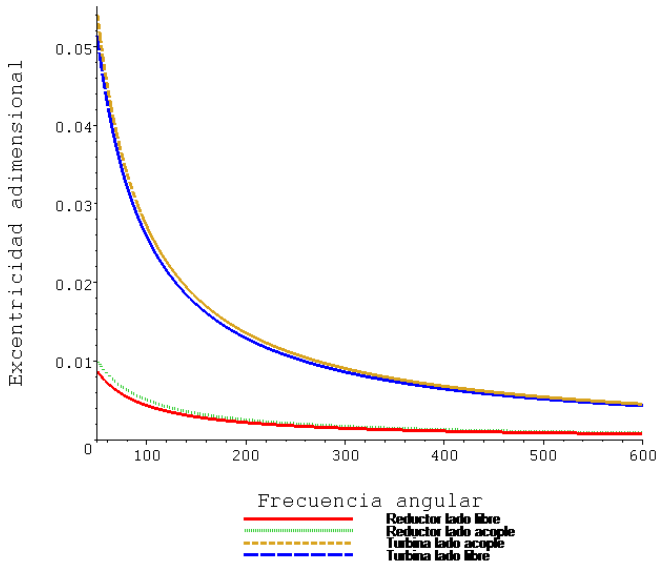


Figura 5: Variación teórica de la excentricidad con la velocidad angular de la turbina

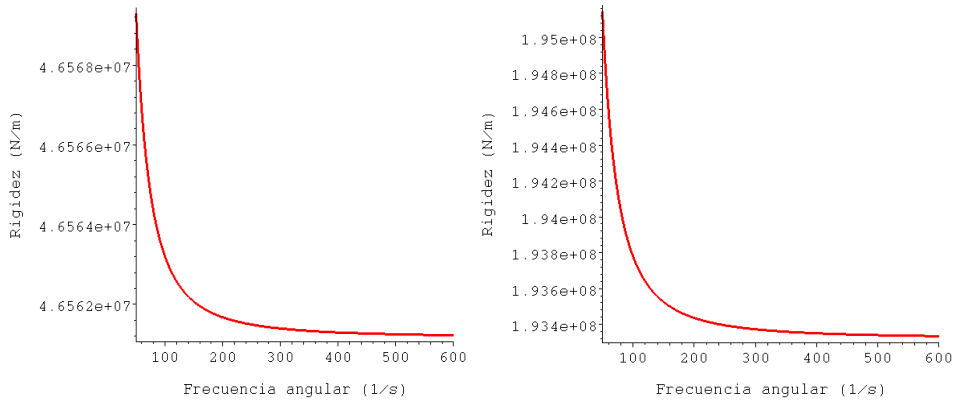


Figura 6: Variación teórica de la rigidez vertical de los cojinetes 1 y 3 con la velocidad angular de la turbina

ISBN: 978-987-1676-63-7

Una vez obtenidos estos resultados se observó que el número de rpm no alteraba demasiado las constantes de rigidez de los cojinetes y se pasó a analizar como variaban estas últimas con variaciones de excentricidad (Figura 7) y del juego radial de los cojinetes (Figura 8)

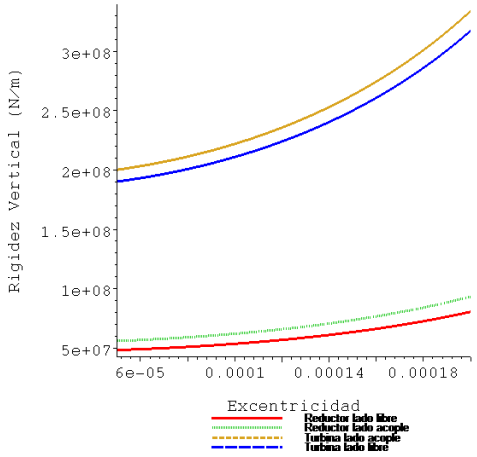


Figura 7: Variación teórica de la rigidez vertical de los cojinetes con la excentricidad del eje

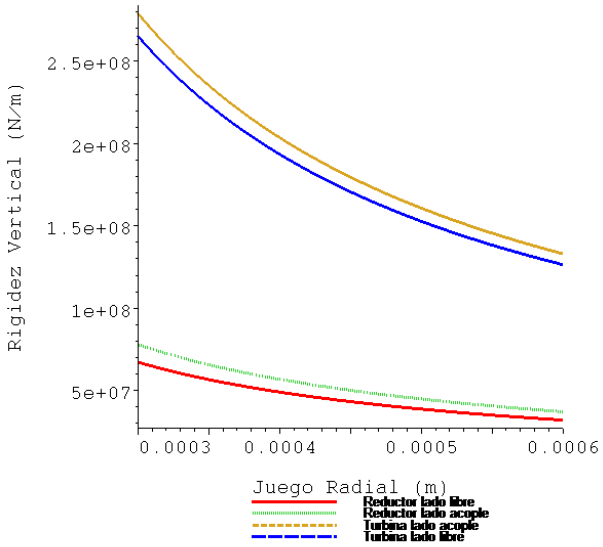


Figura 8: Variación teórica de la rigidez vertical de los cojinetes con el juego radial del eje

A partir de estos resultados se observa que un incremento del juego radial de un 100% disminuye las constantes de los cojinetes en un 40% y además que las variaciones de la excentricidad del rotor durante el funcionamiento afectan más a las constantes de los cojinetes de la turbina que las del eje del piñon.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4.2. Frecuencias naturales del rotor

Una vez determinadas las expresiones numéricas de variación de las constantes de rigidez de los cojinetes, se incluyen estas contantes en el algoritmo de determinación de frecuencias modales y se obtienen las velocidades críticas del rotor real. En un estudio previo [12] estas constantes se habían estimado a partir de la rigidez del propio eje y se habían obtenido las siguientes velocidades críticas.

Tabla 3: velocidades críticas sin considerar rigidez real de los cojinetes

Velocidad crítica	
1	1774rpm
2	2805rpm
3	5524rpm

En la tabla 4 se resumen las velocidades críticas obtenidas por el método de la matriz de transferencia incluyendo las constantes de los cojinetes para distintos valores de juego radial y en la tabla 5 para distintos valores de excentricidad

Tabla 4: velocidades críticas para valores crecientes de juego radial

Velocidad crítica	Juego Radial (μm)			
	300	400	500	600
1	1638rpm	1637rpm	1640rpm	1642rpm
2	4795rpm	4800rpm	4808rpm	4816rpm
3	6034rpm	6056rpm	6010rpm	5986rpm

Tabla 5: velocidades críticas para valores crecientes de juego radial

Velocidad crítica	Excentricidad (μm)			
	20	60	120	180
1	1640rpm	1639rpm	1639rpm	1638rpm
2	4793rpm	4785rpm	4801rpm	4759rpm
3	6025rpm	6057rpm	6010rpm	6293rpm

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por último en la figura 9 se muestran las lecturas de vibraciones de los cojinetes de la turbina durante un arranque completo hasta la velocidad de régimen donde se observa claramente que alrededor de las 1700rpm se encuentra la primera de la velocidades críticas. La segunda es más difícil de identificar y la tercera se encuentra un poco por encima de la de operación

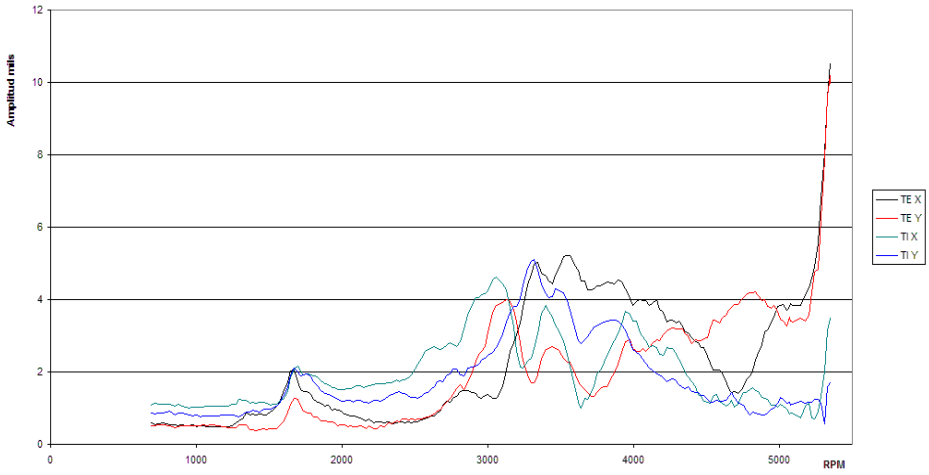


Figura 8: Vibraciones de la turbina durante el arranque

5. CONCLUSIONES

Al incluir las constantes del cojinete la segunda velocidad crítica es la que más se modificó respecto del modelo previo.

Las velocidades críticas determinadas por el método de la matriz de transferencia con la inclusión de constantes de rigidez obtenidas a partir de los modelos teóricos sufren variaciones leves si se modifica el juego del cojinete. La primera velocidad crítica sufre las menores variaciones.

En líneas generales al incrementarse el juego radial la segunda crítica se reduce, y lo mismo ocurre, si aumenta la excentricidad de equilibrio del rotor.

SI se comparan las velocidades críticas calculadas considerando este modelo de rigidez de cojinetes con el estudio previo sin incluir la rigidez de los cojinetes y con los resultados del rotor real, se observa que la segunda crítica del rotor real tiene un valor intermedio a ambos modelos.

Las variaciones de juego radial entre equipos no explican en una primera aproximación diferencias significativas en las respuestas dinámicas.

6. REFERENCIAS

[1] Vance J. M. *Rotordynamics of Turbomachinery*, Jhon Willey & Sons, New York, 1988.

[2] Muszynska A. *Rotordynamics,* Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005.

[3] Sheng-Chung Hsieh, Juhn-Horng Chen, An-Chen Lee. *A modified transfer matrix method for the coupling lateral and torsional vibrations of symmetric rotor-bearing systems*. Journal of Sound and Vibration. 289, pp 294-333, 2006.

[4] Meirovitch L. *Analytical Methods in Vibrations*. Londres. 1ª edición. The Macmillan Company. E.E.U.U. 1967.

[5] Murphy B.T. ; Vance J. M. *An improved method for calculating critical speeds and rotordynamic stability of turbomachinery*. Transactions of the ASME- Journal of Engineering for Power, vol. 105, pp 591-595, 1983.

[6] Murphy B.T.; Vance J. M.; Tripp H. A. *Critical Speeds of turbomachinery: computer predictions & experimental Measurements*. Proceedings of the thirteenth turbomachinery symposium, pp 105-130, 1983.

[7] Lund J.W. *Stability and damped critical speeds of flexible rotor in fluid films bearings*. Journal of engineering for industry, pp 1-9, 1973.

[8] Ghasemalizadeh O. Mirzaee M. R. Sadeghi H. and Ahmadian M.T. *Rotor bearing system analysis using the transfer matrix method with thickness assumption of disk and bearing*. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering Vol. 2, N° 4, pp 206-213, 2008.

[9] Lee A.C. Kang Y. and Liu S.L. *Steady-state analysis of a rotor mounted on nonlinear bearings by the transfer matrix method*. International Journal of Mechanical Science, Vol. 35, N°. 6, pp. 479-490, 1993.

[10] García A. A. *Investigación analítica y numérica de las propiedades dinámicas de chumaceras hidrodinámicas con y sin desalineamiento. Tesis de doctorado presentada y aprobada en el Instituto Politécnico Nacional, México, 2006.*

[11] Sánchez J. C. Muñoz J. y Melgar A. *Influencia de la viscosidad del lubricante en los coeficientes dinámicos de los cojinetes de fricción principales empleados en motores de combustión interna*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Vol. 13, pp. 35-44, 2006.

[12] Darío Violante, Fernando Palmieri, Andreas Klempnow, *Aplicación del método de la matriz de transferencia para la determinación de las formas modales y velocidades críticas en rotores flexibles*. Trabajo presentado en el III CAIM, Ciudad de Buenos Aires, Argentina, del 2 al 5 de octubre de 2012.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DISEÑO DE UN ROTOR EXPERIMENTAL PARA REALIZAR EXPERIENCIAS DE DESBALANCE Y DESALINEACIÓN

Fernando Palmieri*[1], Darío Violante [1] y Andreas Klempnow[2]

*[1] Facultad Regional San Nicolás. Universidad Tecnológica Nacional
Colon 332 San Nicolás Buenos Aires Argentina
correo-e: fpalmieri@frsn.utn.edu.ar
[2] Facultad Regional Delta. Universidad Tecnológica Nacional
San Martín 1171 Campana Buenos Aires Argentina.

RESUMEN

La enseñanza de la ingeniería en la argentina se encuentra ante nuevos desafíos producto del avance de la disciplina misma, de la transformación de los estudiantes y de las exigencias que imponen los procesos de acreditación de carreras.

Uno de los principales desafíos es desarrollar investigación de calidad que impulse la creación de nuevos conocimientos y el avance de la tecnología a nivel nacional. Otro desafío importante es incrementar el número de experiencias prácticas de laboratorio que los estudiantes realizan en el transcurso de su carrera para mejorar el proceso de enseñanza y la comprensión de los temas. Para lograr estos propósitos se debe contar con equipamiento de laboratorio apropiado.

En la Facultad Regional San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional hace algunos años viene desarrollándose un grupo de investigación en el área de Vibraciones Mecánicas que específicamente se ha dedicado a estudiar fenómenos de dinámica de rotores.

En este trabajo se describe el diseño realizado de un rotor de pruebas pensado para dotar a este grupo de una herramienta para poder realizar experiencias de laboratorio vinculadas a su área de estudio y también para poder realizar experiencias con los estudiantes de las asignaturas mecánica Racional y Mantenimiento.

Para tal fin se ha realizado una extensa búsqueda bibliográfica acerca de los equipos existentes desarrollados con fines experimentales, se analizaron su utilidad, complejidad y funcionalidad. Se consideraron las necesidades de investigación relacionadas con estudiar en el corto plazo problemas de alineación y balanceo de rotores, y más a largo plazo, problemas en cojinetes.

Finalmente se logró diseñar un rotor de pruebas que permite realizar experiencias relacionadas con problemas de balanceo, alineación, rigidez de pedestales y lubricación, en un mismo equipo, permitiendo analizar una amplia variedad de problemas de dinámica de rotores en forma experimental con fines científicos y didácticos.

Palabras Claves: *Rotor de pruebas, Dinámica de rotores, alineación, balanceo.*

1. INTRODUCCIÓN

El departamento de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás viene trabajando desde hace bastante tiempo en mejorar los procesos de enseñanza incorporando actividades prácticas de laboratorio. Este compromiso viene asumido en el mismo diseño curricular [1] de la carrera Ingeniería Mecánica que propone formar ingenieros que puedan desempeñarse en la industria y puedan llevar a cabo actividades de desarrollo científico y tecnológico. Esto requiere una muy buena formación práctica, entonces el manejo de instrumentos y la capacidad de observación en condiciones experimentales son habilidades que los estudiantes deben desarrollar.

Además, el concepto de universidad como productora de conocimientos vuelve central las taras de los docentes investigadores, quienes requieren de instalaciones y equipamiento para sus labores. Dentro de la Facultad Regional San Nicolás existe un grupo de docentes investigadores de ingeniería mecánica, que viene trabajando desde hace algún tiempo en el tema de vibraciones, más específicamente, en las vibraciones de rotores o dinámica de rotores, intentando desarrollar sistemas de balanceo y volcando sus conocimientos a las asignaturas.

La dinámica de rotores no es un campo nuevo, pero dada la importancia que tienen las máquinas rotantes para la industria, la complejidad creciente de estos equipos y las exigencias cada vez mayores que experimentan, en conjunto, hacen que sea un campo de mucho desarrollo en la actualidad.

Por definición, la dinámica de rotores es una rama de la mecánica aplicada que pretende conocer el comportamiento de dichos sistemas para poder diagnosticar fallas en funcionamiento y proponer soluciones. Los objetivos [2] de la dinámica de rotores son:

- Predecir las velocidades críticas.
- Determinar modificaciones en el diseño para cambiar las velocidades críticas
- Predecir las frecuencias naturales de las vibraciones torsionales.
- Calcular las masas de corrección y su localización para el balanceo del rotor a partir de mediciones de las vibraciones.
- Predecir las amplitudes de las vibraciones sincrónicas causadas por el desbalance del rotor.
- Predecir las condiciones que producen inestabilidad dinámica y las los rangos de velocidades de trabajo seguro.
- Determinar las modificaciones de diseño para evitar los problemas de inestabilidad.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para poder analizar el comportamiento de las máquinas rotantes se utilizan generalmente sistemas rotor-cojinetes de laboratorio. En el mercado se pueden encontrar distintas plataformas didácticas que sirven para analizar vibraciones y además hacer pruebas de balanceo o de alineación. Sin embargo, la mayoría de los centros de investigación desarrollan sus propios sistemas, a los que incorporan otros dispositivos para modelar fenómenos más complejos y diversos.

El propósito de este trabajo fue diseñar un rotor de pruebas para satisfacer las necesidades experimentales de los investigadores del área de vibraciones de la facultad y también para poder realizar experiencias con los estudiantes de las asignaturas mecánica Racional y Mantenimiento.

2. ANTECEDENTES

Se pueden encontrar múltiples configuraciones de rotores de pruebas en la literatura, cada uno de ellos ha sido desarrollado con el propósito de realizar algún tipo de experiencia determinada. Las configuraciones más simples son las diseñadas para analizar experimentalmente fenómenos de balanceo y aquellos utilizados para estudiar la dinámica del modelo del rotor de Jeffcott. No obstante, con el avance del conocimiento de la dinámica de rotores se han ido construyendo sistemas más complejos que permiten modelar experimentalmente otras fallas.

Dentro de las primeras configuraciones de rotores de prueba utilizadas que se pueden encontrar en la literatura, se pueden mencionar las utilizadas por el laboratorio de Shell Westhollow Research Center descriptas por Vance [2] que sirvieron para determinar las velocidades críticas de ejes simples. El primero de ellos consistía de un rotor de solo un disco de 9 pulgadas de diámetro por 3 pulgadas de espesor, montado por interferencia sobre un eje de 2 pulgadas de diámetro y 48 de longitud, dicho rotor se hacía girar sobre rodillos de forma tal que quedara simplemente apoyado. El segundo equipo descripto, es un rotor de tres discos de 10 pulgadas de diámetro por 5 pulgadas de espesor, separados 10 pulgadas entre centros; todo el conjunto fue mecanizado de una única pieza de 52 pulgadas de largo. Este rotor está montado sobre cojinetes instrumentados con sensores de proximidad y soportes rígidos, además los discos tienen perforaciones radiales roscadas para poder hacer pruebas de balanceo.

Otro rotor de laboratorio utilizado por Bently [3] para pruebas de balanceo estaba formado por un eje de 3/8" de diámetro por 24 pulgadas de largo, montado sobre tres cojinetes instrumentados con sensores de proximidad y dotado con 3 discos fijados con tornillos radiales al eje. Con dicho rotor se hicieron las primeras observaciones del fenómeno de vibraciones auto-excitadas en cojinetes.

En un trabajo más reciente [4] se describe un equipo para pruebas de balanceo de la universidad de Aston en Birmingham que tiene algunas características que lo asemejan más a un rotor real de una turbina. Por empezar, tiene dos ejes de 38mm de diámetro, uno de 1,56m y el otro de 1,17m

ISBN: 978-987-1676-63-7

vinculados con un acoplamiento de bridas, cada eje está montado sobre dos cojinetes de relación longitud/diámetro 0,3, juego radial de 150µm y alimentado con aceite de viscosidad 0.0009Ns/m^2. Estos cojinetes se vinculan mediante soportes metálicos relativamente flexibles con una base de gran tamaño también metálica. Por último, los dos ejes tienen discos de balanceo, el primero 3 y el segundo 2, todos de diámetro 203mm por 25mm de espesor. Este rotor por su configuración ha sido empelado para analizar problemas de alineación [5].

Para estudiar fenómenos de desalineación Patel [6] también utilizó un rotor con dos ejes, uno con discos y el otro sin discos pero vinculado a una celda de carga. El primero de los ejes está montado sobre una base que permite desalinearlo respecto del segundo mediante la acción de tornillos de regulación. De igual forma, en el estudio de Lees y col. [7] se empelaron soportes con correderas y tornillos de regulación como se observa en la figura 1.

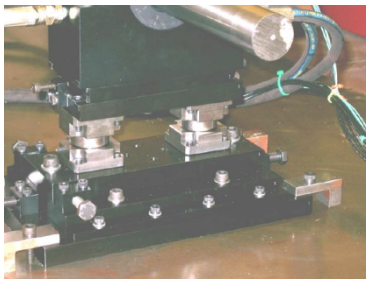


Figura 1: Soporte con tornillos de regulación [7]

Para el estudio de balanceo con métodos multi-planos se suelen usar rotores simples, de pequeño tamaño, que tienen varios discos y están montados sobre cojinetes de bolas de soportes rígidos, con la única particularidad que constan con unidades motrices que le permiten alcanzar velocidades muy altas, como en el trabajo de Lin y col [8] donde se emplea un rotor equipado con un motor que permite lograr velocidades de hasta 200Hz.

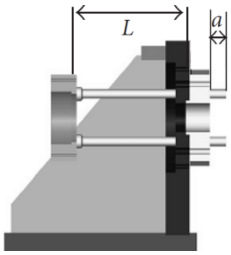


Figura 2: Pedestales diseñados por Sinou y col. [9]

ISBN: 978-987-1676-63-7

En algunos trabajos experimentales se han desarrollado sistemas de prueba que permiten variar la rigidez de los soportes para poder analizar cómo ésta afecta la dinámica del rotor. Así Sinou y colaboradores [9] diseñaron pedestales donde el cuerpo del cojinete se vincula con la estructura del pedestal mediante pernos calibrados, como se muestra en la Figura 2, que permiten alejar la base rígida del pedestal del cuerpo del cojinete propiamente dicho, una distancia L, de forma tal de disminuir la rigidez del conjunto en una cantidad fácilmente determinable.

De manera similar, Vázquez [10] desarrolló un sistema de pruebas montado sobre soportes flexibles anisotrópicos. Este rotor consiste en un eje flexible de diámetro 19mm x 654mm de longitud con tres discos de 152mm de diámetro y 25,4mm de espesor fijados con manguitos con tornillos. El eje está montado sobre cojinetes con un juego radial de 0,18mm; todo el conjunto esta accionado por un motor mediante un acople y montado sobre un bloque de concreto de 900kg. El elemento particular de este rotor es el pedestal que se muestra en la Figura 3 y está conformado por dos placas gruesas horizontales, una solidaria al cuerpo del cojinete y la otra a la base, y estas placas están vinculadas por placas flexibles delgadas verticales. Cambiando éstas últimas, se altera la rigidez lateral del soporte.

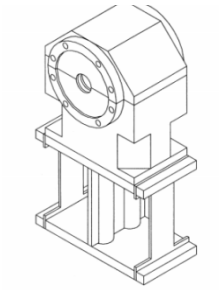


Figura 3: Pedestal flexible desarrollado por Vázquez [10]

Para analizar la inestabilidad dinámica producida por problemas en cojinetes de lubricación, se emplean arreglos experimentales que incorporan cojinetes en baño de aceite. Algunos de ellos tienen dispositivos especiales para intentar provocar la inestabilidad estudiada. Tal es el caso del rotor utilizado por Vance [11] para estudiar las constantes de rigidez de los cojinetes, que consta de cojinetes de aceite de diámetro 63,6mm x 25,4mm de longitud, con una luz radial de 50µm, lubricado con aceite de viscosidad 22cP y un aditamento especial para incrementar la carga sobre el eje mediante un cilindro neumático. Otros rotores de prueba usados para analizar este tipo de problemas, incorporan un único cojinete alimentado con aceite a presión, y para modelar problemas hidrodinámicos, utilizan un control muy preciso de la lubricación o mecanismos para modificar el juego radial, tal es el caso de los empleados por Meagher [12] o por Fan y colaboradores [13].

ISBN: 978-987-1676-63-7

En las recientes investigaciones acerca del tema de fisuras de rotores también se han empleado configuraciones de prueba muy sencillas, como la usada por Gómez Mansilla [14] que cuenta con dos cojinetes rígidos lubricados en aceite con un juego radial de 49µm, un eje muy pequeño de diámetro 1cm, dos discos y una fisura provocada de 0,25mm. Saavedra [15], en cambio uso un rotor de Jeffcott montado sobre rodamientos y también modelaba la fisura mediante un corte radial.

Muszynska [16] describe un par de dispositivos más complejos, destinados a analizar experimentalmente la interacción rotor fluido, uno de ellos consiste en un disco perforado sobre el que incide un flujo controlado de aire y esto permite analizar las perturbaciones sobre los alabes de un rotor. Otro sistema descripto se compone de un cojinete con aceite que gira excéntrico para analizar inestabilidad en la película de aceite.

Finalmente con Macias [17] y Escudero Puente [18] describen sendos diseños de rotores de pruebas realizados con fines principalmente didácticos. EL primero de estos autores resume pautas muy concretas de diseño para asegurar que el rotor pueda operar en condiciones seguras en los ensayos y explica cómo realizar, con ese sistema, experiencias de desbalance, medición de arranques y trazado de orbitas. El segundo muestra un sistema simple que permite realizar con los alumnos pruebas de balanceo y solturas de distinto tipo con un diseño realmente muy económico.

3. NECESIDADES Y RESTRICCIONES DEL DISEÑO

El Grupo de investigación de vibraciones mecánicas de la Facultad Tecnológica Nacional se ha dedicado desde sus orígenes al estudio de problemas de balanceo, es por ello que, originalmente, se construyó un rotor de pruebas, dotado de un solo eje apoyado en dos rodamientos con pedestales relativamente rígidos que se vinculan a una base de hormigón como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Banco de pruebas original de la FRSN

Posteriormente se comenzó a trabajar en métodos de modelado de rotores reales de centrales de generación. Entonces surgió la necesidad de contar con un rotor con cojinetes de deslizamiento con aceite a presión, dado que las máquinas de generación tienen este tipo de cojinetes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como los proyectos de investigación se vincularon a problemas de balanceo y alineación, el rotor debería tener la posibilidad de hacer pruebas de alineación es por ello que se eligió una configuración con un rotor de dos ejes conectados por un acople y cuatro soportes, estos soportes debían tener la posibilidad de regular la alineación.

Dado que la base de hormigón disponible (**Figura 5**) era lo suficientemente grande se decidió trabajar sobre un diseño que use dicha fundación, para ello se debió respetar la distancia entre anclajes. También existían algunos elementos disponibles, como las cajeras de los rodamientos oscilantes, acoples y motor eléctrico, por lo que se adaptaron las dimensiones y se verificó el diseño con estos elementos.

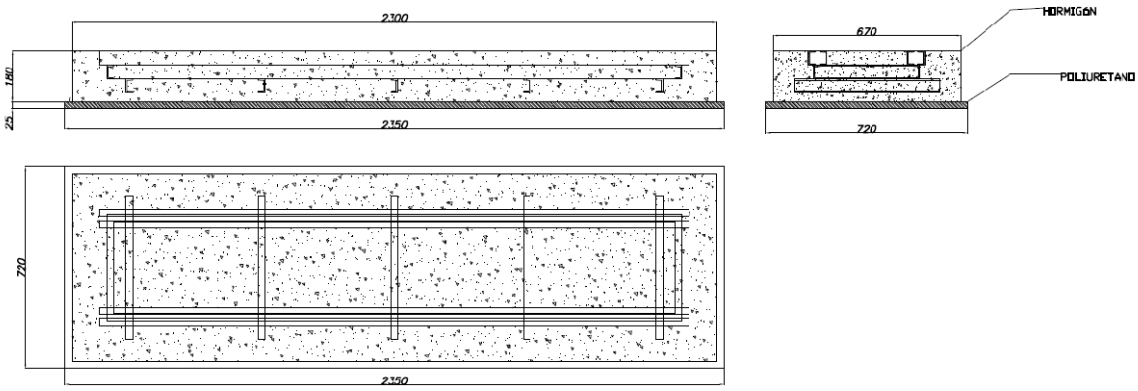


Figura 5: Base disponible.

4. DISCUSIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Durante el diseño del rotor de pruebas se manejaron diversas alternativas para el diseño de sus partes constitutivas. En líneas generales sus dimensiones se eligieron teniendo el cuidado de intentar mantener semejanza con un eje real de una turbina de generación, es por ello que la relación entre la longitud y el diámetro del eje (rigidez del eje) y las masas de los discos se eligieron de manera tal de que sus dos primeras frecuencias naturales se encuentren dentro del rango de 0 a 60Hz.

Esto ocasiona que el eje sea muy largo, para de esa forma bajar la rigidez; como la longitud de todo el conjunto estaba limitada por la base existente, se decidió usar un eje en el que se puedan montar muchos discos y estos discos se hicieron más pesados para lograr que las velocidades críticas se encuentren en el rango deseado. Luego se verificó la respuesta máxima en resonancia y se seleccionó un material que pueda superarla sin daño permanente siguiendo la metodología con la que verificó su diseño Macias [17].

Para el rotor, se manejaron dos alternativas constructivas: confeccionarlo en una sola pieza (eje más discos) o en varias piezas, eje por un lado y discos móviles. Estas son las variantes observadas en la literatura, la primera permite un mejor equilibrado inicial pero es más costosa; Igualmente, se eligió la segunda configuración de un eje liso con discos montados sobre manguitos de fijación, porque permiten correr los discos sobre el eje, e incluso incorporar más discos para poder asemejar mejor el rotor de pruebas a una determinada configuración de eje real.

Para los cojinetes de deslizamiento, se plantearon varias alternativas para lograr un apoyo simple, Esto implica que se debe liberar el giro en todos los sentidos, o sea convertir el cojinete en una rotula. Originalmente se intentó un diseño de soporte con dos ejes trasversales a 90º de forma que el cojinete quedaba como en el centro de un giróscopo, y de esa forma podía acompañar los movimientos angulares del eje. No obstante, como esta idea requería mecanizar muchas piezas se terminó usando la pista externa de un rodamiento oscilante del tipo esférico con su soporte estándar como base para montar en su interior el buje lubricado. Para el sellado del aceite se eligió un sello laberintico porque un sello de goma u otro tipo de sello de contacto hubiere producido roces; restricciones del movimiento del eje, e incluso generarían componentes de ruido en las vibraciones.

Para poder variar la rigidez de los pedestales se observaron las alternativas planteadas por Sinou [9] y por Vázquez [10], y se eligió un diseño parecido al de este último con chapas calibradas que se puedan acoplar o quitar para variar la rigidez actuando como las hojas de un resorte tipo ballesta.

Finalmente para la provisión de aceite a presión se manejaron dos alternativas, ambas comerciales, de centrales de lubricación integradas con bomba de engranajes y válvula de regulación de presión, ambas alternativas se corresponden con centrales para lubricación de bancadas y tornillos de movimiento de máquinas herramientas. El único problema de estas centrales es que por el tipo de bomba que tienen, son de caudal constante y en las máquinas se valen de picos volumétricos para dosificar el aceite, en el caso del rotor se requiere un control más preciso para el caudal y por ello se debe agregar un variador de frecuencia.

5. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO FINAL

El rotor de prueba diseñado consta de tres ejes, uno largo de 900mm (ítem 7 de la Figura 6) y dos cortos de 500mm (8 de la Figura 6) y 4 pedestales con sus respectivos cojinetes. Se pueden armar varias configuraciones como se observa en la **Figura 6**, pudiéndose usar los ejes de a uno o combinados, dos cortos o un eje largo y uno corto.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En total se construyeron 5 discos (1) de diámetro 270mm x 40mm de espesor perforados cada 10º, estos discos se instalan sobre el eje con manguitos de fijación cónicos (2).Cada soporte consta de dos partes: el cojinete (4) y el pedestal (5). Además, para recolectar el aceite y retornarlo al circuito se diseñaron dos alternativas de base, ambas con una batea para posicionar sobre el hormigón del laboratorio.

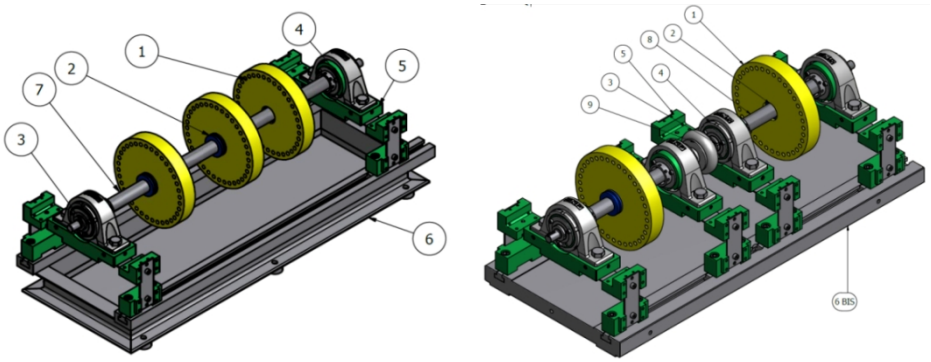


Figura 6: Configuraciones del rotor, eje largo a la izquierda, dos ejes cortos y acople a la derecha

Los cojinetes (Figura 7 izquierda) se confeccionaron en bronce y se montaron por interferencia en un cuerpo de acero que está preparado para alojarse dentro de la pista externa de un rodamiento oscilante (ítem 10 Figura 7 derecha) Para ello, se desarmó el rodamiento y se dejó sólo el soporte con la pista externa, luego dentro se ajustó el cuerpo del cojinete al diámetro interno de la pista, como el tipo de rodamiento elegido tiene la pista externa esférica por fuera, el cojinete funciona como un apoyo simple.

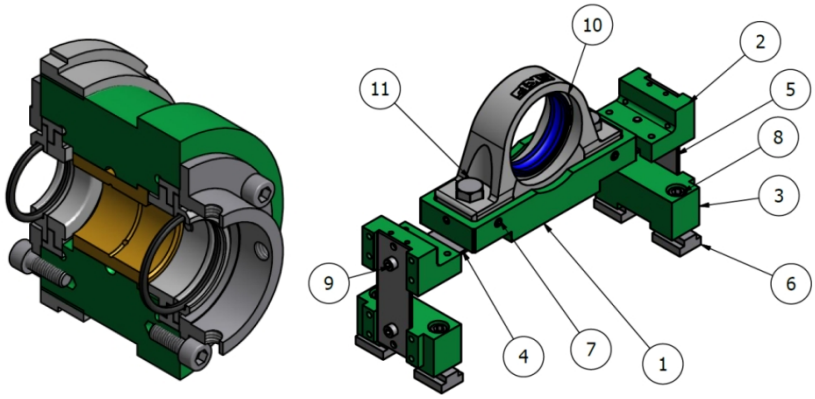


Figura 7: Izquierda: Cuerpo del cojinete; Derecha: Pedestal

El buje cuenta con ductos y canales de lubricación. Tiene sellos de laberinto a ambos lados y las tapas están preparadas para montar sensores de proximidad analógicos de 8mm de diámetro.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Figura 7 a la derecha se muestra la estructura del pedestal con el soporte de rodamiento desarmado (10) y con las chapas elásticas horizontales (4) y verticales (5) construidas en acero SAE 1070 templado y revenido. Estas hojas o flejes se diseñaron para ser desmontables y de esa forma poder agregar quitar flejes para alterar la rigidez vertical y horizontal del pedestal.

Finalmente, la cuna del soporte de rodamiento (1) tiene tornillos de regulación (7) que permiten alinear o desalinear los soportes desplazando el cojinete respecto del pedestal. Esto es muy útil para realizar ensayos de problemas de alineación.

6. CONCLUSIONES

El rotor diseñado permite realizar ensayos de balanceo y alineación con fines didácticos o de investigación.

Con el diseño logrado se puede analizar la influencia de la variación de la rigidez de los cojinetes y dado que la central de lubricación tiene regulación de presión y caudal también se pueden hacer ensayos con problemas de lubricación. Estos ensayos son más útiles a los fines de investigación

La construcción está finalizada, resta terminar las bases de los soportes de rodamientos y adquirir la central de lubricación para empezar a hacer pruebas de laboratorio.

7. REFERENCIAS

[1] Universidad Tecnológica Nacional *"Diseño curricular de la carrera Ingeniería Mecánica"* Ordenanza 1027, agosto 2004.

[2] Vance J. M. *Rotordynamics of Turbomachinery*, Jhon Willey & Sons, New York, 1988.

[3] Muszynska A. *Rotordynamics,* Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, 2005.

[4] Sinha J. K. Friswell M. I. Lees A. W. and Sinha R. K. *Robust Method for the Rotor Unbalance Estimation*. Proceedings of VETOMAC-2, 16-18 December, 2002.

[5] Sinha J. K. Lees A. W. and Friswell M. I. *Estimating unbalance and misalignment of a flexible rotating machine from a single run-down*. Journal of Sound and Vibration 272, pp 967–989, 2004.

[6] Patel T. H. & Darpe A. K. *Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, pp. 2236–2252, 2009.

[7] Lees A. W. Price E. D. and Friswell M.I. *Identification of Rotor Dynamic Machinery – A Laboratory Trial.* Proceedings of 23th IMAC conference, paper 171, February 2005.

[8] Lin T. W. Kang Y. Wang C. C. Chang C. W. and Chiang C. P. *An investigation in optimal locations by genetic algorithm for balancing flexible rotor-bearing systems*. Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air. Reno-Tahoe, Nevada, June 6-9, 2005.

[9] Sinou J. J. Villa C.and Thouverez F. *Experimental and Numerical Investigations of a Flexible Rotor on Flexible Bearing Supports.* International Journal of Rotating Machinery, N° 3, pp 179–189, 2005.

[10] Vázquez J.A. Barrett L.E. and Flack R.D. *Including the Effects of Flexible Bearing Supports in Rotating Machinery* International Journal of Rotating Machinery, Vol. 7, No. 4, pp. 223-236, 2001.

[11] Vance J. M. Murphy B.T. and Tripp H. A. *Critical Speeds of Turbomachinery: Computer predictions vs. Experimental Measurements. Part II*, ASME Design Engineering Division Conference and Exhibit on Mechanical Vibrations and Noise, Cincinnati, Ohio, September 10-13, 1985.

[12] Meagher J. Wu X. and Lencioni C. *Response of a Warped Flexible Rotor with a Fluid Bearing.* International Journal of Rotating Machinery, Article ID 147653, 2008.

[13] Fan C.C. Syu J.W. Pan M.C. And Tsao W.C. *Study of start-up vibration response for oil whirl, oil whip and dry whip.* Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, N° 3, pp. 102–115, 2008.

[14] Gómez Mansilla J.C. *Interacción fisura desbalance en las resonancias locales y evolución orbital para detectar fisuras en rotores: parte 2.* Actas del IX Congreso y exposición latinoamericana de turbomaquinaria. Veracruz, México, Junio de 2006.

[15] Saavedra P.N. and Cutiño L.A. *Vibration analysis of rotor for crack identification.* Journal of Vibration and control, N° 8, pp. 51-67, 2002.

[16] Muszynska A. *Modal Testing of Rotors with Fluid Interaction.* International Journal of Rotating Machinery, Vol. l, No. 2, pp. 83-116, 1995.

[17] Macias A.R. *Diseño, construcción e instrumentación de un sistema rotor - chumaceras basado en el modelo Jeffcott para el análisis de vibraciones.* Tesis de grado presentada en la universidad Tecnológica de la Mixtaca, Oaxaca, México, 2013.

[18] Escudero Puente P. *Realización de una maqueta para el análisis de vibraciones.* Tesis de grado presentada en la facultad náutica de Barcelona, Barcelona, España 2011.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MEDICIÓN DE TRANSITORIOS DE VIBRACIONES TORSIONALES

José E. Stuardi, Guillermo D. Chiappero, Raúl J. Ritta, Ariel Matusevich

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba
Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 – Córdoba, Argentina
correo-e: jstuardi@gmail.com

RESUMEN

La medición de vibraciones torsionales presenta características peculiares que la diferencian de las mediciones de vibraciones traslacionales. Habitualmente no están incluidas en las rutas de mantenimiento y se asocian al análisis y diagnóstico de problemáticas puntuales, de resolución más compleja y elaborada. Especial importancia revisten por ejemplo los transitorios acoplados de turbomaquinarias y la línea eléctrica, en donde una de las variables de estudio es normalmente el torque.

El presente trabajo aborda las distintas metodologías conocidas para la medición de la velocidad angular instantánea (IAS), este último elegido como parámetro de análisis. Se estudia la aplicabilidad de los sistemas comerciales para la medición de IAS, ya que algunos requieren de adaptaciones o acceso al eje, o la utilización de componentes parciales para armar un sistema de medición a medida. A menudo se generan problemas de confiabilidad, seguridad o elevados costos. Basado en un sistema que utiliza hardware comercial no específico, se analizan distintas posibilidades de procesamiento por software de señales moduladas obtenibles mediante un codificador de bajo costo y transductores fijos. Las características de la señal generada dependerán del tipo de transductor, siendo en general modulaciones en frecuencia y amplitud.

Dependiendo del problema en particular a resolver, se realiza un ajuste de las metodologías y de los parámetros de medición y procesamiento, de manera de asegurar la calidad y un error admisible en los resultados. El trabajo queda plasmado mediante un código computacional, donde se implementan los métodos propuestos y se resuelven algunos casos simulados de señales provenientes de problemas de interés. Los resultados obtenidos demuestran la buena aplicabilidad, robustez y confiabilidad de los procedimientos, que constituyen una guía experta para el usuario.

Palabras Claves: vibraciones torsionales, velocidad angular instantánea, transitorios, modulación en frecuencia.

Área Temática: Explotación y Mantenimiento de Máquinas.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de transitorios de vibraciones torsionales constituye una actividad sobre la que se ha centrado especialmente la atención en la última década. En efecto, numerosos sistemas mecánicos de importancia, que rotan con velocidades muchas veces variables, deben ser objeto de verificaciones de condiciones de funcionamiento, análisis, correcciones de anomalías y mantenimiento predictivo. La velocidad angular instantánea del eje (IAS en inglés) resulta ser una variable que está íntimamente relacionada con la dinámica de la máquina por contener información primaria del funcionamiento y de los procesos internos involucrados. El análisis de la IAS resulta prometedor respecto de la posibilidad de mejores diagnósticos, por representar información cercana a la fuente generadora. Por esta causa está en general menos contaminada con ruido que las vibraciones traslacionales sobre los cojinetes de las máquinas y que las mediciones acústicas. Algunos ejemplos típicos son las variaciones de frecuencia angular en cajas de engranajes, análisis de defectos en motores eléctricos y máquinas alternativas, como compresores a pistón y motores de combustión interna, y en general defectos de cojinetes, alineación, etc. en el monitoreo de máquinas [1-7], donde se verifican extremadamente pequeñas variaciones de velocidad angular como consecuencia del funcionamiento tanto normal como anormal.

1.1. Revisión de las distintas metodologías de medición

En este trabajo no se consideran algunos métodos antiguos tales como los basados en el pegado de galgas extensiométricas sobre el eje y torsiógrafos. Muchos de los sistemas comerciales para la medición de vibraciones torsionales requieren de adaptaciones en el eje o acceso al mismo en determinada forma, lo que reduce la aplicabilidad de los métodos y sugiere al ingeniero la necesidad del empleo de adaptaciones y la utilización de componentes parciales para ensamblar así un sistema de medición a medida de las necesidades y posibilidades.

Desde el punto de vista económico*, los métodos basados en el análisis de una señal portadora modulada por las variaciones de velocidad angular*, resultan los más aplicables. En este caso el sensor permanece fijo, utilizándose transductores de diferente tipo. La señal se construye a partir de la lectura del paso de alguna irregularidad descripta periódicamente sobre un volante, tal como en caso de dientes de engranajes o marcas regulares en la periferia de una rueda, utilizando sensores magnéticos o cintas reflectivas para sensores ópticos, etc. Esto implica en general una mínima intervención en la máquina, si es que la presencia de este tipo de ruedas no haya sido ya prevista en el diseño, como es el caso de máquinas de envergadura. Por otro lado, el equipamiento necesario para la implementación de este método es estándar. Se basa en la generación de una onda portadora cuadrada modulada en frecuencia, que generalmente se obtiene mediante un sensor óptico leyendo una cinta con marcas igualmente espaciadas sobre el eje, o un sensor magnético enfrentado a los dientes de un engranaje.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. OBJETIVOS

El presente trabajo aborda las distintas posibilidades de procesamiento de señales moduladas obtenidas mediante transductores fijos enfrentados a volantes con marcas regulares que giran con el eje o codificadores. Se analizan dos posibilidades de procesamiento de la señal para la extracción de las variaciones de velocidad instantánea en casos de transitorios de vibración torsional y velocidad de giro del eje variable, a saber: a) el Método del Ancho de Pulso y b) el Método de la Señal Analítica. Se estudia la importancia del correcto establecimiento de los parámetros de medición y procesamiento, que sean adecuados para conseguir exactitud en la medición. El objetivo del trabajo es mejorar el entendimiento de las prestaciones de los métodos, desarrollando un software específico e implementando técnicas apropiadas para el mejoramiento de la calidad de la señal resultante. Adicionalmente se estudia la influencia del ruido de medición en las prestaciones de los métodos. La importancia e influencia del ruido, se debe a la relativamente pequeña variación de frecuencia de la onda portadora que se mide en los casos prácticos de interés, en general del orden de pocos rad/s, alcanzando en un compresor alternativo a 4 rad/s, por ejemplo.

3. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL EN BRUTO

3.1. Generalidades de la señal obtenida desde el transductor

Dependiendo del tipo de transductor la señal puede tener distintas características, pero básicamente está conformada por pulsos con una frecuencia igual al producto de la velocidad de giro del eje ω_0 por el número de pulsos de la rueda del codificador N y que hace las veces de frecuencia portadora $\omega_c = N\,\omega_0$. La señal portadora (c de carrier) supuesta en primer instancia armónica, tiene la forma $s_c(t) = A_c \cos(\omega_c t)$ y su frecuencia es modulada por las variaciones de velocidad de giro del eje, representadas por medio de una función $\delta\omega(t) = N\,\delta\omega_0(t)$. Resulta entonces que la frecuencia instantánea $\omega(t)$ de la señal medida es la frecuencia portadora más una variación temporal $\delta\omega(t)$

$$\omega(t) = \omega_c + \delta\omega(t) \tag{1}$$

La fase de la señal modulada puede ser obtenida integrando la frecuencia instantánea $\omega(t)$ mediante una variable temporal τ. La señal modulada resulta entonces como

$$s(t) = A_c \cos\left(\int_0^t \omega(\tau)\,d\tau\right) \tag{2}$$

Suponiendo que $\delta\omega(t)$ es una es una señal armónica con frecuencia ω_m

$$\delta\omega(t) = \Delta\omega \cos(\omega_m t) \tag{3}$$

donde $\Delta\omega$ representa la máxima desviación de frecuencia a partir de la portadora, $\Delta\omega = N\,\Delta\omega_0$. La Ecuación (2) se escribe

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$s(t) = A_c \cos\left(\omega_c t + \int_0^t \delta\omega(t) d\tau\right) = A_c \cos\ \omega_c t + \theta(t) \tag{4}$$

donde las variaciones de fase debido a la modulación $\delta\theta(t)$ es

$$\delta\theta(t) = \int_0^t \Delta\omega \cos(\omega_m \tau)\, d\tau = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \sin(\omega_m t) \tag{5}$$

donde por definición el índice de modulación es

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \tag{6}$$

Teniendo ahora en cuenta la aplicación mecánica de rotores, calculamos la variación de frecuencia obtenible en un eje que oscila con amplitud máxima $\Delta\theta_{max}$ expresado en $[^o]$. En este caso la amplitud de giro torsional en el eje expresado en radianes $\Delta\theta_0$ resulta $\Delta\theta_0 = \Delta\theta_{max}\ \pi/180$ rad, y la desviación máxima de la velocidad angular del eje $\Delta\omega_0$ queda

$$\Delta\omega_0 = 2\pi f_m\ \Delta\theta_0 = 2\pi f_m\ \Delta\theta_{max} \frac{\pi}{180}\ \text{rad/s} \tag{7}$$

La misma variable expresada en Hz resultará

$$\Delta f_0 = f_m\ \Delta\theta_{max}\ \frac{\pi}{180}\ \text{Hz} \tag{8}$$

A partir de la Ecuación (6) y teniendo en cuenta que $\Delta f = N\, \Delta f_0$, se puede expresar la relación entre el ángulo de giro torsional del eje y el índice de modulación β de la señal registrada,

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} = \frac{\pi}{180} N\, \Delta\theta_{max} \tag{9}$$

3.2. Método de Bandas Laterales

El contenido espectral de una señal armónica de frecuencia ω_c y modulada con una frecuencia ω_m puede ser representada por una serie de infinitos términos de funciones de Bessel de primer orden, Ecuación (7). Ya que cada término se refiere a una armónica de frecuencia $(\omega_c \pm n\, \omega_m)$, los índices n representan el número de banda lateral, mientras que sus amplitudes resultan función del índice de modulación β.

$$s(t) = A_c \left\{ J_0(\beta)\cos(\omega_c t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n\ J_n(\beta)\left[\cos(\omega_c -\ n\, \omega_m)t + (-1)^n \cos(\omega_c + n\, \omega_m)t\right]\right\} \tag{10}$$

Calculando el espectro de la señal registrada, es posible reconocer la frecuencia de modulación ω_m, esto a partir de la identificación de la frecuencia portadora y de las frecuencias de las bandas laterales. De las amplitudes de cada orden de las bandas laterales se puede aproximar en forma inversa el argumento de cada término de la función de Bessel, o sea el índice de modulación β.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por otro lado, de las Ecuación (5) y (6), la fase adicionada por efecto de la señal de modulación $\delta\theta(t)$ resulta

$$\delta\theta(t) = \beta \sin(\omega_m t) = \Delta\theta \sin(\omega_m t) \tag{11}$$

por lo que el índice de modulación resulta igual a la amplitud de la fase de modulación,

$$\beta = \Delta\theta \tag{12}$$

y conociendo $\delta\theta(t)$ de la Ecuación (11) se puede calcular su derivada, esto es $\delta\omega(t)$.

Este procedimiento está sujeto a varias limitaciones, que se resumen a continuación. Ya que el método se basa en el cálculo de espectros, resulta necesario incluir en la ventana temporal de medición un número significativo de períodos de oscilaciones torsionales, para obtener una razonable resolución de las bandas laterales en el dominio de las frecuencias. Adicionalmente la frecuencia de giro del rotor debería ser estable, y en el caso de variaciones, la ventana de muestreo temporal debería ser suficientemente pequeña para evitar el "ensuciamiento" del espectro con "frecuencias desplazadas" y posibilitar la identificación de las bandas. Esta condición claramente se contrapone con la primera, si la frecuencia de giro del rotor cambia. Por otro lado, la señal modulante debe ser monofrecuente, esto es, la vibración torsional debe verificarse en una sola frecuencia puesto que en caso contrario se dificulta la interpretación del orden de las bandas laterales. Precisamente esta interpretación es apta para ser realizada en forma manual y por un operador calificado, resultando una automatización compleja. De lo anteriormente expuesto resulta que el método es aplicable en las mediciones de señales con escaso ruido de vibraciones torsionales estacionarias, como en el caso de máquinas de proceso continuo, en donde las propiedades de las oscilaciones torsionales se mantienen constantes. Contrariamente, en el caso de transitorios en ambientes ruidosos y rápidas variaciones de la frecuencia torsional, deben utilizarse métodos superadores, los que se describen a continuación.

3.3. Medición de Ancho de Pulso

El método de medición de ancho de pulso (MAP) es apropiado para la medición de transitorios. En este caso los registros temporales pueden ser de pequeña duración, conteniendo sólo algunos pulsos de la señal modulada, ya que el cálculo de la frecuencia instantánea de rotación puede ser realizado mediante la inversa del intervalo entre pulsos medido. Por otro lado, los pulsos deben ser registrados con una frecuencia de muestreo suficientemente elevada y comparativamente alta, la que puede resultar en el orden práctico del orden de varios MHz.

3.3.1. Influencia de la Frecuencia de Muestreo

Las mediciones y el procesamiento de las señales se realizan en forma digital, para lo que la señal original analógica sufre un proceso de muestreo. Para el caso de digitalización de pulsos mediante un Conversor Analógico Digital (ADC), el error de medición atribuible al método queda

ISBN: 978-987-1676-63-7

reducido al error cometido en medición de la longitud de un pulso. Se puede demostrar que el error en la frecuencia medida ε_f resulta

$$\varepsilon_f \approx \frac{f_c}{f_s} \qquad \text{para} \quad \frac{f_c}{f_s} \ll 1 \tag{13}$$

donde f_c y f_s son las frecuencias portadora y de muestreo, respectivamente (que corresponden a ω_c y ω_s expresadas en Hz). La Ecuación (13) es válida para errores relativamente pequeños, los que corresponde a los casos de aplicación práctica.

3.3.2.Influencia del número de Dientes del Codificador

El número de dientes del codificador N determina el número de puntos n_p en un período de la señal demodulada (IAS), ya que con este método obtenemos una lectura de frecuencia por período o por semiperíodo; en el primer caso es

$$n_p = \frac{f_c}{f_m} \tag{14}$$

De acuerdo con el teorema del muestreo, n_p debe ser mínimo 2 puntos por período, en términos prácticos y adoptando un mínimo de 10 por ejemplo, se tiene

$$N \geq n_{arm} \frac{10\, f_m}{f_0} \tag{15}$$

Donde n_{arm} representa el número de armónicas máximo a tener en cuenta del proceso que se desea investigar, si este es el caso. De acuerdo con la Ecuación (13) y admitiendo por ejemplo un error del 0.5% la frecuencia de muestreo mínima necesaria resulta

$$f_s > \frac{1}{0{,}005} f_c = 200\, f_0\, N \tag{16}$$

Lo anteriormente expuesto es aplicable para señales digitalizadas utilizando los intervalos de digitalización dt, como es el caso de sistemas basados en hardware. El procesamiento por software facilita una interpolación entre los intervalos, por lo que disminuye el error en la detección del período y la frecuencia. La detección por software permite elegir además entre la medición del semipulso, del pulso completo, o efectuarla de a varios pulsos. A medida que aumenta el intervalo medido (múltiplo del periodo real) se aumenta la exactitud, pero se pierde resolución (cantidad de puntos) en la definición de la desviación de la frecuencia y en el tiempo.

3.4. Métodos basados en la Demodulación de Señales

Mediante un *discriminador* es posible efectuar una demodulación, obteniendo las variaciones de frecuencia de la señal en bruto. La demodulación se realiza convenientemente mediante la obtención de la forma analítica de la señal, esto último por medio de la transformada de Hilbert. De la señal analítica es posible extraer la fase de la señal y derivando la fase se obtiene la

ISBN: 978-987-1676-63-7

velocidad de fase ó frecuencia instantánea, recobrando así la información modulante, esto es las variaciones de giro del eje. En el apartado 4.3 se explican las etapas necesarias y la implementación del método realizada, para que entregue resultados convenientes.

3.5. Utilización de velocímetros láser

La medición con este tipo de equipo presenta variadas ventajas técnicas, aunque necesita de equipamiento complejo y costoso, no formando parte de los objetivos del presente trabajo.

4. ALGORITMOS UTILIZADOS

4.1. Generación de la señal sintética en bruto

En el presente trabajo se utilizan sólo señales sintéticas generadas por software. Se simulan señales registradas como señales cuadradas moduladas en frecuencia, como una suma de una cantidad finita de armónicos modulados. De esta forma se consigue una señal limitada en su contenido de frecuencias que simula a la señal física real procesada por un filtro por hardware del tipo pasa bajos. Se adiciona posteriormente, según requerimiento, un ruido blanco gaussiano para conseguir una relación señal ruido (SNR) determinada en la señal en bruto.

4.2. Método del Ancho de Pulso (MAP)

En el presente trabajo se utilizaron funciones predefinidas como *pulseperiod* o *pulsewidth* de Matlab para la medición del ancho del pulso. La detección consiste en determinar el ancho del período medido a nivel de un valor de referencia medio de la señal, y obtenido por interpolación lineal entre puntos que definen un cambio de estado en una onda de dos niveles.

4.3. Implementación del Método de la Señal Analítica (MSA)

El algoritmo demodulador utilizado, basado en la detección de la fase de la función analítica, ha sido implementado mediante las siguientes etapas:

a) *Aplicación de un Limitador*, que conforma la señal en sus amplitudes, elimina variaciones causadas por ruido y otras modulaciones de amplitud, provenientes del tipo de sensor utilizado.

b) *Partición de la señal en frames* (ventanas temporales de menor duración). Esta operación tiene como función limitar la cantidad de datos, disminuyendo el tiempo máximo de la señal de proceso en las transformadas. Es conveniente en esta etapa también prever un grado de solapamiento de los *frames*, a efectos de evitar los errores de procesamiento relacionados con el comienzo y final de los registros. Cada frame es analizado como se explica a continuación y los resultados son ensamblados en el paso i).

c) *Cálculo de la Transformada de Fourier*. En este punto es conveniente usar ventanas de *muestreo* de la señal (Hanning, por ejemplo), ya que no modifican la fase de la señal y el

agregado de zona muerta, variable en función del caso, para evitar *leakage*, *ringing*, mejorar la definición de las frecuencias y la exactitud.

d) *Evaluación preliminar del ancho de banda de la señal* B_T, como la suma del ancho de banda B_{TW} por efecto de la señal modulante y el eventual incremento de ancho de banda Δf_c por variación de la frecuencia portadora (velocidad de giro del eje)

$$B_T = B_{TW} + \Delta f_c \tag{17}$$

donde

$$\begin{cases} \left.\dfrac{B_{TW}}{2W}\right|_{-70dB} = 2 + 3{,}1\,\beta & \beta \le 1 \\ \left.\dfrac{B_{TW}}{2W}\right|_{-70dB} = x_1 + x_2\,\beta + x_3 \exp(-x_4\,\beta) + x_5 \exp(-x_6\,\beta) & \beta > 1 \end{cases} \tag{18}$$

$x_1 = 10{,}3757;\ x_2 = 1{,}0516;\ x_3 = -2{,}9316;\ x_4 = 0{,}6952;\ x_5 = -5{,}1504;\ x_6 = 0{,}0517$

donde W representa al ancho de banda de la señal de velocidad torsional, esto es $n_{arm}\ f_m$. El ancho de banda B_{TW} de la Ecuación (18) fue calculado como curvas de ajuste a la curva que asegura un error de -70dB en la potencia, lo que se ha considerado apropiado para la presente aplicación.

e) Evaluación *numérica del ancho de banda en el espectro*. Esta evaluación involucra una serie algoritmos para identificar la primera banda y conseguir una aproximación numérica de su ancho, el que es contrastado con el ancho de banda preliminar calculado en el paso anterior.

f) *Aplicación* de *un filtro pasabanda* al espectro, anulando las frecuencias fuera de la banda de la frecuencia fundamental, que corresponden a las armónicas impares de la señal cuadrada.

g) *Cálculo de la función analítica de la señal*. La función analítica $X(t)$ de una señal real $x(t)$ es

$$X(t) = x(t) + i\,\tilde{x}(t) \tag{19}$$

donde $\tilde{x}(t)$ es la Transforma de Hilbert de $x(t)$. Conviene aquí calcular la Transformada directamente en el dominio de la frecuencia y a partir de la transformada de Fourier, [8]. Si x(t) tiene longitud de registro M (desde 0 a M-1), la señal analítica $X(t)$ puede calcularse como $X\,t = \text{IFFT}\ \ B\,m \cdot \text{FFT}\left[x\,t\right]$, $B\,m = 2$ para $m = 0, M/2 - 1$; $B\,m = 0$ para $m = M/2, M - 1$

Donde FFT e IFFT es la Transformada y Antitransformada de Fourier, respectivamente. Téngase además en cuenta en las transformadas el uso de ventanas y zonas muertas.

h) *Cálculo de la velocidad angular instantánea*. Existen varias alternativas posibles para obtener la IAS a partir de la señal analítica, [8]. Calculando los productos internos de la función analítica por su conjugada desplazada un intervalo temporal dt se tiene que:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$\delta\omega(t) = \frac{1}{dt}\ \arctan\frac{\mathrm{Im}\ X_n \cdot X_{n+1}^*}{\mathrm{Re}\ X_n \cdot X_{n+1}^*} \tag{20}$$

Esta opción resulta computacionalmente conveniente, ya que, partiendo de X(t) requiere solo M productos complejos para generar el producto elemento a elemento del vector complejo X por el mismo desplazado un dt.

i) Ensamble *de los frames* para obtener un historial de las velocidades angulares en el tiempo total registrado.

j) *Reducción de resolución de muestreo.* Ya que la frecuencia de muestreo de la IAS es la original de la señal portadora modulada, esta resulta excesiva para su frecuencia relativamente baja. La frecuencia de Nyquist es además excesivamente alta para la aplicación de un filtrado final pasa bajos, por representar la frecuencia de corte del filtro una fracción mínima de la frecuencia de Nyquist, por lo que debe efectuarse una reducción de la resolución del muestreo temporal.

k) *Filtrado pasa* bajos, con el objeto de atenuar las frecuencias altas fuera del rango de la IAS, siendo este el único filtro utilizado en el dominio del tiempo en todo el proceso. Se requiere un establecimiento previo de la frecuencia de corte, en función del caso a medir.

l) Corrección *de la línea de base* de la señal temporal, para mejorar el espectro en bajas frecuencias.

m) Las variaciones de velocidad instantánea del eje δf_0 se calculan finalmente como

$$\delta f_0(t) = \frac{\delta\omega(t)}{2\pi N} \tag{21}$$

5. CASOS ANALIZADOS Y RESULTADOS

Los algoritmos utilizados y los procedimientos citados en el apartado anterior, tanto el Método del Ancho de Pulso interpolado (MAP) y Método de la Señal Analítica (MSA) fueron implementados en un código computacional, que sirven para el pos procesamiento de registros adquiridos. A los efectos del presente trabajo, se generaron en cambio señales sintéticas simulando un caso real, sumando 12 armónicas moduladas. El caso representa una porción de señal de 10 s de duración de una máquina cuyo rotor gira a 600 rpm y aumenta su velocidad linealmente llegando a una frecuencia final de 1200 rpm. Se simula una vibración torsional de 15 Hz, con amplitud máxima de 2°, mientras que la amplitud del giro tiene temporalmente la forma de una ventana de Hanning de 6 s de duración.

En función del análisis efectuado en la primera parte de este trabajo, se adoptan parámetros convenientes para el procesamiento de datos. De acuerdo con la Ecuación (15) debe ser $N > 15$. Si se adopta por ejemplo una rueda con un valor disponible de N=30, de acuerdo con la Ecuación (16) resulta $f_s > 120.\mathrm{E}03\ s^{-1}$ por lo que se adopta $f_s = 200.\mathrm{E}03\ s^{-1}$. De la Ecuación

(8) se calcula las variaciones de frecuencia máxima del rotor, esto es $\Delta f_0 = 0{,}5236\,\text{Hz}$. Se generan además distintos casos en los que la señal en bruto generada es adicionada con un ruido blanco gaussiano con $\text{SNR} = 30, 20\,\text{y}\,5$. La Figura 1 muestra la señal en bruto generada para el caso con más nivel de ruido, esto es SNR=5. A modo de ejemplo, se muestran en la Figura 2 dos señales obtenidas como salida del algoritmo. Estas representan $\delta\tilde{f}_0$, que es la parte oscilatoria de la velocidad δf_0 obtenida eliminando la rampa de velocidad creciente del giro de la máquina de la velocidad total. El gráfico a) muestra la $\delta\tilde{f}_0$ del procedimiento MAP interpolado, con SNR_de entrada = 30, mientras que el gráfico b) la $\delta\tilde{f}_0$ para el procedimiento MSA, con SNR_de entrada=5.

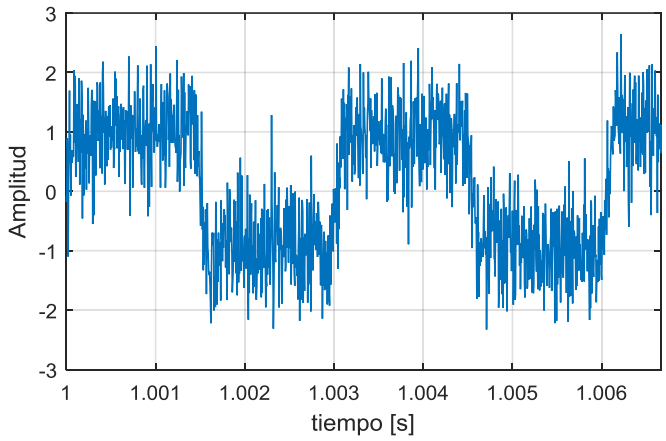


Figura 1: Señal en bruto generada con SNR=5.

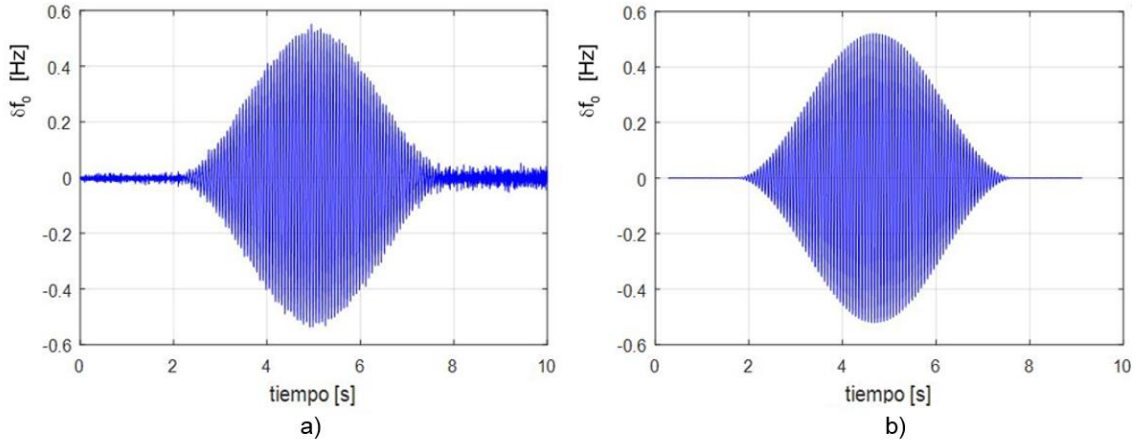


Figura 2: Parte oscilatoria de la IAS, a) MAP, SNR entrada = 30; b) MSA, SNR entrada = 5.

Se resume además en la Tabla 1 los casos analizados y los resultados obtenidos, indicando la SNR de la señal de velocidad instantánea $\delta\tilde{f}_0$ a la salida y el error en la amplitud del Δf_0 .

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos

SNR entrada	**SNR salida**		**Error Δf_0**	
	MAP	MSA	MAP	MSA
30 dB	27,87 dB	59,89 dB	0,49 %	0,56 %
20 dB	falla	52.97 dB	falla	0,56 %
5 dB	falla	39.74 dB	falla	0,56 %

La detección por el procedimiento MAP en las condiciones implementadas es solo posible para valores de SNR mayores que 26, por lo que en los casos SNR 20 y 5 el método colapsa. En la Figura 2a se nota un aumento del ruido de fondo para tiempos mayores, lo que se corresponde con un aumento del error de medición con incrementos de la relación f_c / f_s según Ecuación (13) . Obsérvese además que, a pesar de la importante contaminación con ruido de la señal en bruto de la Figura 1, la señal demodulada de la Figura 2 b permanece prácticamente inalterada y de mejor calidad que la de la Figura 2 a. Esto se debe a las excelentes propiedades del algoritmo MSA utilizado, basado en un método integral, en donde se computa todo el registro temporal. La relación señal/ruido final en el caso del MAP aumenta considerablemente en todos los casos (más de 20 dB de aumento para el caso de 30 dB de ruido de entrada). Respecto del error en la determinación de Δf_0, leído desde el espectro es un valor pequeño cercano al 0,5% para todos los casos.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo aborda distintas metodologías para la medición de la velocidad angular instantánea (IAS), tomando posición respecto de su aplicabilidad, necesidad de adaptaciones, exactitud y costos. Basándose en hardware comercial no específico, se analizan dos posibilidades de procesamiento por software de señales moduladas obtenibles mediante un codificador de bajo costo y transductor fijo: el método del ancho del pulso interpolado y una implementación del método basado en la señal analítica. Se realiza un análisis de los parámetros de medición y procesamiento necesarios para asegurar la calidad y exactitud deseada en los resultados. El trabajo contribuye a evitar el desconcierto y la prueba y error en la elección de numerosos parámetros involucrados. Respecto del método del ancho del pulso, tiene como ventaja evidente su sencillez, mientras que la resolución de la frecuencia instantánea y la sensibilidad al ruido pueden ser mejoradas implementando una interpolación por software de la señal bruta de entrada. Sin embargo, debido a su sensibilidad se hace inaplicable en señales contaminadas proveniente de ambientes ruidosos. La implementación de la señal analítica propuesta es mayormente computada en el dominio de la frecuencia, por lo que resulta rápida y

ISBN: 978-987-1676-63-7

eficiente. Ha demostrado tener excelentes propiedades de exactitud y resistencia contra el ruido, logrando señales de frecuencia instantánea de excelente calidad a partir de registros muy contaminados, tales como SNR=5. En este método además, la frecuencia de muestreo, factor que depende del hardware, puede ser menor que en el método del ancho de banda logrando buenas exactitudes. Como trabajo futuro, se prevé la posibilidad de algunas mejoras en el código computacional, la implementación de trabajo en tiempo real y adicionalmente la utilización del software para procesar señales reales provenientes de registros de máquinas en funcionamiento.

7. REFERENCIAS

[1] Gomez J., Bourdon A., André H., Rémond D., *Modelling deep groove ball bearing localized defects inducing instantaneous angular speed variations*. Tribology International, 98, 270-281, 2016.

[2] Becerra Villanueva J., Jiménez Espadafor F., Cruz Peragon F., Torres García M., *A methodology for cracks identification in large crankshafts*. Mech. Syst. Signal Process, 25 3168–3185, 2011.

[3] Gubran A., Sinha J., *Shaft instantaneous angular speed for blade vibration in rotating machine*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 44, 47–59, 2014.

[4] Charles P., Sinha J., Gu F., Lidstone L., Ball A., *Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis.* Journal of Sound and Vibration, 321, 1171-1185, 2009.

[5] Jiménez Espadafor F., Becerra Villanueva J., Palomo Guerrero D., Torres García M., Carvajal Trujillo E., Fernández Vacas F., *Measurement and analysis of instantaneous torque and angular velocity variations of a low speed two stroke diesel engine*. Mechanical Systems and Signal Processing, 49, 135–153, 2014.

[6] Yu S., Zhang X., *A data processing method for determining instantaneous angular speed and acceleration of crankshaft in an aircraft engine–propeller system using a magnetic encoder*. Mechanical Systems and Signal Processing, 24, 1032-1048, 2010.

[7] Li,Y., Tse,P., Yang, X., Yang, J. *EMD-based fault diagnosis for abnormal clearance between contacting components in a diesel engine.* Mechanical Systems and Signal Processing, 24, 1, 193-210, 2010.

[8] Feldman, M., *Hilbert Transform Applications in Mechanical Vibration.* John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2011.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

REGISTRO, INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE APARATOS SOMETIDOS A PRESIÓN SIN FUEGO. LINEAMIENTOS NORMATIVOS Y LEGALES.

Bersano C.[1], Simon R.[2], Scotto R.[3] Mattara, M.[4], Ponso R[5].

[1]Laboratorio Ingeniería Mecánica Forense – Facultad Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Av. Pellegrini 250, Rosario, Argentina
Ingcb45@gmail.com -- ingcb45@fceia.unr.edu.ar
[2] Lab. Ing. Mecánica Forense – FCEIA – UNR
[3] Lab. Ing. Mecánica Forense – FCEIA – UNR
[4] Esc. Ing. Mecánica – FCEIA – UNR
[5] Esc. Ing. Mecánica – FCEIA – UNR

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la problemática de los aparatos sometidos a presión (ASP) sin fuego en los aspectos técnicos y legales en la Argentina, en especial en las Pymes, en función de la legislación, la normativa y la realidad. En pocas provincias existe legislación, normativa y órganos de control que se ocupen del tema.

Para ello se analiza la legislación vigente en todas las jurisdicciones, los aspectos normativos en el ámbito de nuestro país y los más representativos del exterior, así como la situación real de nuestro país en la materia.

Se propone una metodología de registro de recipientes nuevos y un protocolo para el registro de recipientes que estén en uso y de los cuales, muchas veces, no se posee ni tan siquiera el legajo técnico. Se exploran para ello técnicas de ensayos no destructivos para ser utilizados tanto en la inspección inicial, como en las periódicas de los aparatos en servicio, para evitar paradas y desmontajes de importancia. Por otro lado se propone la utilización de técnicas de elementos finitos para el estudio de tensiones que conlleven a la detección de puntos potencialmente riesgosos, analizando zonas de los equipos seleccionadas en base a la experiencia de los profesionales intervinientes y su conocimiento de los códigos de diseño. Estos procedimientos facilitarían la confección de planes de inspección acordes a los riesgos presentes, y de ser necesario, a la búsqueda de las soluciones técnicas más adecuadas para cada caso particular.

Todo esto teniendo en cuenta especialmente las características de las Pymes y la preservación de la integridad estructural de los aparatos sometidos a presión sin fuego.

Palabras Claves: *Registro, Inspección, Mantenimiento, Aparatos, Presión*

1. INTRODUCCIÓN

La temática de los aparatos sometidos a presión sin fuego en nuestro país es compleja, ya que no existe una legislación unificada sobre el tema y la existente es escasa además de poseer muchas veces un fundamento técnico inadecuado. Pocos distritos poseen legislación, comprendiendo: la Ley Nacional 19587 [1], y las leyes, decretos o resoluciones de las provincias de Buenos Aires [2], Córdoba [3], Mendoza [4], Misiones [5], Santa Fe [6] y de la Ciudad Autónoma de Bs.As. [7].

Respecto a la Normativa sucede algo similar, aclarando que ninguna normativa es de uso obligatorio salvo que esté expresamente citada en alguna legislación, sino que es de uso voluntario por parte de la industria. Si bien en general en nuestro país se utiliza mayormente el Código ASME [8], coexisten otros códigos y normas como la API 510 [9], el código europeo EN 13445, el código alemán AD 2000 – Merkblatt, y el inglés PD BS5500 entre otros.

Esto trae aparejado una serie de problemas en el ámbito nacional ya que la falta de una legislación unificada o por lo menos armonizada implica que no existe un conocimiento cierto del universo que representan los aparatos sometidos a presión sin fuego en la República Argentina. En ese universo podrían definirse claramente dos sectores: el de las grandes empresas en las que por su propia envergadura y por sus políticas internas, que provienen muchas veces de casas matrices de origen extranjero, el tema está más controlado; y por otro lado las Pymes con su propia dinámica y su menor envergadura, muchas veces carentes de personal técnico capacitado en el tema y desconocimiento. Estos problemas se manifiestan de diversas formas, comenzando por la falta de la documentación técnica de los equipos y su historial, continuando por la falta de registro de los equipos tal como lo indican todas las legislaciones vigentes en las distintas jurisdicciones, donde existieran, y por la falta de un plan de mantenimiento e inspección periódica que nos indique el estado real del equipo, por lo que si se tiene en cuenta los distintos procesos de industrialización de nuestro país y la antigüedad de muchos de ellos los convierte en un serio riesgo.

De lo visto en el análisis histórico [10] de diversas bases de datos, especialmente la MIHDAS [11], se observa que en el 32% de las explosiones clasificadas se encontraron involucrados equipos sometidos a presión. Si se lo ve desde el punto de vista de la localización de las explosiones, se tiene que en las plantas de procesos el 44 % de las explosiones tuvieron origen en equipos sometidos a presión; y si se consideran las actividades de transporte y almacenamiento se ve que el 28 % de las explosiones involucraron equipos sometidos a presión. Del universo de fallas y causas posibles, las fallas mecánicas representan el 24 % de las causas de las explosiones. A estas fallas se las puede discriminar en tres categorías principales: Los problemas de fatiga, fragilización, corrosión, defectos de soldadura y otros fallos metalúrgicos, representan el 40 % del

ISBN: 978-987-1676-63-7

total; los problemas de pérdidas o fugas representan el 21 % del total; y los problemas de sobrepresión y fallas en válvulas de seguridad representan el 20%. Prácticamente todas estas fallas y problemas son detectables por medio de inspecciones visuales y ensayos no destructivos.

El objetivo de este trabajo es estudiar la problemática de los aparatos sometidos a presión (ASP) sin fuego en los aspectos técnicos y legales en la Argentina, en especial en las Pymes, en función de la legislación, la normativa y la realidad. En pocas provincias existe legislación, normativa y órganos de control que se ocupen del tema.

2. DESARROLLO

2.1. Análisis comparativo de la legislación

Con el fin de realizar un análisis comparativo de las diferentes legislaciones vigentes a nivel Nacional y Provincial, se han confeccionado una serie de tablas con los principales puntos a tener en cuenta para el análisis, para poder ir sacando conclusiones parciales hasta tener un panorama general.

Tabla 1: Referencias a Volumen, Presión

Legislación	Volumen	Presión	Observaciones
Nacional	No	No	Solo se ocupa de las condiciones de instalación, operación y los requisitos mínimos de seguridad
Buenos Aires	≥ 80 lts	≥ 3 Kg/cm^2	Posee capítulos específicos para GL, GLP, gases refrigerantes, comprimidos y disueltos, Cl, NH_3, y otros
Mendoza	≥ 100 lts	≥ 3 Kg/cm^2	
Santa Fe	> 50 lts	> 1 Kg/cm^2	

Tabla 2: *Requisitos de Registro, Construcción, Instalación y Operación. Normas Citadas*

Legislación	Registro	Const.	Inst. y Operac.	Normas citadas
Nacional	No	No	Sí	No
Buenos Aires	Profesionales Talleres Equipos	Sí	Sí	IRAN, DIN ISO, ASME, API 510, ANSI B31, ENARGAS
Mendoza	Equipos	No	Sí	ASTM, ASME, DIN, IRAM
Santa Fe	Profes. Equipos	No	Sí	IRAM

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 3: Inspecciones Periódicas, tipos de ensayos

Legislación	Inspecciones Periódicas -- Tipos de ensayos
Buenos Aires	a. Prueba Hidráulica o emisión acústica, a la presión de diseño con una frecuencia quinquenal b. Control de Espesor, anual c. Control de funcionamiento de los elementos de seguridad, anual d. Inspección visual interna y externa, anual
Mendoza	a. Prueba hidráulica y/o acústica, a una presión de 1,5 veces la presión de trabajo (o bien según la norma de fabricación del mismo), quinquenal b. Medición de espesores y verificación de integridad estructural, bianual c. Control de elementos de seguridad operativa, semestral d. Inspección Visual, anual e. Válvulas de Seguridad (Timbrado - control - calibración), anual f. Válvula de Alivio (Timbrado - control - calibración), anual
Santa Fe	a- Inspección Interna: Consistirá en la determinación del estado de las chapas, espesor de las mismas y condiciones en que se encuentran los refuerzos y costuras, por los medios que el inspector lo crea más conveniente.- b- Prueba Hidráulica: se realizará siempre que, de acuerdo con los cálculos la caldera esté en condiciones de trabajo, conforme a las Normas IRAM vigentes en la materia en caso de procedencia desconocida, o aquellas con las que fueron diseñadas y construidas, siempre que sean las reconocidas internacionalmente.- c- Inspección Externa, que comprende: en los aparatos sometidos a presión, control de manómetros y sellado de válvulas de seguridad reglamentarias.

Se advierte del presente análisis que no existe una Legislación Nacional acorde a la importancia del tema de los recipientes a presión.; y las diversas Legislaciones Provinciales existentes no conservan un criterio unificado en el aspecto registral y mucho menos en los aspectos técnicos esenciales. Ni siquiera poseen alcances similares, ya que los volúmenes y las presiones de los recipientes que se incluyen, no están unificados. Básicamente la mayoría de las legislaciones refieren a los códigos de fabricación bajo los cuales se construyeron los equipos, con lo cual las mismas se tornan inaplicables en la práctica.

2.2. Análisis de la Normativa

2.2.1 Normativa Nacional

A nivel nacional no existe un código de fabricación, ni de inspección de recipientes a presión sin fuego, así sean equipos fijos o móviles.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2.2 Normativa Internacional

A nivel internacional y según los usos y costumbres en nuestro país de usar normas americanas para el diseño de Aparatos Sometidos a Presión sin fuego, se tiene que las tres principales Normas o Códigos son:

• El Código ASME Sección VIII División 1 [8]: Es parte del código más difundido en nuestro país y uno de los más utilizados a nivel mundial, es básicamente un código de fabricación que abarca todos los aspectos de la fabricación y prueba de Equipos Nuevos. Pero las especificaciones para las pruebas se utilizan generalmente también para la revisión periódica de los equipos, de hecho la escasa legislación nacional (a todos los niveles) sobre el tema toma los fundamentos de este código cuando se especifican las características de las pruebas de presión a realizar periódicamente. En él se establece que todo recipiente sometido a presión, deberá aprobar satisfactoriamente la prueba hidráulica, cada punto del recipiente deberá ser sometido por lo menos a una presión hidrostática de 1,3 veces la máxima presión admisible de trabajo del recipiente; luego de la prueba el recipiente no debe presentar pérdidas ni deformaciones permanentes. También plantea como alternativa la realización de una prueba neumática.

• API 510 [9] y complementarias [12,13,14,15,16,17] : El American Petroleun Institute (API) ha emitido una serie de Normas y Prácticas Recomendadas, respecto a la temática de inspección, identificación de daños, evaluación de defectos, aptitud para el servicio y análisis de riesgo. La API 510, cubre aspectos que van desde la responsabilidad de los usuarios, inspectores, prácticas y técnicas de inspección, hasta los análisis y determinaciones en base a los resultados obtenidos. La inspección externa es básicamente visual y sirve para determinar la condición externa del equipo. Los recipientes deberían ser inspeccionados externamente cada 5 años, preferentemente mientras están en operación. La inspección interna en los recipientes se realiza con una frecuencia no mayor de 10 años o la mitad de la vida útil remanente calculada, basada en la velocidad de corrosión; si el valor de la misma es menor a 4 años entonces la inspección se debe realizar cada 2 años. Requiere especial cuidado en lo que refiere a la seguridad y a la limpieza de la superficie interna. En esta norma se indica que la prueba de presión no es parte de una inspección de rutina. La prueba de presión es normalmente requerida luego de una Alteración. Luego de terminada una Reparación, la realización de una prueba de presión queda a criterio del inspector.

• ANSI NB-23 [18]: Es conocido como NBIC (National Board Inspection Code). El propósito del Código es mantener la integridad de los equipos sometidos a presión, una vez que han sido puestos en servicio, proporcionando orientación a los inspectores, usuarios y organizaciones para realizar reparaciones y reformas, sirviendo de guía para el proceso de inspección, instalación, reparación y transformación. Específicamente en la parte RB se trata el tema de la inspección de los equipos en servicio sometidos a presión. Se cita como pilar básico de dicho proceso, a la

inspección visual; la realización de todo otro tipo de examen y/o método de ensayo no destructivo de inspección queda a criterio del inspector responsable de la tarea. Cuando se habla de la Prueba de Presión, se advierte que la misma no proporciona ninguna indicación de la cantidad de la vida útil restante o la confiabilidad futura de un equipo sometido a presión, la presión prueba en este caso sólo sirve para determinar si el equipo tiene defectos que no permitan que el mismo retenga la presión y en ciertos dicha prueba puede reducir la vida de servicio restante del componente debido a que puede causar deformación permanente en el mismo, con lo cual automáticamente el equipo debe sacarse de servicio. La presión de prueba no debe exceder el 90% de la presión de ajuste del dispositivo de alivio de presión para evitar daños en los mismos y debe seleccionarse o ajustarse de común acuerdo entre el Inspector y el propietario-usuario. Cuando no se pueda hacer una prueba de presión y se la considere necesario, se propone la realización de una prueba de fuga.

2.3. Registro de los Equipos

En lo que coincide prácticamente toda la legislación vigente es en que los aparatos sometidos a presión deben estar registrados, aunque no son uniformes los requerimientos para dicho registro. Como un modelo general, además de los posibles requerimientos particulares, se debe confeccionar el legajo técnico del equipo.

2.3.1. Legajo Técnico

Se supone que los equipos nuevos se entregan con la documentación técnica necesaria para la inscripción, que debe incluir: Memoria de cálculo del recipiente a inscribir, de acuerdo a la presión de trabajo y el tipo de servicio, según el Código bajo el cual fue fabricado, junto con el protocolo de la prueba hidráulica con el resultado del ensayo y el plano técnico donde se detallan las características constructivas del recipiente. Además la evaluación radiográfica de las soldaduras y el resultado de los defectos y la aceptación de los mismos, donde se incluya el plano de ubicación de las zonas radiografiadas, especialmente en las zonas de unión del cabezal con el cilindro (envolvente) y demás áreas.

El problema se presenta en la regularización de equipos que ya están en servicio, si bien esto está regido por las legislaciones provinciales “donde existieran”; los contenidos mínimos deberían contener la información necesaria para identificar el equipo, al fabricante y al propietario, como así también el legajo técnico del recipiente provisto por el fabricante o en su defecto confeccionado por un profesional habilitado, el cual de acuerdo a las incumbencias debe ser un ingeniero mecánico con matrícula vigente. Previo a este proceso se deben establecer las condiciones de servicio del equipo, la caracterización del material con el que está construido el equipo, mediante alguna de las

ISBN: 978-987-1676-63-7

técnicas usuales como ensayo químico, ensayo de PMI o medición de Dureza. Determinar el espesor de la envolvente y de los cabezales del equipo, por ultrasonido a través de un muestreo de puntos que sea representativo del equipo y sea la base para determinar la velocidad de corrosión en las futuras inspecciones periódicas. Junto a toda esta información se puede conformar el Legajo Técnico con el plano del equipo, el cálculo de verificación de resistencia del mismo según el Código bajo el cual fue fabricado si se conociese, caso contrario el profesional responsable de la inscripción debe optar por un procedimiento de cálculo de verificación como por ejemplo el Código ASME Sec. VIII Div. 1[8], verificando que las condiciones de servicio del equipo estén dentro del rango fijado por el cálculo realizado.

Junto al Legajo Técnico se debe agregar un Informe de Inspección Visual, que contenga como mínimo: Una inspección externa que describa el estado general del equipo, la presencia de zonas de corrosión, golpes, zonas afectadas por fuego, marcas que pudieran denotar fugas de fluido, estado de los soportes y anclajes, estado de los sistemas de control y seguridad, estado de los sistemas de purgado y demás accesorios. Una inspección interna para determinar su estado general, la presencia de zonas de corrosión y/o corrosión localizada, a través de una entrada de hombre o con un sistema de video inspección, junto a una evaluación de las soldaduras consideradas críticas, la que puede ser radiográfica o bien por ultrasonido, tintas penetrantes o partículas magnetizables. Y una Prueba de Estanqueidad siguiendo los lineamientos de la norma ANSI NB-23 [18]

2.3.2. Inspecciones Periódicas

Otro de los requisitos del proceso de inscripción es la presentación de un programa de inspección periódico basado en un criterio técnico reconocido y en función del historial del equipo, en algunos casos hay que basarse también en los requerimientos de la legislación vigente en la jurisdicción donde está instalado el mismo. El basamento técnico se da con el uso de la ANSI NB-23 [18], pudiendo también utilizarse de manera complementaria las API RP 572 [15] y la API 510 [9], y para la evaluación de los daños que pudieran detectarse en las inspecciones visuales puede ser de mucha utilidad la práctica recomendada API RP 571 [16]

Como punto complementario de las inspecciones y revisiones de los ASP, pero importantísimo desde el punto de vista de la seguridad, se deben revisar y recalibrar los dispositivos de seguridad de los equipos y de las instalaciones, en otras palabras revisar los dispositivos de alivio de presión (válvulas de seguridad y disco de ruptura) como así también los equipos de control de los compresores y generadores de presión (presostatos); para ello se puede tener como guía la norma API RP 576 [17], estos equipos de seguridad se deberían revisar y recalibrar como mínimo una vez al año.

2.3.2. Inscripción de Profesionales

Para la realización de estas tareas se requiere que los profesionales habilitados por sus incumbencias profesionales otorgadas por el título de grado, estén matriculados en el Colegio Profesional correspondiente. La realización de Cursos o Trayectos de actualización o perfeccionamiento sobre esta temática contribuye sin duda a acrecentar el conocimiento y experiencia de los profesionales habilitados, como así también a la formación de un criterio técnico-profesional más fundamentado, sin dejar de lado la imperiosa necesidad de incluir en dichos cursos la temática de la seguridad.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

De lo expuesto se aprecia que los procesos de Registro, Inspección (iniciales y periódicas) y las consideraciones a tener en cuenta en los proceso de reparación, re-rating o alteración de los aparatos sometidos a presión son complejos, especialmente cuando se esté ante la falta de la documentación técnica original del equipo y su historial de servicio. Es por ello que es muy útil valerse de una herramienta de análisis como la determinación de tensiones a través del Método de Elementos Finitos, para complementar los procesos normales de cálculo

En el caso concreto de un recipiente de aire comprimido que trabaja a una presión de 7 Kg/cm^2 y tiene un diámetro de 812 mm y una altura 3300mm construido en chapa F22, y utilizando un programa de elementos finitos tenemos que las tensiones (figura 1), están muy por debajo del límite de fluencia, siendo del orden de 400 a 500 Kg/ cm^2

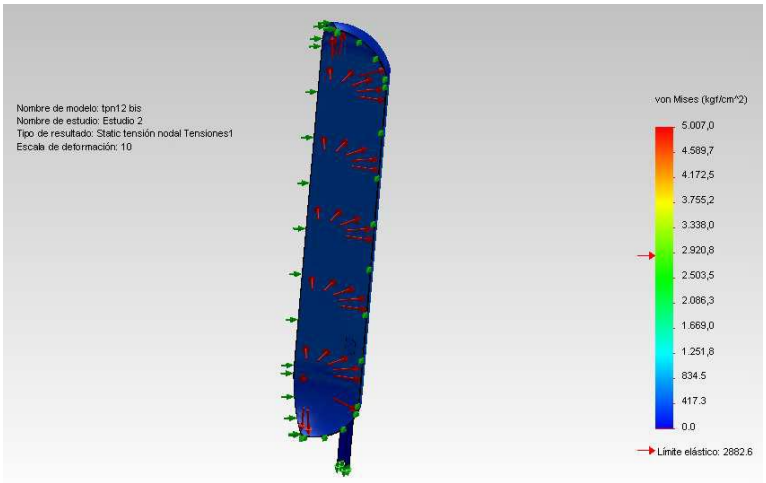


Figura 1: Tensiones sobre el recipiente

Ahora bien según se ve, la escala del estudio llega a los 5000 Kg/cm^2 (figura 1) en algunos puntos, tal como los que se encuentran en la zona del refuerzo de la pata de apoyo (figura 2).

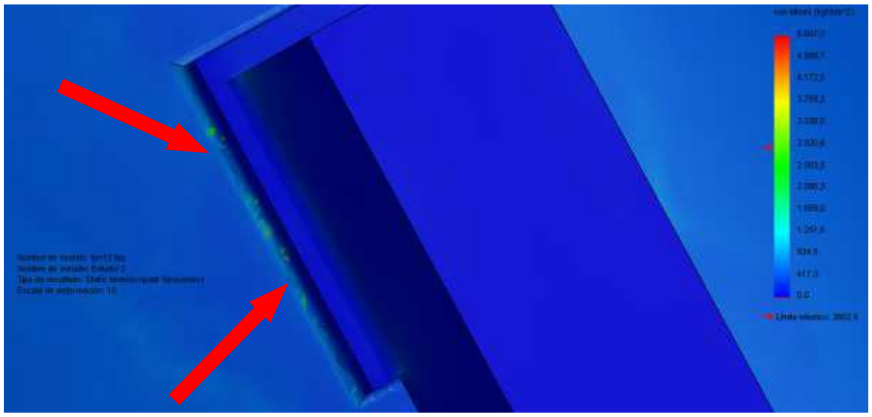


Figura 2: Tensiones en la zona de los apoyos del tanque

y la zona del caño de salida del recipiente, que es de 6” (figuras 3 y 4) donde existen zonas donde la tensión es cercana a el límite de fluencia

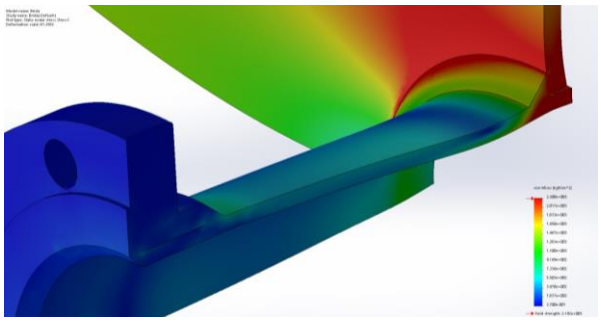


Figura 3

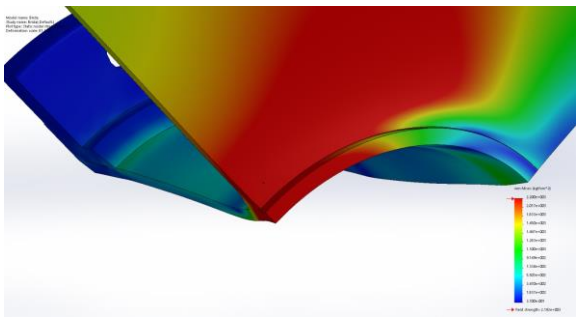


Figura 4

Esto trae aparejado la generación de una zona de plastificación, donde ante la aparición de una fisura la misma progresaría con rapidez, generando así un riesgo potencial muy alto de rotura del recipiente. Por lo tanto este Método de Elementos Finitos se trasforma en una poderosa herramienta para determinar puntos críticos del equipo donde se pudieran generar zonas de plastificación del material y de este modo ayudar a la diagramación de los planes de inspecciones periódicas, y también al análisis de las zonas a reforzar para así mantener la integridad estructural del equipo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1. Conclusiones finales

Dado lo disperso y muchas veces carente de fundamento técnico de la Legislación vigente en las distintas jurisdicciones se propone que la misma se unifique a nivel nacional en lo que respecta a los alcances y la definición de que es un Aparato Sometido a Presión sin fuego y que se defina un marco técnico donde los profesionales puedan trabajar con independencia y según su mejor criterio, marco éste que sin duda se debe basar en Normas y Códigos de Inspección reconocidas a nivel internacional.

El tema registral debe quedar en el ámbito de las jurisdicciones provinciales dado que son las autoridades de aplicación y porque además la protesta del ejercicio profesional también corresponde a esa jurisdicción la cual es transferida por ellas a los Colegios Profesionales.

Las inspecciones periódicas se deben basar en una inspección visual exhaustiva y un amplio uso de procedimientos de Ensayos No Destructivos, para minimizar los procesos de parada de las plantas, los desmontajes innecesarios y los problemas ambientales que se producen al generar una gran cantidad de agua contaminada producto de las pruebas hidráulicas innecesarias, lo que genera un alto costo y un lucro cesante elevado implícito en una parada de planta.

Por último se propone que se difunda el uso de herramientas computacionales para la determinación de tensiones en los equipos, con el fin de facilitar la detección de los puntos críticos que presenta el equipo y como herramienta para el análisis de las posibles soluciones a los problemas de resistencia estructural que pudieran aparecer, especialmente aquellas soluciones que podrían realizarse sin desmontar el equipo.

4. REFERENCIAS

[1] Ley Nacional 19587. Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo – Decreto. 351/79 y sus modificatorios (Capitulo 16).

[2] Resolución 231/96 de la Secretaría de Política Ambiental de la Pcia. de Buenos Aires, y sus modificatorias.

[3] Decreto 536/97 de la Pcia. de Córdoba.

[4] Resolución 3250/2011 de la Subsecretaría de Trabajo y Seguridad Social de la Pcia. de Mendoza.

[5] Ley de la Pcia. de Misiones, promulgada en el 2005.

[6] Ley Prov. 1373 y su Decreto 0605/2016 de la Pcia. de Santa Fe.

[7] Ordenanza 33677 (Anexo 3) y Código de Edificación de la C.A.B.A.

[8] ASME Boiler & Pressure Vessel Code – Sections VIII – Division I. Rules for Construction of Pressure Vessels. American Society Mechanical Engineering. Edition 2007

[9] API 510 Pressure Vessel Inspection Code: Maintenance Inspection, Rating, Repair, and Alteration. Edition: 8. American Petroleum Institute 01-08-2003

[10] Bersano, C. *Los Recipientes a Presión sin Fuego: sus fallas y la legislación vigente.* Trabajo Final Especialización FCEIA-UNR. 2014

[11] MHIDAS. "Majors Hazard Incident Data Service" SRD "Safety and Reliability Directorate" "Major Hazards Assessment Unit" del "United Kingdom Health and Safety Executive". Base de Datos Octubre 2003

[12] API RP 579 Recommended Practices for Fitness-for-Service. Edition: 1. American Petroleum Institute. 01-01-2000.

[13] API RP 580 Recommended Practices for Risk-Based Inspection. Edition: 1. American Petroleum Institute. 01-05-2002.

[14] API BRD 581 Base Resource Document for Risk-Based Inspection. Edition: 1. American Petroleum Institute. 01-05-2000.

[15] API RP 572 Recommended Practices for Inspection of Pressure Vessels. Edition: 2. American Petroleum Institute. 01-02-2001.

[16] API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. Edition: 1. American Petroleum Institute. 01-12-2003.

[17] API RP 576 Recommended Practices for Inspection of Pressure Relieving Devices. Edition: 2. American Petroleum Institute. 01-12-2000.

[18] ANSI/NB-23. National Board Inspection Code. American National Standard Institute. Edition 2004

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MEDICIONES DE COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL EN CONDICIONES COMPLEJAS

Mario R. Modesti [a], Daniel Conte [b] *,Dimas Benasulin [a] y Alexis Caro [b]

[a] UTN.-,FRC, LabSen (Laboratorio de Sensores e Instrumentación) Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina
[b] UTN.-,FRC, GIMSE, Ciudad. Universitaria, Córdoba, Argentina

∗ Autor a quien dirigir correspondencia. Cel.: +54 9 351 6143502; Tel: *54 351 5986000 int. 5-1119; e-mail: dconte@scdt.utn.edu.ar; danielaldoconte@gmail.com

RESUMEN- Para el estudio de estructuras mecánicas en condiciones operativas particularmente complejas, como el caso del análisis de vibraciones de un componente de carrocería de un camión, se desarrolla el presente trabajo consistente en un sistema de adquisición de datos con conectividad múltiple. Las mediciones se realizan en condiciones operativas reales con el objeto de obtener información sobre los sometimientos debidos al viento, de manera que la estructura objeto del análisis estará expuesta a la velocidad y vórtices de aire. La tecnología empleada incluye MEM's (Microelectromechanical systems) que permiten una masa muy pequeña en el transductor de medición de aceleración en tres ejes con una respuesta en frecuencia capaz de medir con un tiempo de muestreo de 10 mSeg. El sistema es capaz de adquirir datos de eventos particulares a relevar con el objeto de obtener el espectro frecuencial del sistema bajo inspección. Es abierto en código y capaz de relevar cualquier tipo de transductor acondicionado o no, constituyendo una red donde cada medición dispone de su propia CPU de adquisición, con capacidad de almacenamiento. Se propone con este sistema, caracterizar las modalidades de vibración del sistema bajo estudio dando como resultado las frecuencias naturales que componen las solicitaciones mecánicas por efectos del viento.

Palabras clave: *MEM's , Espectro de frecuencias, Acelerómetro, Red de sensores*

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se cruzan distintas situaciones interesantes de desarrollo, docencia y servicios a la industria. Se emprendió el desafío, con el objeto de responder a una propuesta de la industria automotriz rama camiones y con la visión estratégica de desarrollar una plataforma de mediciones de propósitos y aplicaciones múltiples. Para un proyecto con este grado de complejidad, se toman recaudos para que lo desarrollado sea un dispositivo que tenga uso en futuros servicios regulares y sobre una base de ensayos previstos.

El grupo GIMSE y el LabSen de la UTN Facultad Regional Córdoba, se integraron para proponer una solución. Utilizando los recursos de ambos se logró integrar el sistema de medición orientado a casos especiales. El primer desafío fue superar el gap que existe entre el análisis de vibraciones de predictivo y su equipamiento y el análisis estructural, para casos de superficies delgadas y baja rigidez. Es decir pasar de acelerómetro piezoeléctrico a otra tecnología que no altere el comportamiento del elemento de estudio, evolucionar en la transmisión de datos y el procesamiento. Este es el factor por el cual un Grupo con gabinete de vibraciones para predictivo requiere vinculación con un laboratorio de sensores. Los análisis de comportamiento estructural de partes blandas de carrocería de camiones no es fácil de abordar y hay poca experiencia publicada. Nos referimos a las viseras parasol, los espejos y los limpiaparabrisas, por ejemplo. Estos aditamentos son agregados a la topografía del vehículo, ya que cumplen una función necesaria pero, generando una serie de problemas estéticos, y funcionales también, ya que rompen las líneas de flujo aerodinámico. Estos elementos están sometidos a cargas variables producto de las corrientes de aire y torbellinos que se generan en el frente del vehículo. Las velocidades, cambios de dirección, torbellinos y cruces con otros vehículos grandes, generan vibraciones aeroelásticas, flutter y hasta bataneo. Sin querer entrar en las complejidades del flujo turbulento, es necesario señalar que estos elementos están sometidos a vibraciones, algunas veces ruidosas, producen efectos no deseados y rotura de esos elementos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

La aplicación adecuada presenta las restricciones siguientes: Los sensores (primeramente acelerómetros, pero pensado para agregar una variedad) deben adherirse solidariamente a la pieza a analizar y transmitir sin distorsionar o alterar el comportamiento. Se debe contar con una unidad de almacenamiento autónoma en razón de que los fenómenos a registrar se producen con el vehículo en movimiento. Se debe colocar un botón iniciador de proceso de toma de datos, y guardado. El conductor debe tener unas mínimas instrucciones para que la recolección de datos

ISBN: 978-987-1676-63-7

sea exitosa. Inicialmente se piensa en pruebas locales pero estos problemas se producen con mayor frecuencia en zonas ventosas de la Patagonia donde se circula en dirección opuesta a los vientos y con el agravante de que en los cruces de vehículos de gran porte se produce una onda de choque que genera un pico de perturbación considerable.

Las soluciones al diseño no consideran la rigidez exclusivamente y menos en exceso, lo cual sería una seria penalización en la estética de estos elementos y en los costos. Para este caso comenzamos con la visera únicamente.

Como en los casos de espejos y limpiaparabrisas, estos accesorios cumplen una función cuya morfología, no es compatible con el orden de líneas en el campo de flujo que se pretende.

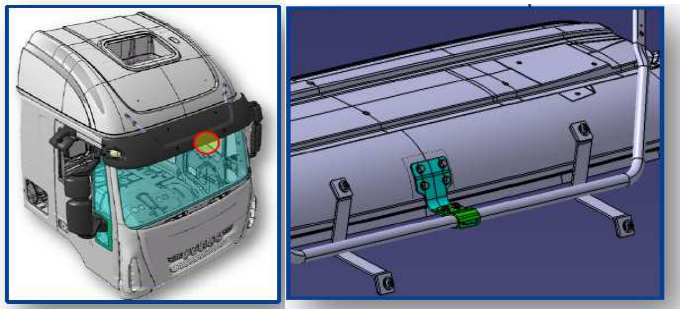


Figura 1: Estructura bajo análisis

En la figura1 se puede apreciar la localización del aditamento y los soportes actuales. A la izquierda vista general y a la derecha, vista particular del soporte, con un agregado adicional central.

3. PLATAFORMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A los efectos de disponer de un sistema flexible con capacidad de montaje rápido y con la menor necesidad de cableado posible, se propone un sistema con alto grado de conectividad por diferentes medios de comunicación. Por otro lado la modularidad es una característica requerida para permitir la ampliación de adquisición de variables de diferentes características.

3.1 Hardware

Partiendo de un criterio de diseño modular y previendo de medios para el trabajo en red se ha desarrollado la Unidad de Adquisición de datos auto-contenida, razón por la cual es posible considerarlo un mini computador dedicado. Gracias a las nuevas tecnologías de memorias de almacenamiento de gran capacidad y reducidas dimensiones, cada Unidad cuenta con suficiente

capacidad de almacenamiento local permitiendo el registro de ensayos multi-variables de larga duración. Es importante destacar que la velocidad de acceso (grabación y lectura) de estas nuevas memorias, permiten registrar señales de frecuencias medidas en el dominio del tiempo.

El acceso y control de cada Unidad es transparente al usuario, sin embargo la conectividad del sistema está apoyado en redes industriales e inalámbricas, permitiendo esta modalidad dual disponer de sensores en forma remota sin necesidad de trazar cableado y para los casos críticos desde el punto de vista temporal y de sincronización la posibilidad de la interacción a través de un estándar RS-485. Este enfoque permite controlar n subredes cableadas desde un único punto como se ilustra en la figura 2.

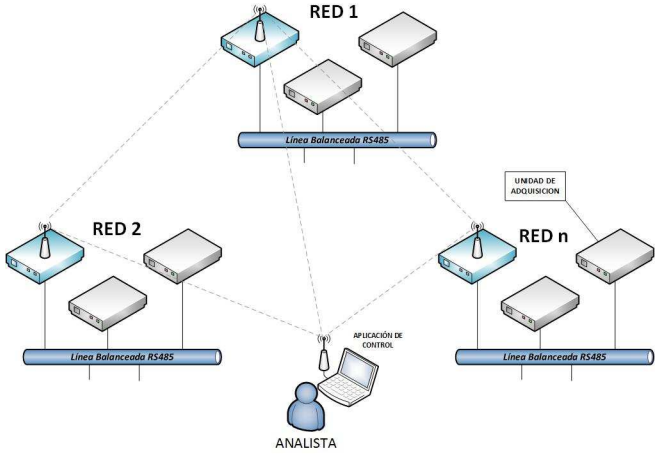


Figura 2: Estructura de red del sistema de adquisición de datos

3.1.1 Sensor de Vibraciones

La primera aplicación consiste en la medición de vibraciones, por medio de ace-lerómetros, como elemento primario de medición se ha seleccionado un acelerómetro de tecnología MEM. Esta nueva tecnología se encuentra en evolución permanente, permitiendo que los dispositivos basados en ella abarquen cada vez más aplicaciones, extendiendo su alcance de operación. Este avance en las tecnologías de integración y evolución de los sistemas micro electro-mecanizados permite obtener en una pastilla de reducidas dimensiones tres acelerómetros orientados en los respectivos ejes en conjunto con la electrónica de conversión y transmisión de las mediciones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Otra característica importante es su velocidad de conversión, alcanzando las 3200 muestras por segundo, en los tres ejes, lo cual implica que permite la adquisición de un evento a una frecuencia de 1600 Hz. Este ancho de banda es suficiente para la mayoría de vibraciones mecánicas y armónicas encontradas habitualmente en la industria.

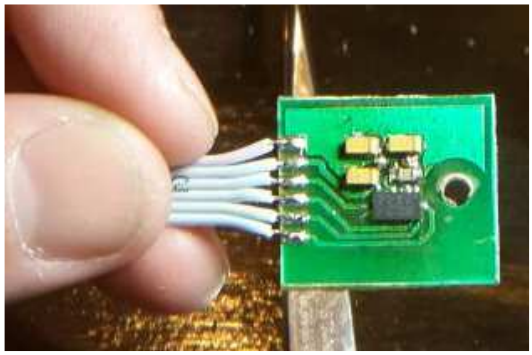


Figura 3: Acelerómetro triaxial MEM

Contando con una interfaz digital, se dispone además de una memoria interna de 32 posiciones más la lectura actual en los tres ejes en resolución de 13 Bits. La figura 3 muestra una unidad de acelerómetro triaxial en escala real, dispone de comunicación serial con la unidad de adquisición.

3.2 Aplicación de software

Actualmente la gran mayoría de aplicaciones de control, supervisión y registro de variables industriales aprovechan la disponibilidad de interfaces gráficas (HMI) apoyadas en la potencia de cálculo y grafica de los ordenadores. Siguiendo esta línea de diseño se ha desarrollado una aplicación en PC capaz de proveer al analista de todos los elementos necesarios para administrar la red de registradores en forma intuitiva y eficaz, acortando el tiempo de aprendizaje gracias a la similitud de operación con sistemas estándar de la industria.

ISBN: 978-987-1676-63-7

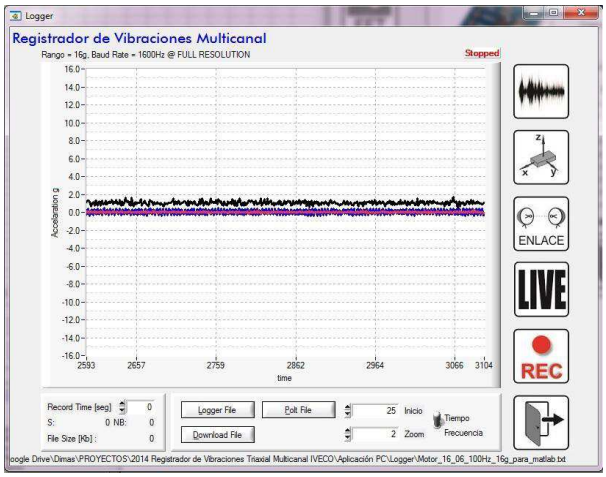


Figura 4: Pantalla de Usuario de la aplicación

En la figura 4 se presenta la pantalla principal de operación de la misma, en estado de reposo, donde se pueden apreciar los tres ejes en tendencias de tiempo real.

3.2.1 Interface Humano-Maquina (HMI)

La interfaz desarrollada presenta un panel principal de visualización de las mediciones en el dominio del tiempo capaz de cambiar a modo frecuencia donde se visualiza el espectro de frecuencia de la señal adquirida.

Dispuestos en forma de columna en la Figura 5, se encuentran ordenados los comandos de funciones principales del programa operativos por medio de mouse en pantalla. En la tabla a continuación se describen las funciones correspondientes a cada uno.

	Cambia la visualización a modo Espectro de Frecuencia, realizando el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier de la señal adquirida.
	Cambia la visualización a modo Tiempo mostrando un número determinado de muestras adquiridas.
	Permite direccionar un determinado sensor, realizar calibración y ajustar parámetros de rango, tasa de transferencia, resolución y estado del mismo.

	Permite configurar el puerto local de comunicación con la Interfaz Zig Bee, enlace de 2.4GHz a la Red de Registradores.
	Establece el modo de visualización en tiempo real del sensor direccionado, visualizando los tres ejes a intervalos de 250ms.
	Envía el comando de inicio de registro a los sensores presentes en la red.
	Cierra la aplicación.

Figura 5: Comandos de la aplicación

El panel inferior permite configurar los parámetros de ensayo, estableciendo el tiempo de registro y asignando el nombre al archivo almacenado. Además mediante la función Plot File es posible cargar un archivo de registro para visualizar en el panel principal. En la figura a continuación se presenta el panel de usuario, ver Figura 6.

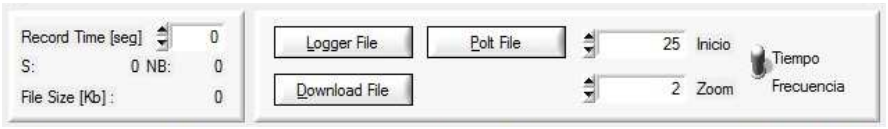
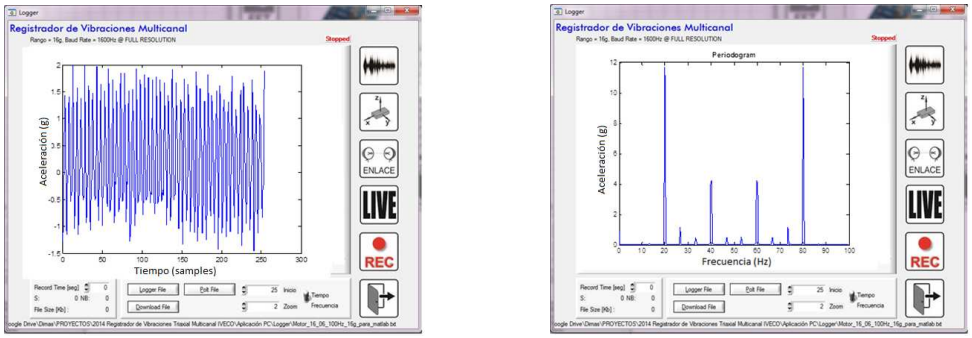


Figura 6: Configurador de parámetros de la aplicación

3.2.2 Unidad de Procesamiento

La unidad de cálculo del sistema permite obtener el espectro de frecuencias de la señal temporal que se está evaluando, de acuerdo al tiempo de adquisición se dispondrá la descompresión del sistema para realizar el resguardo de datos, a los efectos de no comprometer la adquisición con la eventual pérdida de datos, por asistir servicios que pueden diferirse en el tiempo. Como la transmisión. El sistema es capaz de proveer los datos crudos de la adquisición, para ser procesados por el analista a criterio del experimento que se está realizando, o ser calculado por el sistema, proveyendo en pantalla el espectro obtenido en diferentes escalas que permitan individualizar fenómenos particulares. Se dispone de una escala de tiempo y frecuencia variable para localizar algún evento en la escala de tiempo que se desee analizar en profundidad.

ISBN: 978-987-1676-63-7



Escala temporal Escala frecuencial

Figura 7: Pantallas típicas de adquisición y espectro de frecuencias

La figura 7 muestra una pantalla de adquisición de datos en el dominio del tiempo, que no provee mayor información, más que los valores máximos y mínimos de la señal producida por los acelerómetros, graduada en desplazamiento. La segunda pantalla es el espectro de frecuencias correspondiente a intervalos de muestras involucradas en el procesamiento, por medio de la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La modalidad de la escala y/o filtrado del espectro es decidida por el operador en función del tipo de medición que se esté realizando. Esta misma información en tiempo/frecuencia puede ser trasmitida por la unidad de procesamiento para ser procesada fuera del sistema de medición, disponiendo de este modo más posibilidades de manipulación de las señales. El formato es simple y legible por cualquier sistema de procesamiento o programa científico.

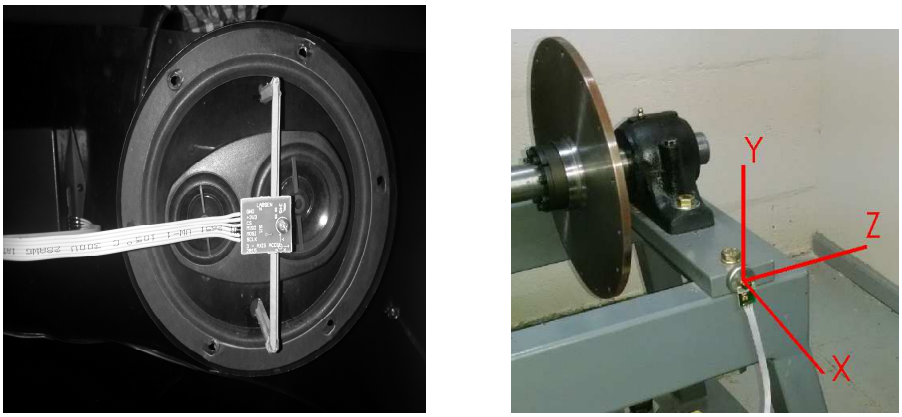
4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas preliminares y ajustes del sistemas fueron realizadas simulando frecuencias de las esperables en la aplicación real aprovechando las dimensiones reducidas de la unidad sensora (MEM). Los montajes disponibles se adaptaron para realizar mediciones en el rango de lo esperable en la aplicación real, se los presenta como dos casos.

Caso 1. Por medio de un montaje de pórtico se adecuo el sensor en el cono de un woofer de audio frecuencia (transductor de BF) y por medio de un generador de señales se excito el transductor de audio hasta obtener amplitudes suficientes para producir niveles de señal suficiente para excitar el acelerómetro.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Habida cuenta de la no linealidad del woofer y el sistema de amplificación, se lograron mediciones suficientemente cercanas a las producidas y medidas por el generador de señales de entrada. Con el fin de estudiar las alinealidades en el desplazamiento del cono de un transductor de baja frecuencia se ha acoplado mecánicamente el sensor al cono, registrando directamente los desplazamientos.



Caso 1 Caso 2

Figura 8. Pruebas experimentales

Mediante un generador de ondas arbitrarias conectado a la entrada de un amplificador de potencia se ha excitado el cono del transductor bajo estudio. En la figura 9 se muestra el esquema del montaje empleado.

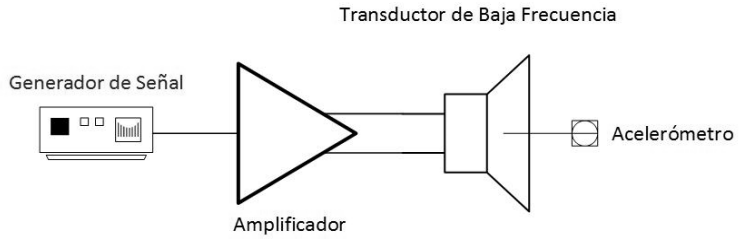


Figura 9. Conexionado empleado para realizar el ensayo del Transductor de BF

El Generador empleado cuenta con la posibilidad de conformar una onda en función de los armónicos deseados hasta un total de 16 componentes, constituyendo un Generador Armónico

ISBN: 978-987-1676-63-7

Programable. Esta funcionalidad ha permitido evaluar la resolución espectral para diferentes tasas de muestreo.

Caso 2. Por medio de un banco de simulación de fallas, constituido por un motor trifásico controlado por inverter y desbalance ajustable, se generaron vibraciones con espectros armónicos confrontables con un sistema de medición comercial.

En forma intencional se ha montado una carga excéntrica en el disco rotante de manera de generar un desbalance mecánico. Mediante el montaje realizado se ha encontrado la frecuencia e intensidad del desbalance experimentado. Estos resultados han sido contrastados satisfactoriamente con equipos profesionales de análisis de vibraciones.

5. TRABAJO A FUTURO

Actualmente la red de registradores es controlada a través de un computador portátil en el cual se ejecuta la aplicación desarrollada, lo que implica trasladar dicho dispositivo a las proximidades de lugar donde se realiza el ensayo.

Una alternativa a futuro, es desarrollar una aplicación que se ejecute en un Sistema Operativo móvil, permitiendo el uso de una Tablet PC o un Smart Phone con una plataforma operativa Android. Con este fin es necesario integrar una interfaz Xbee – Android.

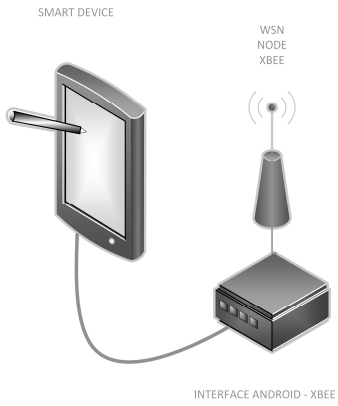


Figura 10. Control a través de un Dispositivo Móvil Inteligente

7. CONCLUSIONES

Esta experiencia tiene varias aristas interesantes desde el punto de vista de un Grupo de Investigación que no puede descuidar los servicios de alta tecnología a la industria, si pretende financiarse más allá de lo establecido por el estado. También hay que considerar las ocasiones en las que se debe impulsar la vocación de participar, a los fines de apuntar a la generación de conocimiento, la sustitución de importaciones y la intervención de estudiantes y recientes graduados. También debemos considerar los aportes que agregan valor a los graduados que se encuentran en las empresas que solicitan el servicio, lo cual implica una tarea didáctica. Con este tipo de dispositivo pretendemos cubrir necesidades específicas, sustentable mediante servicios de tecnología. Por otro lado, en el mercado actual no se encuentran estos tipos de acelerómetros para instrumentación en laboratorios, por ello en el presente trabajo se forman bases sólidas de conocimiento, para interactuar con estos sensores, sin perder precisión en las mediciones. Otra ventaja es la baja masa y costo en contraste con los sensores piezo eléctricos, esto podría liberar la posibilidad de la utilización en grandes cantidades para la implementación en equipos determinados (automóviles, cosechadoras, máquinas industriales, etc) y de esta forma predecir fallas.

8. REFERENCIAS

[1] Faludi Robert, Building Wireless Sensor Networks, A practical Guide tothe ZigBee Mesh Networking Protocol, Editorial: O'Reilly, pp 25 - 562011.

[2] Ibrahim Dogan, SD Card Proyects Using the PIC Microcontroller,Editorial: Elsevier – Newnes, pp 361 – 393. 2010.

[3] Benasulin Dimas, Monitoreo, Registro y Control de Redes de Sensoresmediante Dispositivos Moviles Inteligentes, Argentina, Córdoba, 2015.

[4] Modicon Inc. Industrial Automation Systems, Modbus ProtocolReference Guide, North Andover, Massachusetts, 1996.

[5] S. Graham Kelly, Mechanical Vibrations Theory and Applications,Estados Unidos, Editorial: Cenegage Learning, 2012.

[6] National Instruments, The Fundamentals of FFT-Based Singal Analysisand Measurement in Labview and LabWindows/CVI, 2009.

[7] Freescale, MC9S08QE128 Reference Manual HCS08 Microcontrollers,Rev. 2 6/2007.

[8] Freescale, MC9S08QE128 Datasheet: Technical Data, Rev 7, 10/2008.

[9] Analog Devices, ADXL345 Datasheet, Rev. 0, 2013.

[10] Christopher J. Fisher, Utilization of the First In, First Out (FIFO) Buffer

in Analog Devices, Inc. Digital Accelerometers, Analog, Devices, AN-

1025, 2009.

Agradecimientos

Agradecemos la oportunidad ofrecida por los Ings. Guillermo Ellena y Ramón Wierna y su confianza en este equipo. Agradecemos la buena predisposición del equipo del LabSen y del GIMSE.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL ÁREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

O FATOR MANTENABILIDADE NA ORGANIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO CORRETIVA E PREVENTIVA

Erikson Anchieta da Silva[1]

[1]Centro de Ciências Tecnológicas-Universidade Estadual do Maranhão
Cidade Universitaria Paulo VI. C.P 09. Tirirical. CEP 65055-970-São Luís-MA. Fones: +55(98)98451-7159
Correo-e: erikson.asilva@gmail.com

RESUMO

Este estudo apresenta uma abordagem sobre mantenabilidade, enfatizando a sua importância no processo de organização da manutenção corretiva e preventiva. A mantenabilidade consiste na facilidade de um item em ser mantido ou recolocado no estado no qual pode executar suas funções requeridas. Tratando de manutenção corretiva e preventiva dentro das indústrias, o tempo de reparo sempre é levado em conta por que o processo produtivo exige agilidade na realocação do equipamento defeituoso. Se desde o momento de analise de compra até o reparo de um componente, a mantenabilidade tiver sido ressaltada como fatores imprescindíveis teriam se grandes ganhos como, por exemplo, na: eficácia de um componente, na disponibilidade, na dependabilidade e entre outros. Neste trabalho é revisada a história da manutenção e analisado alguns conceitos de confiabilidade para que melhor fique entendido o grau de relevância da mantenabilidade. Buscando de maneira simples, porem concisa, alternativas que melhorem a organização da manutenção corretiva e preventiva.

Palavras Chaves: *Mantenabilidade,Confiabilidade,Gestão da Manutenção.*

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho ressalta a importância da mantenabilidade na organização da manutenção corretiva e preventiva. Sendo fator indispensável no planejamento estratégico de novos equipamentos e sistemas, e para a conservação dos mesmos.

Mantenabilidade já faz parte do cotidiano da manutenção e vem ganhando cada vez mais destaque nos trabalhos e debates sobre gestão da manutenção, por está diretamente ligado a fatores como confiabilidade, disponibilidade e dependabilidade.

Conceitos e métodos que hoje são indispensáveis para qualquer empresa que queria agregar valor aos seus serviços ou produtos e ser também sinônimo de qualidade. É a busca de novos desenvolvimentos tecnológicos, aumento na lucratividade e redução de custos que torna o estudo em torna da manutenção cada vez mais abrangente. O anseio do homem de tratar a conservação de instrumentos e equipamentos com certo cuidado não é de hoje. Desde o início das civilizações isto já é uma pratica comum entre os homens. Mas não há de fato um consenso entre os autores de quando se começou efetivamente a função de manutenção, o que torna incerto afirmar qualquer data.

Porem, a manutenção passou por três gerações e sua história inicia-se antes da década de 30. A primeira geração é marcada pelo fato de consertar apenas o que quebrava (hoje conhecida como manutenção corretiva), onde não existiam grandes maquinas e nenhum planejamento organizacional.

Na década de 40 começa a dita segunda geração, onde existe o advento de maquinas mais complexas, computadores grandes e lentos, disponibilidade crescente e maior vida útil do equipamento. Essas exigências fazem com que as empresas elaborassem sistemas de planejamento e controle do trabalho, monitoramento por tempo, são estas mudanças que caracterizam a segunda geração.

Após os anos 70 surge o conceito de manutenção preditiva, que segundo Alan Kardec “é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática”. Sendo este a primeira quebra de paradigma na manutenção. As exigências são ainda maiores e origina as principais filosofias da manutenção como: os 5S, manutenção produtiva total, manutenção centrada na confiabilidade entre outras.

Já nos últimos anos a manutenção tem tido ainda maior ênfase no processo de expansão das indústrias. As constantes mudanças na exigência do mercado e no aumento da competitividade derivada do atual modelo econômico acarretaram na necessidade deste setor se modernizar de forma que acompanhe todas estas transformações

As empresas que querem se manter firmes no mercado e aumentar sua capacidade produtiva tem que investir no setor da manutenção. Investir de maneira inteligente aplicando conceitos de gestão estratégica para que o desperdício seja o mínimo possível. Há muito que melhorar reduzir e ganhar na manutenção e as empresas que não acompanham o ritmo do mercado perdem seu espaço, passam a existir apenas para sobreviver e não inovar.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. MANUTENÇÃO CORRETIVA

Mesmo com todas as técnicas utilizadas pela manutenção, é inevitável não aplicarmos a manutenção corretiva. Independentemente do processo de produção e dos padrões de qualidade, todo e qualquer equipamento têm uma vida útil estimada e cuidados específicos que normalmente nas indústrias não são seguidos e que leva a ocorrência de falhas no item.
A NBR 5462/1994 [3] define manutenção corretiva como a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”.
Hoje, até mesmo a manutenção corretiva, não pode ocorrer de modo que não tenha sido planejada. Paradas indesejadas implicam em custos com novos itens, se o item não estiver em estoque o tempo de parada é prolongado por tempo indeterminado o que prejudica diretamente na produção entre outros vários problemas. Paradas não planejadas para manutenção corretiva é acima de tudo prejuízo para a empresa.
A postura que o setor da manutenção tem que ter em relação à manutenção corretiva é de planejá-la. A manutenção corretiva planejada é derivada de uma preditiva, portanto a manutenção pode se precaver e previr futuras intervenções corretivas. No caso da manutenção corretiva planejada, a correção de uma falha acontece em função de um acompanhamento preditivo e preventivo. Sendo assim, a manutenção corretiva feita de forma planejada torna-se mais seguro, mais rápido e evita gastos desnecessários.
O sucesso da manutenção corretiva será garantido com um planejamento eficaz. É importante focar na organização para otimizar os custos, aumentar o faturamento, garantir a segurança do pessoal e das instalações, a manutenção quase sempre pode ser melhorada.

3. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A manutenção preventiva são ações realizadas periodicamente em um item, baseado num cronograma que visa detectar, impedir ou atenuar a degradação deste item. A NBR 5462/1994 define manutenção preventiva como “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item.”.
Para Nunes [9] “adotar a manutenção preventiva significa introduzir o fator qualidade no serviço da manutenção”. A manutenção preventiva ajuda a melhorar a confiabilidade, aumentar a disponibilidade e a reduzir custos de substituição, estas vantagens atinge diretamente o fator qualidade no serviço da manutenção.
Nas atividades da manutenção preventiva abrangem verificações de maquinas, dispositivos e ferramentas, alterações parciais ou totais em cada peça, mudanças de óleo, lubrificações e demais tarefas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A situação da manutenção no Brasil, Documento Nacional -2011 da ABRAMAN [3] indica que 37,17% dos recursos da manutenção são aplicados na manutenção preventiva. É o tipo de manutenção em que mais concentra recursos, porem, é a que mais se traduz em redução de custos e capital. Não é por acaso que nos últimos 16 anos em quem a ABRAMAN realiza e divulga o Documento Nacional, que a manutenção preventiva aparece como a que mais recebe recursos, em média 36,65%.

Dentre as desvantagens da manutenção preventiva está a possibilidade da introdução de erros durante as intervenções. Estes erros em vez de atenuar uma possível falha acabam agravando a situação, neste caso a qualificação do capital humano é uma das preocupações da manutenção moderna e deve está dentro de qualquer planejamento e organização para garantir a qualidade dos serviços da manutenção.

A manutenção preventiva não é o programa de manutenção ideal, mas em relação à manutenção corretiva ela tem inúmeras vantagens. Não podemos afirmar que a preventiva vá impedir que um equipamento falhe, porque ela não vai, mas irá reduzir a frequência de falhas. Tudo dependerá de um planejamento eficaz focado na confiabilidade e na disponibilidade.

4. A ORGANIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Diversos modelos estruturais de manutenção caracterizam boa parte das organizações. Como a manutenção é organizada e como é priorizado o uso de recursos são identificados a partir destes modelos. É importante que a equipe responsável por organizar a manutenção tenha uma ampla compreensão dos requisitos de ordem de trabalho.

Muitas empresas pensam que planejamento e organização é a mesma coisa, outras sabem a diferença, mas pecam em uma ou em outra, por isso, vale ressaltar que organização é diferente de planejamento. De maneira bem simplória pode se afirmar que a organização define o que e como, enquanto o planejamento define quando e quem. O planejamento é, por exemplo, para obter as peças certas de reposição, materiais, licenças, ferramentas e habilidades definidas. A organização da manutenção deve assegurar a efetiva implementação do planejamento e controle das atividades da manutenção.

O controle das atividades de manutenção pode ser realizado pela ficha de manutenção e ficha de serviço. A ficha de manutenção é a solicitação de manutenção, onde o operador do equipamento informa o presságio ou a falha e suas possíveis causas.

A ficha de serviço ou ordem de serviço tem por objetivo documentar os problemas detectados no equipamento durante o tempo de manutenção. Nesta ficha são relatadas as peças substituídas, modificações feitas, outros problemas encontrados, bem como a provável causa do defeito. Esta ficha de serviço deverá ser arquivada no histórico de manutenção do referido equipamento. É importante destacar o número total de horas trabalhadas, pois isto servirá para o cálculo do custo da manutenção realizada.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Segundo Hatakeyama [15] “para os trabalhos de rotina, altamente repetitivos, o gerente deve criar e determinar os procedimentos e métodos apropriados, elaborar os seus manuais e treinar as pessoas, fazendo com que elas executem os seus trabalhos de acordo com os mesmos.”
Um acompanhamento das ordens de serviços devidamente arquivadas permite que o gestor da manutenção compreenda melhor as cargas de trabalho do setor. Os autores Kardec e Lafraia [7] declaram que “A manutenção focada no reparo parte da filosofia de que o equipamento irá falhar e a missão da manutenção é responder rapidamente para fazer o reparo.”. A falha é esperada, mas a manutenção não deve focar no reparo. Por isso um acompanhamento das ordens de serviços é essencial para que o gestor planeje de forma eficaz uma estratégia que vise dispor uma melhora na confiabilidade e mantenabilidade dos equipamentos.

5. CONFIABILIDADE

Confiabilidade pela NBR 5462/1994 [2] é definida como “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.”. A função sob a óptica operacional é toda e qualquer atividade que um item desempenha.
Branco [4] define a confiabilidade dos sistemas industriais como a probabilidade de um item ou uma máquina funcionar corretamente em condições esperadas durante determinado período de tempo ou de ainda estar em condições de trabalho depois de determinado período de funcionamento. Ou seja, é a probabilidade de funcionamento sem falhas por um tempo, sendo definida pela função matemática representada na Eq.(1).

$$P(o) = R(t) = e^{-\lambda t}$$

Utilizando de estatística matemática, teoria das probabilidades e o conhecimento experimental das causas das falhas como ferramentas, a confiabilidade pode elaborar regras capazes de fazer que os itens funcionem satisfatoriamente.
Os resultados da confiabilidade na manutenção são visíveis em todas as empresas que adotam está filosofia. Um gerenciamento estratégico entre os demais setores da empresa integrado ao conceito de confiabilidade é capaz de gerar aumento no faturamento e redução de custos na manutenção. A pesquisa do Documento Nacional – 2013 da ABRAMAN [3] indica que o custo anual das empresas brasileiras tem tido uma queda acentuada nos últimos 10 anos, como é apresentado na Figura (1).

ISBN: 978-987-1676-63-7

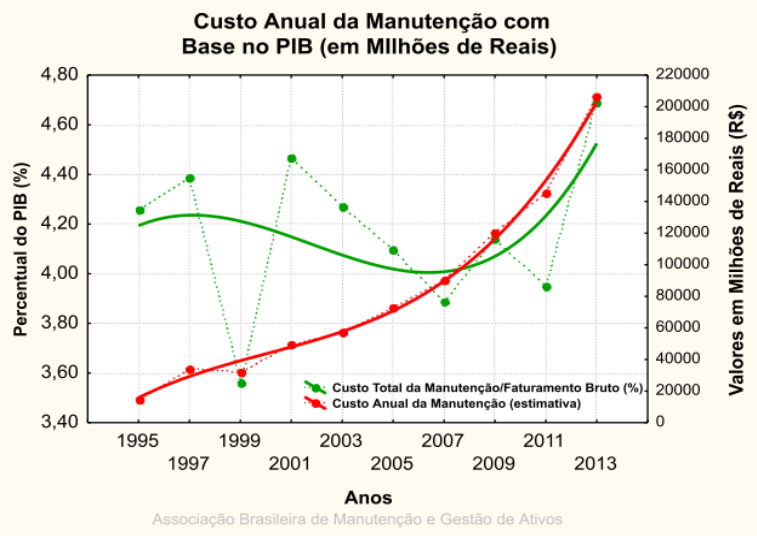


Figura 1. Custo Anual da Manutenção com Base no PIB (Milhões de Reais).

Fonte: A Situação Nacional da Manutenção – Documento Nacional 2013, ABRAMAN.

Kardec e Lafraia [7] afirmam que: “Para que tenhamos confiabilidade em equipamentos e sistemas não podemos esquecer que isto necessariamente implica investimentos de capital”. Confiabilidade será obtida através de mais material, ou seja, maior espessura ou dimensão, materiais melhores ou mais nobres ou mais caros, ou, por fim, pelo uso de equipamentos reservas para atuar como substitutos no caso de falha do equipamento principal.”

Confiabilidade custa recurso financeiro e pessoal qualificado, isso deve ser visto como investimento e como todo investimento existe um retorno. Para que o retorno seja positivo a manutenção, a operação e a engenharia com enfoque na confiabilidade trabalhem integradas para definir e manter as funções requeridas. Portanto se o enfoque da manutenção é baseado na confiabilidade e existe uma integração entre os demais setores é possível uma discussão multidisciplinar para definir as falhas das funções requeridas sob diversos ângulos.

Quando um item deixa de executar a função requerida significa que ocorreu uma falha. A falha pode ter inúmeras origens e o dever da manutenção é analisar a causa da falha e não somente reparar. Podemos classificar falhas de acordo com o nível de diminuição da capacidade que causou no item, conforme evolui no tempo ou ainda quanto à duração da falha.

A manutenção moderna tem ferramentas eficazes para aumentar a confiabilidade e analisar as falhas. Embora haja outros métodos os principais são: análise do modo e efeito de falhas – (FMEA), análise das causas raízes de falha – (RCFA) e análise da árvore de falhas – (FTA).

ISBN: 978-987-1676-63-7

5.1. Análise do Modo e Efeito de Falhas – (FMEA)

Failure Modes and Effect Analysis é o nome original para a sigla (FMEA) que traduzido para o português significa análise do modo e efeito de falhas. Este é um importante método da confiabilidade na manutenção.

Conforme Palady [11],"esta ferramenta tem um papel vital no desenvolvimento dos programas de qualidade e de confiabilidade das organizações, utilizada com frequência na análise de falhas e riscos, nas indústrias nucleares, espaciais, de processos químicos, de produção de bens de consumo e de serviços".

A FMEA pode ser considerada uma ferramenta de análise de projetos com o intuito de caracterizar os prováveis modos de falhas potenciais e estabelecer seus efeitos sobre o desempenho do sistema com base em raciocínio dedutivo (HELMAN; ANDEREY, 1995).

Segundo Cotnareanu [5] pode-se afirmar que: "a FMEA constitui-se em uma abordagem simples, sistemática e direta para a identificação das fontes básicas de falhas, sua causa e consequência, verificando os métodos existentes para a detecção ou o controle dessas falhas e definindo as ações corretivas necessárias para eliminar as causas ou reduzir seus efeitos".

A técnica do FMEA sistematiza o processo de concepção desenvolvido pelas equipes de engenharia no sentido de encontrar possíveis problemas e respectivas soluções, prioridades em função das hipóteses de falha, sua gravidade e probabilidade de ocorrência.

Para aplicar-se a análise FMEA em determinado processo, portanto, forma-se um grupo de trabalho que irá definir a função ou característica daquele processo, que irá relacionar todos os tipos de falhas que possam ocorrer descrever, para cada tipo de falha suas possíveis causas e efeitos, relacionar as medidas de detecção e prevenção de falhas que estão sendo ou já foi tomado e, para cada causa de falha, atribuir índices para avaliar os riscos e, por meio destes riscos, discutir medidas de melhoria.

Segundo Pinto e Xavier [13] "é fundamental a medida do risco de falha. Desse modo, quanto mais pessoas estiverem envolvidas na definição da taxa de risco, mais preciso será o resultado".

Estes autores orientam que o grupo deve adotar a seguinte sequência de trabalho: isolar e descrever o modo de falha potencial, respondendo a seguinte indagação: Sob que condições o equipamento falha?

a) Descrever o efeito potencial da falha, analisando as seguintes questões: ocorre parada ou redução de produção?

A qualidade do produto é afetada?

Quais os prejuízos?

b) Determinar a frequência e a gravidade da falha, verificando:

Qual a frequência de ocorrência da falha?

Qual o grau de gravidade da falha?

Para indicar a gravidade da falha, Pinto e Xavier (2001) sugerem uma escala de 1 a 10, sendo 10 para as falhas mais graves. Idem para a frequência.

ISBN: 978-987-1676-63-7

c) Determinar o Número da Prioridade do Risco – NPR -, que é o resultado do produto da frequência da falha pela gravidade da falha.

d) Desenvolver planos de ação para eliminar ou corrigir o problema potencial.

5.2. Análise das Causas Raízes de Falha – (RCFA)

Outra importante ferramenta de confiabilidade utilizada na gestão da manutenção é a Root Cause Failure Analysis (RCFA), que traduzida para o português significa Análise das Causas Raízes de Falhas.

Conforme Pinto e Xavier [13], este tipo de análise de falha costumava ser reservado para equipamentos mais importantes ou críticos. Atualmente, pelo potencial de ganho que este método apresenta na manutenção, recomenda-se seu uso mais generalizado, principalmente em problemas crônicos, que podem chegar a consumir até 50% do orçamento da manutenção, significando que custam muito mais do que falhas em equipamentos importantes.

Para Nagão [9], a metodologia da RCFA tem como objetivo identificar as causas-raizes da falha para tomar ações pró-ativas para eliminá-las. Este autor usa a figura de que não adianta cortar uma erva daninha somente por cima da terra e manter a sua raiz; é preciso eliminá-la pela raiz para evitar o seu aparecimento posterior. Esta figura nos lembra muitas vezes as ações corretivas que tomamos sem analisar em profundidade por que os sistemas falham. Trocar uma peça simplesmente pela manutenção corretiva não mudará o sistema em que atuamos, e provavelmente conviveremos eternamente com a falha, e nunca haverá uma mudança drástica de performance.

O processo de Análise das Causas-Raízes de Falha segue os passos.

Tabela 1. Passos para a metodologia RCFA de Pinto e Xavier (2001).

Principais Passos	Passo	Responsável
Análise do Modo e Efeito da Falha-FEMEA	1	Operação/MAnutenção
Preservação da informação da Falha	2	Manutenção
Organização de grupos de Análise	3	Gerencia e Manutenção
Análise	4	Grupo de Análise
Relatar as descorbetas	5	Grupo de Análise
Fazer as recomendações	6	Grupo de Análise
Acompanhar os resultados	7	Grupo de Análise

ISBN: 978-987-1676-63-7

Segundo Pinto e Xavier [13], a metodologia RCFA baseia-se no questionamento, ou seja, cada etapa analisada deve sempre responder a esta questão: Por quê? A técnica recomendada é que se faça tantas vezes a pergunta até que a questão não faça mais sentido.
Toda análise de RCFA deve ser documentada para servir de apoio à decisão de implementação de melhorias e modificações e servir de referência futura, seja para memória, seja para revisão da situação.

5.3. Análise da Árvore de Falhas – (FTA).

A Fault Tree Analysis – (FTA), traduzida para o português como Análise da Arvore de Falhas, é uma ferramenta que visa melhorar a confiabilidade de produtos e processos através da análise sistemática de possíveis falhas e orientar na adoção de medidas corretivas ou preventivas.

Conforme Helman e Anderey [6], o diagrama da árvore de falhas mostra o relacionamento entre os modos de falhas identificados no FMEA. O processo de construção da árvore tem início com a percepção ou previsão de uma falha, que, a seguir, é decomposta e detalhada até eventos mais simples. Partes dos eventos gerais na análise da árvore de falhas são desdobradas em eventos mais específicos. Helman e Anderey mostram um exemplo de diagrama FTA aplicado à uma falha em um motor de elétrico na Figura 2.

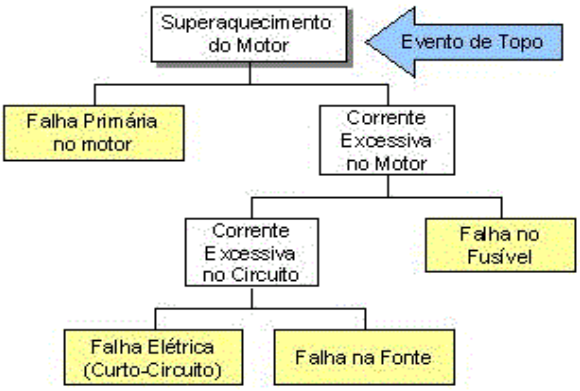


Figura 2 - Diagrama FTA para a falha em um motor elétrico.
Fonte : Helman e Anderey (1995).

Segundo Helman e Anderey [6] é possível adicionar ao diagrama elementos lógicos para melhor caracterizar os relacionamentos entre as falhas. Dessa forma é possível utilizar o diagrama para estimar a probabilidade de uma falha acontecer a partir de eventos mais específicos. A Figura (3) abaixo mostra uma árvore aplicada ao problema de superaquecimento em um motor elétrico, utilizando elementos lógicos.

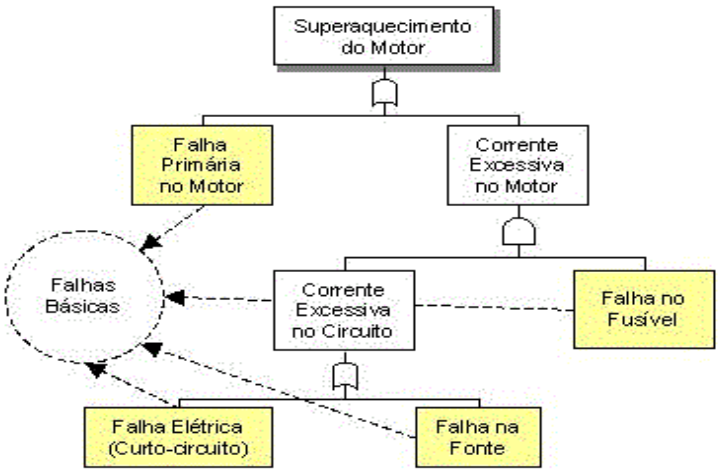


Figura 3 - Diagrama FTA para a falha em um motor elétrico utilizando elementos lógicos.
Fonte : Helman e Anderey (1995).

6. MANTENABILIDADE

Sobre o conceito a ser abordado existem no Brasil pelo menos três termos utililizados: Manutenabilidade, Manutenibilidade e Mantenabilidade. Para fins deste trabalho utilizar-se-á esta última nomenclatura.

Conforme Lafraia [8], mantenabilidade é a facilidade com que se efetuam reparos nos sistemas quando estes sofrem falhas.

A norma ABNT - NBR-5462 (2004) [2] define mantenabilidade como: “Probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é executada sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos”.

Para Alvarez [1], uma definição mais precisa de mantenabilidade deve incluir características de projeto, logística, preparo da mão-de-obra, custo, ergonomia, segurança e ecologia, pois este conceito influencia em vários fatores da manutenção, como; quantidade e necessidade de serviços, tempo médio de serviço, previsibilidade, disponibilidade e regularidade operacional, custo, eficácia e qualidade do serviço executado.

Para Souris [14], os fatores mais importantes para a organização alcançar um grau satisfatório de mantenabilidade são:

- Documentação técnica elaborada com base nas recomendações dos fabricantes;
- Bom gerenciamento do estoque de sobressalentes;
- Padronização dos componentes utilizados;
- Reprojeto e melhorias na fase do planejamento industrial.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Alvarez [1] acredita que a excelência da atividade manutenção acontecerá através da incorporação de performances de mantenabilidade no projeto de produtos e mais precisamente nos sistemas de manutenção, juntamente com a evolução tecnológica.

Para Pereira [6], os fatores que podem afetar a mantenabilidade são divididos em dois grandes temas; os fatores relacionados com a instalação e os fatores relacionados com o projeto. Este autor descreve ainda que os fatores relacionados com a instalação são; suporte logístico, especialidade, treinamento, experiência, supervisão de manutenção e tecnologia de manutenção, e que os fatores relacionados com o projeto são; acesso e configuração, reparabilidade, confiabilidade, substituibilidade, complexibilidade, visibilidade, intercambialidade e compatibilidade.

A tabela (2) descreve como deve ser a participação da manutenção na instalação de um sistema produtivo, visando à obtenção de alto grau de mantenabilidade.

Tabela 2. Participação da manutenção em novas instalações. Adaptado de Xavier (2002).

Fase	Modo de participações da manutenção
Projeto básico	Opinião
Concorrência	Informações sobre os equipamentos
Análise de Projeto	Parecer técnico
Projeto das instalações	Parecer técnico
Armazenamento	Orientação
Operação	Acompanhamento da rotina

7. CONCLUSÃO

Os novos desafios que se apresentam no mercado globalizado e cada vez mais competitivo deram origem a uma nova postura na gestão da manutenção, onde pensar e agir estrategicamente não são mais diferenciais e sim necessidades. A nova forma de gerir se alicerça em previsões futuras e busca sempre maior satisfação dos clientes.

A mantenabilidade se apresenta como fator indispensável na organização da manutenção, tendo maior destaque nas manutenções corretivas e preditivas, por estarem diretamente ligadas ao fator disponibilidade. Caso a organização da manutenção seja bem trabalhada no setor, os bancos de dados da manutenção podem ser substituídos pela predição dos parâmetros de manutenabilidade.

Assim como a mantenabilidade, a confiabilidade é um valor extremamente relevante na perspectiva da moderna manutenção e na visão de uma gestão inovadora. Ela exprime o ideal de garantia do cumprimento das funções estabelecidas pela manutenção e seus sistemas e mostra-se como um dos pilares da disponibilidade, podendo ser incrementada com a adoção de ações específicas para cada uma das etapas de ciclo das falhas, descrita graficamente pela curva da “banheira”.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Na organização da manutenção as mantenabilidade é um fator indispensável, a gestão da manutenção moderna não pode de dar ênfase neste fator se quiser ser sinônimo de inovação e qualidade.

8. REFERÊNCIAS

[1] Alvarez, O. E. Método para análise de características de projeto para mantenabilidade – Determinação de um índice de mantenabilidade em projeto de produtos / sistemas, Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

[2] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5462. Confiabilidade e Manutenibilidade. Brasil, 2004.

[3] Associação Brasileira de Manutenção (ABRAMAN). Documento Nacional: A Situação da Manutenção no Brasil. São Paulo: ABRAMAN, 2011.

[4] Branco, G. F. Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2000. p.284.

[5] Cotnareanu, T. Equipament FMEA – old tools new uses: a tool for preventive maintenance. Revista Quality Progress, [S.I.], v. 32, n. 12, p.48-52, dez. 1999

[6] Helman, Horácio, Anderey, Paulo Roberto Pereira. Análise de falhas (Aplicação dos métodos FMEA e FTA). Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. p.156.

[7] Kardec, A.; Lafraia, J.R. Gestão estratégica e confiabilidade. Rio de Janeiro. Editora Qualitymark/Abraman. 2002.

[8] Lafraia, J. R. Barusso. Manual de confiabilidade mantenabilidade e disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark / Petrobrás, 2001.

[9] Nagao, Sérgio K. Manutenção industrial – análise, diagnóstico e propostas de melhoria de performance em indústrias de processos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 14, 1999, Foz do Iguaçu/Rio de Janeiro 1999.

[10] Nunes, Laércio Enom. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC): Análise da Implantação em uma SIistematica de Manutenção Preventiva Consolidada. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

[11] Palady, P. FMEA – Análise dos modos de falhas e efeitos**:** provendo e prevenindo problemas antes que ocorram. São Paulo: IMAN, 1997.

[12] Pereira, G. H. A manutenção da produção. Dissertação (Mestrado em Gerência empresarial) – Universidade de Taubaté, 2000.

[13] Pinto, A K.; XAVIER, J. A. N. Manutenção função estratégica, Rio de Janeiro, Qualitymarck, 2001.

[14] Soures, J. Manutenção industrial: custo ou benefício. Lidel. Lisboa: Edições Técnicas, 1999

[15] Hatakeyama, Yoshio. A revolução dos gerentes. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE UN MÉTODO PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE POSIBLES FALLAS EN EL FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO MECÁNICO.

Abet Jorge [1], **Valdéz Andrés** [2] **y Carrizo Blanca** [3]

[1] Dpto. Ing. Mecánica / Ing. Industrial – Universidad Tecnológica Nacional – F.R.C.
Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja Argentina s/n. Córdoba, Argentina
Correo: jorgeabet@gmail.com
[2] Laboratório Nacional de Computação Científica-LNCC/MCTI. Brasil
[3] Dpto. Ing. Mecánica / Ing. Industrial / Ing. Sistemas – Universidad Tecnológica Nacional – F.R.C.

RESUMEN

La utilización de herramientas de diseño y cálculo de fiabilidad le han permitido al Ingeniero de Producto estimar los rangos de buen funcionamiento de un determinado producto cuando este está en su condición de servicio activo. Una vez superada la instancia de diseño, el producto luego de lanzado al mercado es recibido por parte del cliente quien se encarga de su puesta en marcha. Es en estas etapas venideras que la correcta Gestión del Mantenimiento Industrial; área de la ingeniería ya no vista como la actividad industrial de arreglar un dispositivo fallado y devolverle el estado de operativo, sino como la rama de la ingeniería que evalúa la distribución de recursos humanos y económicos para asegurar el contınuo buen funcionamiento del dispositivo adquirido. Asegurar esta continuidad en el buen funcionamiento en demasiadas ocasiones se ve permeada sobre la visión de Gestión de Mantenimiento que la Gerencia tiene sobre el área. En numerosas ocasiones se efectúan interrupciones programadas del servicio del dispositivo adquirido para realizarle inspecciones con fines de generar conclusiones sobre el estado operativo del dispositivo, estas paradas consecuentemente representan para la organización una inversión de esfuerzos y recursos económicos para lograr ese diagnóstico.
Este trabajo tiene como objetivo principal proponer un sistema de medición del funcionamiento de un dispositivo mecánico. El comportamiento de un sistema mecánico expuesto a excitaciones externas es un problema muy estudiado y utilizado a como complemento de la ingeniería inversa; la cual tiene una vasta experiencia fundamentada en la resolución de problemas. [1] [2]
Se pretende utilizar las herramientas, ya descritas por otros autores, para escribir un problema de optimización cuyo resultado devuelva un indicador absoluto y exacto referido al desempeño medido en tiempo real, sin tener que recurrir a paradas de servicio.

Palabras Claves: Mecánica de vibraciones, Ingeniería Inversa, Optimización

Área Temática: Mecatrónica y Automatización

1. Introducción

Este trabajo sugiere una metodología de identificación de patrones de daño a través de la caracterización de los coeficientes constitutivos de un dispositivo mecánico.
La metodología propuesta está basada en argumentos puramente variacionales, axiomatizando toda ecuación escrita como casos particulares del Principio de Balance de Potencias Virtuales.
Una vez identificado los coeficientes el daño se caracteriza como un post proceso que está a criterio del usuario encargado.
Este trabajo, está dividido en secciones, las cuales se ordenaron del siguiente modo:

- La Sección 2 presenta una metodología axiomática para la construcción de modelos variacionales aplicados a dinámica de sistemas mecánicos.
- La Sección 3 presenta la construcción de un problema de optimización, cuya función costo devuelve las características constitutivas del dispositivo mecánico estudiado. La pertinencia de esta función costo a ser optimizada, está reflejada en los comentarios presentados en la Sección 4.

2. Formulación Matemática del problema a resolver

El modelo mecánico más elemental es aquel en que con una sola coordenada se describe toda la cinemática. De este modo un modelo unidimensional es lo que se emplea en la práctica para describir cómo se comporta un cuerpo puntualizado frente a diferentes acciones de movimiento.
Siendo la descripción cinemática la base de este estudio es que se define el conjunto de configuraciones admisibles como:

$$Kin\mathcal{U} = \{\theta \in \mathcal{U} + Condiciones\ iniciales\}; \qquad (1)$$

Donde:
$\mathcal{U}$ es un espacio de Hilbert que sirve para caracterizar la regularidad de los vectores **u** Ɛ *Kin*$\mathcal{U}$.
A seguir se define el espacio vectorial de todas las variaciones admisibles, comunmente llamadas *acciones de movimiento*, mediante:

$$Var\mathcal{U} = \{\theta_1 - \theta_2 \in Var\mathcal{U} : \theta_1, \theta_2 \in Kin\mathcal{U}\}, \qquad (2)$$

por definición el espacio vectorial de todas las posibles acciones de movimientos es obtenido como la resta de cualquier elemento perteneciente a la variedad linear de configuraciones admisibles. Además de la caracterización de la cinemática, el detalle de la potencia expedida, o consumida, sirve para esclarecer cómo se han llevado a cabo las acciones de movimientos, antes mencionadas y definidas. En este marco se distinguen dos tipos de potencias a saber: [3]

2.1. Potencia Interna.

Es aquella que mide la potencia puesta en juego cuando se realizan cambios en la geometría, forma del cuerpo. Siendo el modelo de estudio un modelo unidimensional, las tasas de deformación se ven colapsadas a la derivada espacial, del campo cinemático.
Con lo que se define el siguiente operador lineal sobre todo vector $\mathcal{U}$ Ɛ *Kin*$\mathcal{U}$:

$$\mathbb{D}(\mathbf{u}) = \frac{d\,\mathbf{u}}{dx}, \qquad (3)$$

mediante un producto de dualidades, es que se define la potencia interna como:

$$P_i = -\langle \mathbb{D}(\mathbf{u}), \mathbb{T} \rangle_{\mathcal{W} \times \mathcal{W}^* \to \mathbb{R}}. \qquad (4)$$

Donde:
El espacio $\mathcal{W}^*$ es el dual del espacio $\mathcal{W}$.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Este espacio definido en la Ecuación 3 está compuesto por tensores de segundo orden donde residen los gradientes unidimensionales.
En la expresión anterior, T debe ser entendido como un tensor de tensiones que tiene alguna ley constitutiva, dada por:

$$\mathbb{T}(\mathbf{u}) = \varphi(\mathbf{u}, \mathbb{D}(\mathbf{u}))$$

2.2. Potencia Externa.
Es aquella que mide la potencia utilizada para desarrollar cambios en la velocidad y posición del sistema.
El sistema de esfuerzos externos, compatibles con la cinemática del modelo, son caracterizados por un funcional lineal sobre todo elemento de ϒ,

$$P_e : \mathcal{U} \times \mathcal{U}^* \to \mathbb{R}.$$

Al igual que con la potencia interna un producto de dualidades está presente, en la definición de la potencia externa, en particular esta tiene representación única de acuerdo al Teorema de Representación de Riesgo, como se muestra a continuación:

$$P_e = \langle \mathbf{f}, \mathbf{u} \rangle \qquad \textbf{(5)}$$

Es en este momento que todos los elementos están disponibles para escribir el principio axiomático fundamental que será utilizado en este trabajo.

Axioma 1 (Principio de Balance de Potencias Virtuales).
Dado un sistema Ω en estado de equilibrio respecto de una referencia inercial, es que en cualquier acción de movimiento, compatible con la cinemática del modelo, las potencias virtuales internas y externas se anularán.
En otras palabras se establece la condición de compatibilidad entre esfuerzos y acciones de movimientos, que derivarán en la siguiente expresión:

$$P_i + P_e = -\langle \mathbb{D}(\mathbf{v}), \mathbb{T} \rangle + \langle \mathbf{f}, \mathbf{v} \rangle = 0 \ \forall \ \mathbf{v} \in Var\mathcal{U}. \qquad \textbf{(6)}$$

Para utilizar el Principio de Balance de Potencias Virtuales, es necesario recaer en el siguiente hecho pocas veces mencionado, el concepto de equilibrio se ha definido como una condición presente o actual, luego la configuración y referencia es espacial.
Al haber establecido esta condición es que se escribe satisfactoriamente para el sistema de la Figura 1 el balance de potencias,

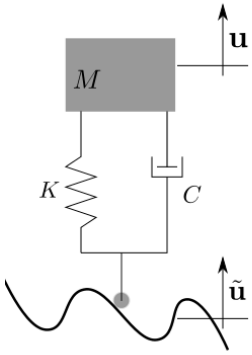


Figura 1: Esquema cinemático estudiado.

$$\mathcal{L}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, t) = \frac{1}{2}\left(M\dot{\mathbf{u}}^2 - K\mathbf{u}^2\right). \quad \textbf{(7)}$$

Aquel campo cinemático **u** solución se corresponde con la solución del siguiente problema variacional,

Problema 2.
Encuentre **u** *definido sobre el espacio Kin* $\mathfrak{U}$*, tal que el siguiente funcional Lagrangiano sea estacionario,*

$$\mathcal{L}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, t) = \frac{1}{2}\left(M\dot{\mathbf{u}}^2 - K\mathbf{u}^2\right).$$

El procedimiento para encontrar la solución es definir bajo qué condiciones existe la solución, y luego definir las condiciones de unicidad, para ello el cálculo variacional está presente en términos de la primera variación de Gateaux, como sigue:

$$\begin{aligned} \delta\mathcal{L}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, t), (\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}, t) \quad &= 0 \;\forall\, \mathbf{v} \in Var\mathcal{U} \\ M\dot{\mathbf{u}}\cdot\dot{\mathbf{v}} - K\,\mathbf{u}\cdot\mathbf{v} &= 0 \;\forall\, \mathbf{v} \in Var\mathcal{U}. \end{aligned} \quad \textbf{(8)}$$

La unicidad de la solución encontrada con la Ecuación 8, está supeditada a la convexidad del funcional Lagrangiano, luego para verificar la convexidad del mismo se evalúa el signo de la segunda variación en términos de Gateaux.

$$\begin{aligned} \delta^2\mathcal{L}(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, t), (\mathbf{v}, \dot{\mathbf{v}}, t) \quad &> 0 \;\forall\, \mathbf{v} \in Var\mathcal{U} \\ M\dot{\mathbf{v}}^2 - K\,\mathbf{v}^2 &> 0 \;\forall\, \mathbf{v} \in Var\mathcal{U}. \end{aligned} \quad \textbf{(9)}$$

Ante la posible aparición de términos de productos de dualidades genéricos, no contemplados en la definición de Ecuación 7 es que adicionar un término general es factible cuando la Ecuación variacional 8 se reescribe como:

$$M\dot{\mathbf{u}}\cdot\dot{\mathbf{v}} - K\,\mathbf{u}\cdot\mathbf{v} - \mathbf{f}\cdot\mathbf{v} = 0 \;\forall\, \mathbf{v} \in Var\mathcal{U}. \quad \textbf{(10)}$$

En particular cuando: $\mathbf{f} = C\dot{\mathbf{u}}$, se está trabajando con un sistema que tiene incorporada la disipación viscosa.
Otro ejemplo de una dualidad no tomada en cuenta es un forzador externo, dado por **f** = **f**(*t*).
Es fácil ver que la solución no solo no está garantida para cualquier relación de coeficientes *M, C, K, f*, sino que además su unicidad tampoco está garantizada.
Este hecho es de utilidad a la hora de caracterizar los coeficientes en función de otros ya conocidos.
Las correspondientes ecuaciones de *Euler-Legrange* se obtienen mediante el procedimiento descrito en Landau and Lifshitz [1976], en efecto se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} M\ddot{\mathbf{u}} - K\,\mathbf{u} - C\,\dot{\mathbf{u}} - \mathbf{f}(t) &= 0 \\ \mathbf{u}(0) &= \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{u}(T) &= \mathbf{u}_T. \end{aligned} \quad \textbf{(11)}$$

De acuerdo a los resultados mostrados en las Ecuaciones 8 y 9, la existencia y unicidad de la solución **u** depende de los parámetros *M, C, K, f*, este análisis puede realizarse también observando las descomposición espectral del operador diferencial escrito en la Ecuación 11.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Utilizando el procedimiento descrito en Luenberger [1979], se observa la naturaleza lineal del operador: $\mathcal{D}(\cdot) : Lin(\mathcal{U}, \mathcal{U})$ dado por:

$$M(\ddot{\cdot}) - K(\cdot) - C(\dot{\cdot}) = \mathcal{D}(\cdot) \qquad \textbf{(12)}$$

La estabilidad del operador diferencial D está asegurada cuando su radio espectral está acotado por uno.
En particular, el polinomio característico de este operador es el siguiente:

$$M\lambda^2 - C\lambda - K = 0$$
$$\lambda_1 = \frac{C}{2M} + \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \frac{K}{M}}$$
$$\lambda_2 = \frac{C}{2M} - \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - \frac{K}{M}}. \qquad \textbf{(13)}$$

A fin de evaluar la estabilidad del sistema representado en el operador diferencial D, es que se muestran los siguientes resultados:

$$\rho(\mathcal{D}) = Max\{\lambda_1; \lambda_2\} \leq 1.0$$

3. Mecánica Inversa
Habiendo caracterizado los esfuerzos que son compatibles con la cinemática del modelo descripto en la Sección 2, se procede a escribir un problema inverso, basado en el siguiente contexto de optimización. [4]

Problema 3.
Dada una lectura ˜u *sobre alguna frontera del dominio del sistema modelado, se desea minimizar el siguiente funcional convexo,*

$$\mathcal{J}(\mathbf{u}, \tilde{\mathbf{u}}) = \|\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}\|^2,$$

siendo ll·ll la norma inducida por producto interno euclidiano, donde **u** es la solución del siguiente problema de valores iniciales:

$$M\ddot{\mathbf{u}} - K\mathbf{u} - C\dot{\mathbf{u}} - \mathbf{f}(t) = 0$$
$$\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0$$
$$\mathbf{u}(T) = \mathbf{u}_T.$$

El problema antes escrito tiene en particular vinculado a sí mismo, características que lo definen como *Mal condicionado*. Este mal condicionamiento se debe principalmente al no cumplimiento de las siguientes razones:
Para toda referencia admisible, existe una única solución posible, La dependencia de la solución debe ser continua con la referencia. No estando garantida siempre la existencia y unicidad de la solución del problema de valores iniciales representado en la Ecuación 11, es que se cae en esta condición.
Para solucionar numéricamente esta situación es que se debe regularizar este problema, de acuerdo a Engl et al. [1996], el procedimiento conocido como *Regularización de Tikhonov Phillips*, establece que la solución al problema inverso antes escrito se encuentra mediante la minimización, del siguiente funcional:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$\mathcal{J}^*(\mathbf{u}, \tilde{\mathbf{u}}, \gamma) = \|\mathbf{u} - \tilde{\mathbf{u}}\|^2 + \gamma \|\mathbf{u}\|^2, \qquad \textbf{(14)}$$

3.1. Desafío tecnológico

De acuerdo a la definición de las lecturas ú, estas surgen cuando mediante sensores, celdas de cargas, en fin algún dispositivo tecnológico que registre desplazamientos como el que se muestra en la Figura 2.

En particular el campo solución u puede simularse o bien medirse con un dispositivo equivalente al utilizado para efectuar las lecturas y registros de ú.

En efecto cuando se dispongan de estas dos informaciones, es que se podrán caracterizar los valores de *M, C, K, f* y verificar que la relación entre ellos sea la óptima, caso contrario, habrán de definirse criterios de fallas.

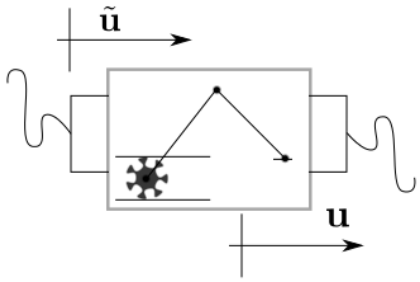


Figura 2: Esquema cinemático estudiado.

- Cuando se registren las diferencias de desplazamientos, y se verifique que $K < K^0$, siendo K^0 la rigidez inicial del conjunto mecánico, se llegará a la conclusión de admitir una pérdida de rigidez, esta pérdida de rigidez puede ser una señal de daño.
- Cuando se registren las diferencias de desplazamientos, y se verifique que $M < M_0$, siendo M_0 la inercia (masa) inicial del conjunto mecánico, se llegará a la conclusión de admitir un deterioro del dispositivo, usualmente atribuido al desgaste,
- Otros criterios de fallas.

3.2. Ejemplos aplicados

Basándose en la formulación variacional descrita en el Problema 3 y su correspondiente regularización mostrada en la Ecuación 14, es que se propone un ejemplo numérico de carácter académico para mostrar el desempeño del método propuesto para identificar los nuevos parámetros constitutivos. [5]

Escribiendo la solución de la Ecuación de movimiento, en términos de los autovalores mostrados en la Ecuación 13, es que la siguiente equivalencia es válida:

$$\mathbf{u} = \alpha_1 \exp(\lambda_1 t) + \alpha_2 \exp(\lambda_2 t), \qquad \textbf{(15)}$$

donde los coeficientes: α_1 y α_2 son constantes a determinar para obtener soluciones particulares.

En contraposición, cabe destacar que la lectura de referencia; ya sea por lectura *in-situ*, como conocida su ley de variación temporal es de carácter general.

En particular se considerará el siguiente ejemplo, mostrado a continuación:

$$\tilde{\mathbf{u}}, = A_0 + A_t. \qquad \textbf{(16)}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

El funcional a ser minimizado, escrito en la Ecuación 14 tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\mathcal{J}^*(\mathbf{u},\tilde{\mathbf{u}},\gamma) &= \|\alpha_1 \exp(\lambda_1 t)+\alpha_2 \exp(\lambda_2 t)-A_0+A t\|^2+\gamma\,\|\alpha_1 \exp(\lambda_1 t)+\alpha_2 \exp(\lambda_2 t)\|^2 \\ &= A_0^2+A_0\,(2A t-2\alpha_2 \exp(\lambda_2 t)-2\alpha \exp(\lambda_1 t))+(tA)^2 \\ &+(\gamma+1)\left(\alpha_1\alpha_2 \exp(\lambda_1 t+\lambda_2 t)+\alpha_1^2 \exp(2\lambda_1 t)+\alpha_2^2 \exp(2\lambda_2 t)\right). \end{aligned} \quad \textbf{(17)}$$

Pudiendo escribir el funcional de la Ecuación 14 en su forma explícita, permitiría caracterizar la terna (*M,C,K*) que lo minimiza.
La metodología para buscar esa terna, está dada por la nula derivada de Gateaux, considerando variaciones admisibles como:

$$(\delta M,\delta C,\delta K)$$

$$\begin{aligned}&\delta\mathcal{J}[(M,C,K), \quad (\delta M,\delta C,\delta K)]=0 \\ &\forall\,(\delta M,\delta C,\delta K)\ \in\ (\mathbb{R},\mathbb{R},\mathbb{R})\end{aligned} \quad \textbf{(18)}$$

4. Conclusiones

Como consecuencia de la descripción cinemática presentada en este trabajo, resultó ser posible caracterizar una función con soporte en acciones de movimientos, e imagen escalar, como lo es la potencia.
Al haber utilizado el Principio de Balance de Potencias Virtuales, como principio fundamental es que la determinación de esfuerzos compatibles con la cinemática del modelo se llevó a cabo.
La identificación de parámetros constitutivos se llevó a cabo utilizando una técnica clásica descrita en el trabajo de Engl et al. [1996] escribiendo un funcional convexo, con lo que la existencia y unicidad de solución está siempre garantizada.
Debido a la naturaleza del problema se define la precisión del método como una medida dada por, es importante remarcar que cuando el ´orden de error es Nulo, tiene que ser cero, situación conflictiva desde el punto de vista del buen postulado del problema. Ajustando a valores pequeños es que se resuelve el problema.
En lo que respecta a la aplicación al mantenimiento industrial, esta técnica permite identificar umbrales de desempeño de un determinado sistema mecánico. La continua lectura de desplazamientos, es aún un desafío a ser resuelto.
La naturaleza de una lectura no debe interferir en las conclusiones de estabilidad y consistencia del método.
En la actualidad la lectura de desplazamientos se lleva a cabo mediante celdas de cargas que traducen desplazamientos a diferencias de potencial, como lo sería un *Strain-gage´s*.
Estos dispositivos a diferencia de medir desplazamientos miden deformaciones y a esas deformaciones las procesan para mostrar desplazamientos.
El método de strain gage's está basado en una cinemática más exigente dado que una deformación es una medida de desplazamiento respecto una medida de distancia, común gradiente.
En el trabajo que se ha presentado, la cinemática no exige regularidad alguna respecto las dimensiones espaciales, lo cual representa un aporte considerable.

Referencias

[1] L Meirovitch and Rg Parker. Fundamentals of Vibrations, 2001.
[2] H. W. Engl, M. Hanke, and A. Neubauer. Regularization of inverse problems, Vol. 375 of Mathematics and its Applications. Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, 1996.
[3] Dordrecht, 1996. ISBN 0-7923-4157-0. doi: 10.1007/978-94-009-1740-8. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-94-009-1740-8.
[4] L.D. Landau and E.M. Lifshitz. *Mechanics*. Butterworth Heinemann. Butterworth-Heinemann, 1976. ISBN 9780750628969. URL http://books.google.com.br/books?id=e-xASAehg1sC.
[5] D.G. Luenberger. *Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications*. Wiley, 1979. ISBN 9780471025948. URL https://books.google.ie/books?id=mvlQAAAAMAAJ.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DE REMOLHAMENTO EM CIRCUITO EXPERIMENTAL REPRESENTATIVO DOS CANAIS DE REFRIGERAÇÃO DO NÚCLEO DE REATORES PWR

Sabrina P. Alves, Amir Z. Mesquita, Hugo C. Rezende, Marcelo A. Veloso e Maritza R. Gual

Serviço de Tecnologia de Reatores – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN)
Campus da UFMG - Pampulha, Belo Horizonte, Brasil
sabrinapral@gmail.com; amir@cdtn.br; hcr@cdtn.br; velosom@cdtn.br; maritzargual@gmail.com

RESUMO

Um processo de fundamental importância na ocorrência de um acidente com perda de líquido refrigerante LOCA (*Loss Coolant Acident*), em reatores nucleares refrigerados a água pressurizada (PWR) é a reinundação do núcleo ou o remolhamento dos combustíveis nucleares. Na ocorrência de um LOCA é necessário evitar que a temperatura do núcleo do reator atinja níveis inaceitáveis e restaurar o processo de resfriamento do mesmo, restabelecendo a remoção de calor adequada e o contato entre o líquido e a superfície aquecida.

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN, instituição de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN/Brasil) vem desenvolvendo desde a década de 70 programas para permitir que o Brasil possa se tornar independente no campo da análise de segurança de reatores. Com esse intuito, nos anos 80 foi projetada, montada e comissionada uma Instalação de Testes de Remolhamento, no Laboratório de Termo-hidráulica deste Centro. Esta instalação tem por objetivo investigar os fenômenos termo-hidráulicos envolvidos na fase de reinundação de um Acidente de Perda de Refrigerante em um reator nuclear PWR. Como seqüência a este trabalho, sentiu-se a necessidade de se desenvolver um código termo-hidráulico que derivasse de uma análise teórica consistente e fosse capaz de simular as condições de testes da instalação.

Este trabalho tem por objetivo dar continuidade ao estudo do fenômeno de da remolhamento utilizando os resultados da Instalação de Testes de Remolhamento. Para isso, é feita uma análise dos modelos físicos e matemáticos que regem o fenômeno, bem como o desenvolvimento de um código termo-hidráulico de simulação de um circuito experimental representativo dos canais de refrigeração do núcleo de reatores *PWR.*

Palavras Chaves: *Reinundação, remolhamento, reatores nucleares, termo-hidráulica, refrigerante.*

1. INTRODUÇÃO

A segurança das centrais nucleares é determinada em função de sua proteção contra as conseqüências que podem ser causadas por acidentes postulados. Um dos acidentes mais importantes é a perda de refrigerante no núcleo (*Loss of Coolant Accident – LOCA*) [1]. Na ocorrência deste acidente, mesmo após o reator ser desligado, é necessário manter a circulação do refrigerante, para a retirada do calor residual (cerca de 7% do calor produzido com o reator em operação) dos elementos combustíveis [2].

Caso o núcleo não seja devidamente resfriado, as barras de combustível correm o risco de fundirem, perfurarem o vaso do reator, a contenção e liberarem produtos de fissão para o ambiente externo à central. Fora da usina, os produtos liberados contaminariam a área próxima e as conseqüências biológicas causadas seriam muito grandes. Este tipo de evento tem recebido bastante destaque na imprensa nos últimos anos devido ao acidente ocorrido nos reatores da central de Fukushima, no Japão [3].

Durante as décadas de 70 e 80 foram desenvolvidos diversos trabalhos para a descrição e análise do processo de Reinundação e Remolhamento do combustível nuclear na ocorrência de um LOCA. Durante este período foi projetada, montada e comissionada no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN uma Instalação de Testes de Remolhamento que tinha por objetivo investigar os fenômenos termo-hidráulicos envolvidos na fase de reinundação de um LOCA [4]. O CDTN é uma instituição de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN/Brasil). Para complementar o processo de comissionamento da Instalação de Testes de remolhamento, confrontou-se os resultados obtidos em dois testes típicos com os resultados previstos pelo código Hydroflut (código alemão de simulação do fenómeno de remolhamento, desenvolvido pela empresa alemã *Kraftwerk Union*, KWU).

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um código termo-hidráulico, denominado REWET, que permitiu a simulação do fenômeno de remolhamento em um circuito experimental representativo dos canais de refrigeração do núcleo de reatores *PWR.*

Como objetivos secundários deste trabalho, pode-se citar:

A análise dos modelos físicos e matemáticos que regem o fenômeno de remolhamento. Bem como o estudo e a resolução da equação do balanço térmico aplicado a um tubo eletricamente aquecido.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A análise da evolução da temperatura de parede da seção de testes simulada no código REWET, em comparação com os resultados da Instalação de Testes de Remolhamento.

Análise da evolução da frente de remolhamento simulada pelo código REWET e obtida experimentalmente.

2. METODOLOGIA

2.1. A Instalação Experimental

A Instalação de Testes de Remolhamento (ITR) montada no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN permite que seja realizada a investigação dos fenômenos termo-hidráulicos envolvidos na fase de reinundação de um Acidente de Perda de Refrigerante. Através da utilização da mesma é possível realizar testes variando-se a temperatura inicial de parede da seção de testes, a temperatura e velocidade da água de refrigeração injetada, o fluxo de calor dissipado e a pressão do sistema. A Figura 1 mostra um diagrama da Instalação de Testes de Remolhamento.

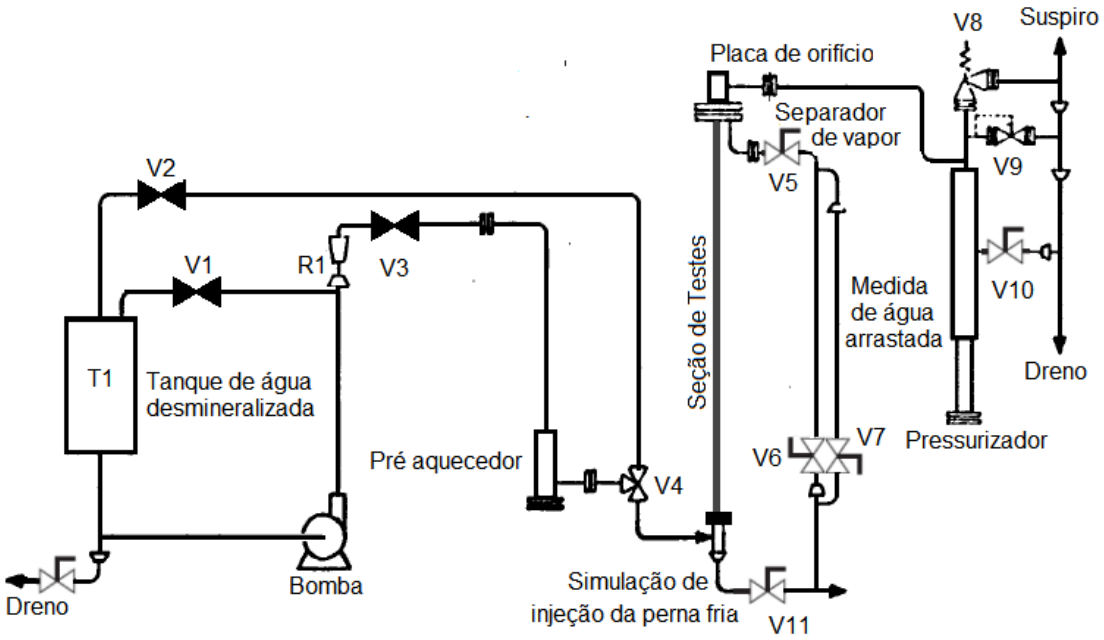


Figura 1: Fluxograma da Instalação de Testes de Remolhamento

A seção de testes nesta instalação é aquecida por efeito Joule, utilizando-se o próprio elemento combustível como resistência de aquecimento. Dez termopares tipo K (cromel-alumel) de 1,5mm de diâmetro, com isolação mineral e revestimento de aço inoxidável, medem a temperatura de parede ao longo da seção de testes. A Figura 2 mostra a distribuição longitudinal desses

ISBN: 978-987-1676-63-7

termopares. Cada termopar está defasado radialmente de 60° do termopar anterior, de maneira a obter-se uma distribuição em espiral dos mesmos.

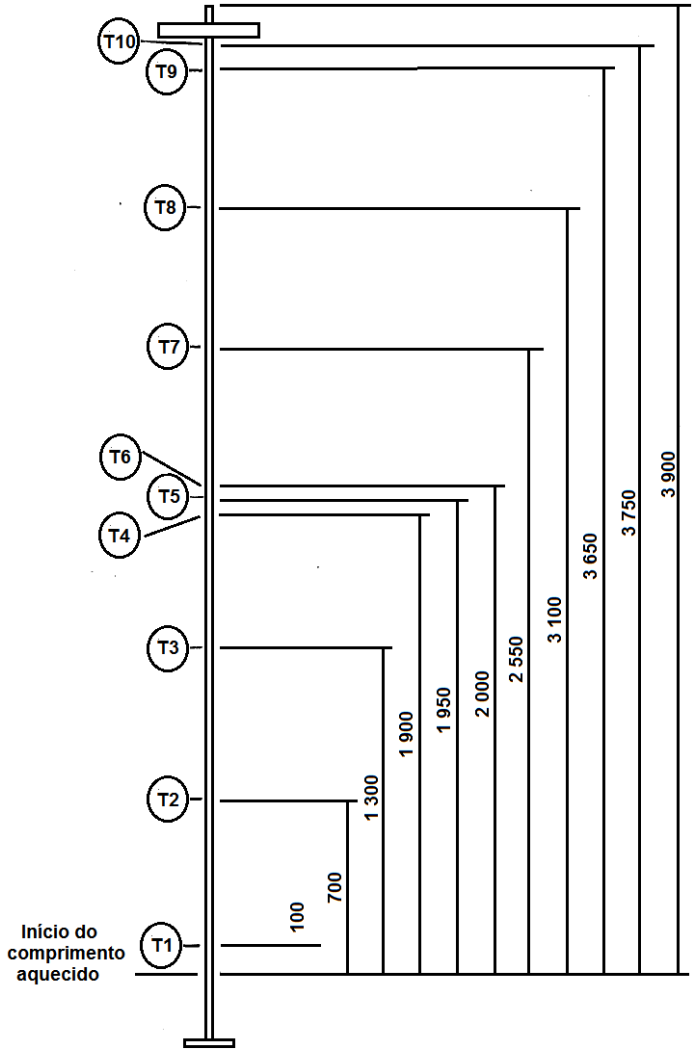


Figura 2: Cotas dos termopares de parede ao longo da seção de testes em [mm]

2.2. Modelo Analítico

Foi importante definir a base física e matemática que seria utilizada para o desenvolvimento do software. Decidiu-se utilizar como exemplo o código Hidroflut, desenvolvido pela Kraftwerk Union (KWU), um código também usado para a simulação do fenômeno de remolhamento em geometrias tubulares e anulares.

Durante o comissionamento da Instalação de Testes de Remolhamento o Hydroflut foi utilizado para prever os possíveis resultados da instalação. Assim foi possível comparar no processo final

do trabalho os resultados previstos pelo código Hydroflut, o código REWET e os resultados experimentais.

O código REWET tem por função de descrever e avaliar o fenômeno de remolhamento todo o comprimento aquecido, de forma temporal. Analisando a variação das temperaturas de parede e a propagação da frente de molhamento.

2.3 O Modelo Físico

O modelo físico de remolhamento foi interpretado a partir das seguintes condições simplificativas:

a) A temperatura de parede deveria estar inicialmente na faixa de 300ºC a 700ºC. O limite máximo é considerado levando-se em consideração as condições extremas dadas pelas propriedades físicas do tubo e da limitação da solda dos termopares á seção de testes da ITR.
b) A vazão de água na entrada do experimento deveria ser constante.
c) A potência elétrica dissipada na seção de testes deveria permanecer constante durante todo o experimento.

Considerando o processo de transferência de calor em uma cota média da seção de testes aquecida, após o líquido sub-resfriado ter sido injetado na base, nenhum resfriamento significativo é observado até que a frente de têmpera atinja o local. Neste espaço de tempo a seção de testes está completamente seca. O primeiro modo de transferência de calor considerado ocorre por convecção monofásica no vapor. À medida que a frente de inundação avança começaria a ocorrer uma sucessão de regimes de transferência de calor ao longo da seção como mostrado na Figura 3. Considera-se que cada zona de escoamento possui um regime de transferência de calor.

Para o cálculo da temperatura de parede nas cotas da seção de testes a equação do balanço térmico de energia precisou ser resolvida. E o modelo matemático usado para o entendimento do fenômeno de remolhamento se deduziu a partir deste balanço térmico de energia em regime transitório.

A primeira simplificação feita foi na geometria do sistema. O sistema inicialmente cilíndrico foi considerado como uma placa plana, com uma largura de $2\pi R$. Ou seja, o cilindro é estendido após um corte ao longo de sua generatriz. A face externa do cilindro foi considerada isolada e a face interna em contato com o líquido refrigerante.

ISBN: 978-987-1676-63-7

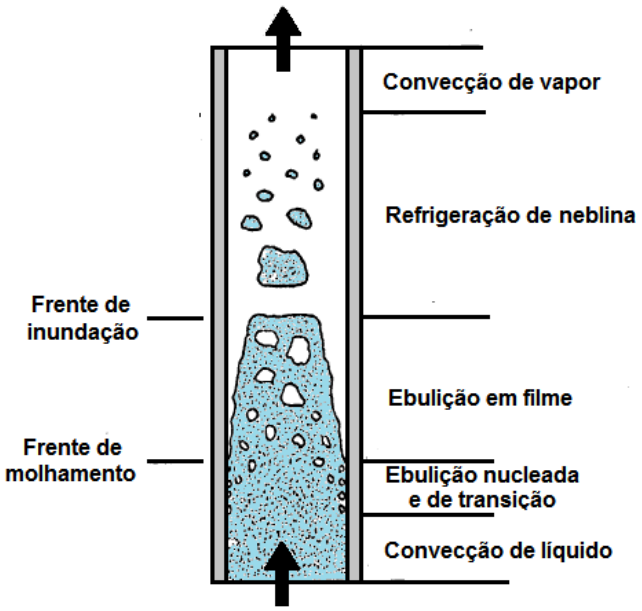


Figura 3: Formas de escoamento e regiões de transmissão de calor no processo de inundação tipo A. Adaptado de Cuevas (1981) [7]

A Equação 1 mostra a equação do balanço térmico encontrada

$$-K\frac{dT}{dz}Edy + q_g Edydz = -K\frac{dT}{dz}Edy + \frac{d^2T}{dz^2}Edydz + h(T - T_{sat})dydz + \rho C\frac{dT}{dt}Edydz \quad (1)$$

Em que simplificando;

$$T'' + \gamma^* T' - \frac{h\gamma^2}{KE}T = -\left(\frac{h\gamma^2 T_{sat}}{KE} + \frac{q_g\gamma^2}{K}\right) \quad (2)$$

)A Equação 2 é uma equação reconhecida como Equação Diferencial do Segundo Grau não Homogenia Normal com Coeficientes Constantes [5]. Para a solução da equação do balanço de energia fio necessário realizar a seguinte mudança de variáveis:

$$z = Z + ut \quad (3)$$

Em que z é o comprimento da cota considerada e Z é a distância à frente de têmpera como pode ser observado na Figura 4a. A regiões também foram subdividas e as temperaturas de contorno para cada nova região foram estabelecidas conforme mostrado da Figura 4b.

ISBN: 978-987-1676-63-7

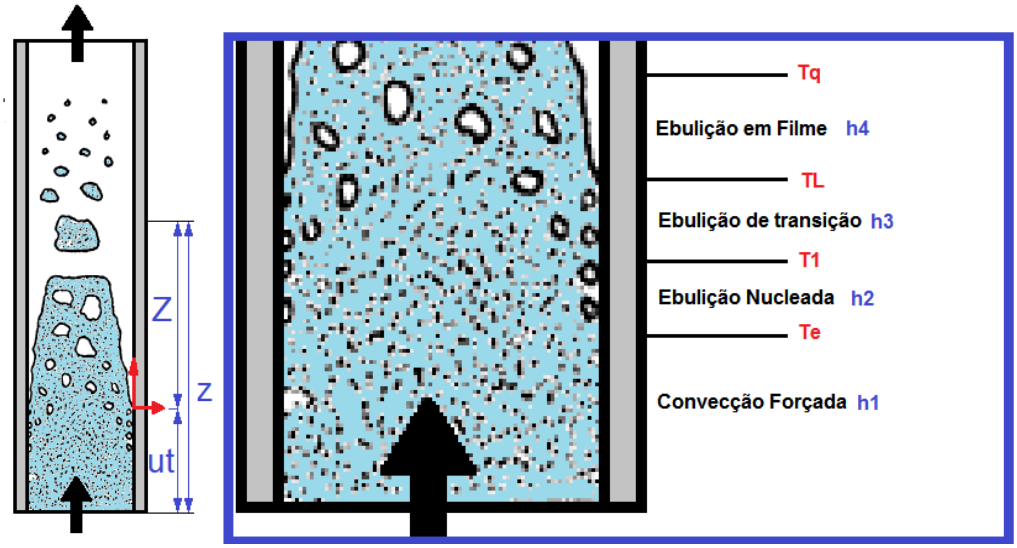


Figura 4: a) Novo sistema de referências adotado para a resolução da equação diferencial. b) Regiões adotadas para análise do modelo físico.

Para cada região foram encontradas as seguintes soluções:

Região molhada (Convecção Forçada e Ebulição Nucleada)

$$T = (T_1 - T_e)e^{m_1(1+Z)} + T_e \tag{4}$$

Região de Transição (Ebulição de Transição)

$$T = \frac{n_2(T_1 - T_{p2}) - m_1(T_1 - T_e)}{(n_2 - n_1)e^{-n_1}} e^{n_1 Z} + \frac{(T_1 - T_{p2})n_1 - m_1(T_1 - T_e)}{(n_2 - n_1)e^{-n_2}} e^{n_2 Z} + T_{p2} \tag{5}$$

Região seca (Ebulição em Filme, Refrigeração de Neblina e Convecção de Vapor)

$$T = (T_L - T_q)e^{w_1 Z} + T_q \tag{6}$$

É possível observar que as temperaturas de parede variam de acordo com Z e dependem também das temperaturas T_e, T_1, T_L e T_q. Por isso, foi necessário encontrar em estudos empíricos a base para o cálculo dessas temperaturas

2.4 Modelos empíricos

A Temperatura de parede à entrada da região de ebulição T_e foi encontrada a partir da equação de Fourier relacionada com as correlações de Jeans e Lottes [6] e pode ser escrita da seguinte forma:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$T_e = T_{sat} + 11{,}34 + e^{(-0{,}0158\,P)}\, q_i^{1/4} \tag{7}$$

Para o calculo da Temperatura de início da ebulição crítica, foi usada a equação sugerida por Kohler [9]:

$$T_1 = T_{sat} + \frac{q_{Zuber}}{0{,}126\, e^{(0{,}0158\,P)}\, q_i^{3/4} (1-\varepsilon)^{2/3}} \tag{8}$$

Para o cálculo da Temperatura de Leindefrost (T_L) também foi utilizada a equação de Kohler para este caso [9]:

$$T_L = T_{sat} + 160 + 10\Delta T_{sub} \tag{9}$$

A Temperatura da região de ebulição em filme (T_q) foi encontrada de forma análoga à definição de T_e. Assim;

$$T_q = T_{sat} + \frac{\left(\frac{K_V}{E} + h_{rad}\right)(T_V - T_{sat})}{CK\sqrt[3]{\frac{\rho\beta_{Fl}(T_V - T_{Fl})}{\gamma^2}}} \tag{10}$$

Dos trabalhos de Duffey, Porthouse e Yamanouchi [8,9] foi usada a equação para a evolução da frente de molhamento:

$$u = \frac{1}{\rho c}\sqrt{\frac{hK}{E}} \times \frac{T_L - T_{sat}}{(T_q - T_L)^{1/2} \times (T_q - T_{sat})^{1/2}} \tag{11}$$

2.5 Programa Computacional

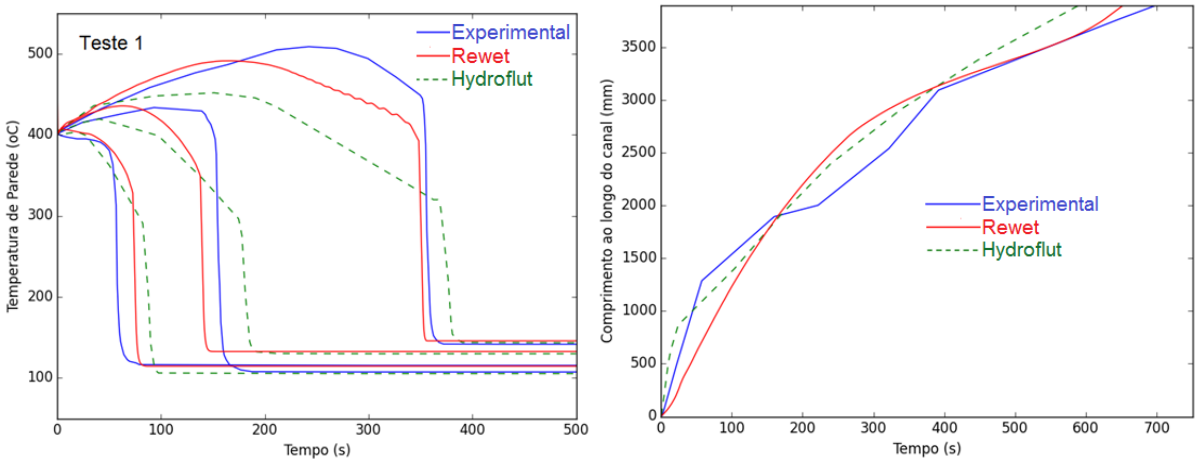
A linguagem de programação escolhida para a escrita do código REWET foi a linguagem Python, um *software* livre e dinâmico, com uma sintaxe simples e clara, frequentemente associado com grandes ganhos de produtividade e com a produção de programas de alta qualidade e de fácil manutenção [10]. Além disso, nos últimos anos as linguagens de código aberto como Python têm obtido apoio nas empresas e se estabelecido em organizações como Google, Yahoo e NASA, dentre outras que utilizam amplamente a arquitetura de *softwares* livres.

3. RESULTADOS

Após a elaboração do código Rewet, os resultados encontrados foram confrontados com os dados experimentais obtidos na Instalação de Testes de Remolhamento do Laboratório de Termo hidráulica do CDTN juntamente com os resultados do código Hydroflut.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A Figura 5a apresenta a comparação das temperaturas de parede do tubo durante o processo de remolhamento para o Teste 1



a) b)

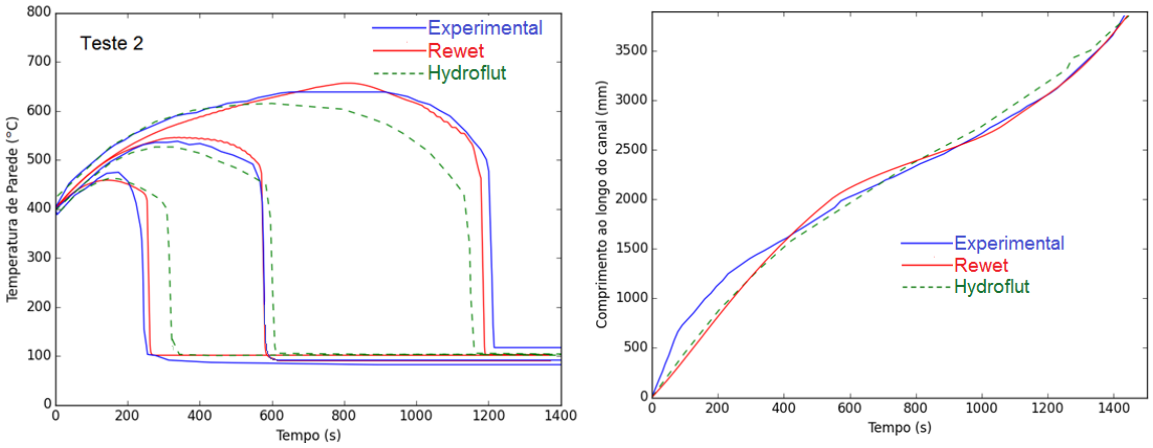
Figura 5. a) Evolução das temperaturas de parede para as cotas T3, T6 e T8. b) Evolução da frente de molhamento para o Teste 1.

A Figura 5b mostra a evolução da frente de remolhamento também para o Teste 1. Durante o processo, a frente de remolhamento se deslocou com velocidades distintas para os dois códigos. Entretanto, o valor do tempo final de remolhamento do tubo calculado pelo REWET se aproximou mais do valor experimental do que o resultado do Hydroflut. No período de 500 a 600 segundos os resultados praticamente se igualam.

A Figura 6a apresenta a evolução da temperatura de parede para o Teste 2. É possível observar que também para este caso, os resultados do código REWET se aproximaram mais dos resultados experimentais.

A Figura 6b mostra a evolução da frente de remolhamento para o Teste 2. Durante o processo, as frentes de remolhamento, medidas e calculadas, também se deslocaram com velocidades distintas. Entretanto, o valor do tempo final de remolhamento do tubo calculado pelo REWET foi idêntico ao resultado experimental. Apesar das diferenças, também no período de 900 a 1400 segundos os resultados experimentais e do código Rewet praticamente se igualaram.

ISBN: 978-987-1676-63-7



a) b)

Figura 6. a) Evolução das temperaturas de parede para as cotas T3, T6 e T8, teste 2. b) Evolução da frente de molhamento, Teste 2.

4. **CONCLUSÕES**

Através da realização deste trabalho foi possível simular o Fenômeno de Remolhamento em Circuito Experimental representativo dos canais de refrigeração do núcleo de reatores *PWR.*

Foi feito um estudo da resolução da equação diferencial do balaço de energia, aplicada a seção de testes, que se adequou às situações de contorno estabelecidas pela Instalação de Testes de Remolhamento e foram gerados resultados utilizando os mesmos dados de entrada usados no comissionamento da Instalação.

Comparando os gráficos de evolução da temperatura da frente de remolhamento obtidos de forma experimental, com o REWET e com o Hydroflut, para todos os casos, houve um maior ajuste aos valores experimentais dos resultados do código REWET em relação ao Hydroflut.

Para a evolução da frente de remolhamento inicialmente os valores calculados pelo Hydroflut se adéquam melhor aos valores experimentais. Entretanto, há momentos em que as curvas experimentais e calculadas pelo REWET praticamente se sobrepõem e o resultado final do tempo de remolhamento simulado no código REWET também se aproxima mais dos valores experimentais.

Para o Teste 1 o tempo final para o remolhamento se aproxima mais do valor experimental que o tempo final obtido pelo Hydroflut. Já para o Teste 2, os valores obtidos nos três casos são bem próximos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERÊNCIAS

[1] Todreias, N. E., Kazimi, M. E. *Nuclear Systems I. Termal Hydraulic Fundamentals.* Universidade de Michigan. EUA,1990.

[2] Bankoff, S. G., & Afgan, N. H. *Heat Transfer in Nuclear Reactor Safety.* New York: Mc Graw-Hil, 1982.

[3] Veiga, J. E. *Perspectiva Nuclear Pós-Fukushima*. Poítica Externa. Pags153-159. Brasil, 2011.

[4] Rezende, H. C. *Projeto, Montagem e Comissionamento de uma Instalação de Testes de Remolhamento*. CDTN. Brasil, 1985.

[5] Boyce, W. E., DiPrina, R. C. *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno.* LCT, 2010.

[6] Ladeira, L. C. *Regimes de Ebulição em Convecção Forçada*. UFMG CNEN. Brasil,1975.

[7] Cuevas, G. E. (1981). *Solução Analítica do modelo de remolhamento aplicado a uma barra seca superaquecida*. CDTN/CNEN. Brasil, 1981.

[8] Duffey, R. B., Porthouse, D. T. *Experiments on the Cooling of Hight Temperature Surface by Water Jets ando Props*. Garching bei Monchen/ German, 1972.

[9] Yamanouchi, A. Effects of Cors Spray Cooling at Stacionary State After Loss o Coolant Acident. Journal of Nuclear Science and Technology , 458-508, 1969.

[10] Coelho, F. C. *Computação Científica com Python.* Petrópolis. RJ. Brasil, 2007.

Agradecimentos

Os autores destacam o agradecimento as seguintes instituições brasileiras: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Eletrobras Eletronuclear.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

POYECTO DE SISTEMA HIDRÁULICO PARA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

Cantero, José[1]; Flores Menéndez, Manuel[2]; González, Facundo[3]; Tarnowski, Gabriel[4]

[1] Facultad de Ingeniería– Universidad Nacional de Misiones
Juan Manuel de Rosas 325 Oberá, Misiones, Argentina.

correo-e: *jose.modelacion@gmail.com*(1)

[2-3-4] Facultad de Ingeniería de Oberá, Universidad Nacional de Misiones.

RESUMEN

En este artículo se realiza un análisis de desempeño de un sistema hidráulico aplicado a una máquina universal de ensayos a partir de un modelo numérico de flujo de potencia hidráulica con el fin de analizar su funcionamiento en ensayos a fatiga. Se presenta a lo largo del trabajo los análisis de respuesta en frecuencia y análisis temporal del funcionamiento de ésta máquina, en función de los elementos hidráulicos y de control disponibles. Se describe de manera detallada cada uno de los componentes del sistema de manera individual y se realizan modelos con sus características y parámetros de funcionamiento: fluido de trabajo, unidad de potencia hidráulica, cilindro hidráulico, servo-válvula, acumuladores, probeta y sistema de control. Se planifica el modelaje del sistema del conjunto; partiendo del modelo para el análisis de la respuesta temporal y seguido el modelo para el análisis de la respuesta en frecuencia. Las simulaciones se realizan con un *software* para simulación y análisis de sistemas con dominios múltiples, donde se cuenta con herramientas de aplicaciones para las diversas ramas de la ingeniería y con dichas herramientas se pueden realizar abstracciones para modelar mediante hipótesis ingenieriles, adicionalmente se describen las variables de estado para cada modelo. La simulación con el modelo para obtener la respuesta temporal se realiza con el objeto de conocer el comportamiento del sistema ante la aplicación cargas variables en el tiempo a una probeta. Para el análisis en frecuencia se determinan los límites de operación del sistema a partir de la atenuación de la señal de salida en referencia con la de entrada. La importancia de éste trabajo radica en que sus resultados indican que es posible prever el máximo desempeño de una máquina para ensayos de fatiga de larga duración y determinar las condiciones limites de operación del sistema.

Palabras Claves: *Modelado de sistemas hidráulicos, flujo de potencia, simulación numérica ensayo de fatiga.*

Área Temática: Sistemas térmicos e Hidráulicos.

1. INTRODUCCIÓN

Una máquina de ensayo universal es un dispositivo utilizado para hallar características de materiales, estas se obtienen mediante diversos ensayos tales como: ensayo de tensión (tracción), de compresión y fatiga. Para los diferentes ensayos es necesario basarse en una reglamentación, por lo tanto en éste artículo se utilizan las normas ASTM E399. Se cuenta con una máquina que se encuentra ensamblada en su totalidad y emplazada en un laboratorio adjunto, donde lo que se busca es analizar su funcionamiento en el domino de la frecuencia. Por otra parte, se cuenta con datos acerca de los componentes que integran al sistema: Unidad hidráulica, actuador, servo-válvula, acumulador y sistema de control. Por consiguiente, con éstos datos de fabricantes y con cálculos se definen sub modelos en un software llamado AMESim. Este programa cuenta con una librería de elementos que se utilizan en varias ramas de la ingeniería: eléctrica, térmica, hidráulica, neumática, entre otras. Por lo tanto, el usuario realiza un modelo del sistema que pretende analizar basado en la relación de sub modelos definidos de manera gráfica pero, dentro de cada uno de ellos se encuentran las ecuaciones diferenciales que definen al funcionamiento físico del elemento.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OLEO-HIDRÁULICO

Unidad de potencia hidráulica: Es la fuente que aporta energía al fluido, el equipo (**MTS 506.00 SN 129)** básico consta de: bomba hidráulica de paletas, un reservorio, aceite hidráulico, un sistema de filtro en la succión, un motor eléctrico, un acoplamiento motor-sistema hidráulico, un indicador de presión, una válvula de alivio y cañerías internas para completar los circuitos de la unidad. El aceite hidráulico Mobil DTE25 es recomendado por el fabricante de la unidad hidráulica. Su procedencia es de origen mineral, tiene propiedades de: anti-desgaste, estabilidad a la oxidación, protección contra la corrosión, entre otros.

Cilindro hidráulico: El actuador hidráulico es el encargado de aplicar la carga sobre el espécimen a ensayar. En éste caso tenemos un cilindro simétrico de doble vástago de la marca *Brasválvulas®.*

Servo-válvula: Una servo-válvula de la marca *MOOG®*, es una válvula direccional controladora de caudal de infinitas posiciones, por lo tanto con ella se puede controlar de forma continua el caudal que llega hacia el actuador. La Figura 1 es un diagrama de Bode donde se representa la respuesta en frecuencia del carretel con relación a la señal de entrada sinusoidal. De éste diagrama

ISBN: 978-987-1676-63-7

podremos obtener la frecuencia natural de la válvula, consideramos apertura de la misma en 100%. Dando como resultado un valor de 50Hz.

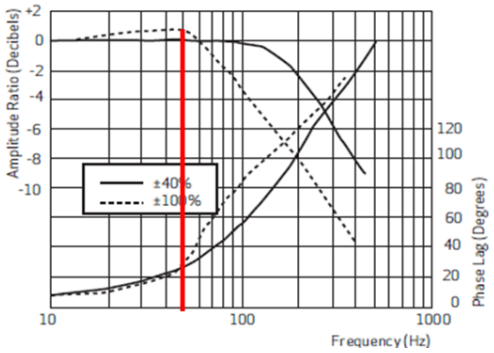


Figura 1- Curvas características de la respuesta en frecuencia de la servo-válvula [1]

Acumuladores: El acumulador de la línea de presión tiene como objetivo mantener una presión de suministro constante. Su función es la de almacenar el fluido hidráulico a una determinada presión en las cercanías de la servo-válvula y del actuador hidráulico, mediante esto logramos que el fluido se mantenga en constante movimiento en el circuito. Los acumuladores con los que cuenta la máquina de ensayos son acumuladores a gas con separador flexible de nitrilo estándar (de vejiga) de la marca Epoll® (**AS 0,75 P 210 C G 7)**.

Probeta equivalente de ensayo: Una probeta es una pieza de dimensiones determinadas realizada con el material a ensayar, que reúne las condiciones para ser sometido a ensayo. La reglamentación para este trabajo se basa es la A.S.T.M E399 (*American Society for Testing Materials*). Por lo tanto, para las simulaciones mediante una computadora se necesita conocer la rigidez de la probeta.

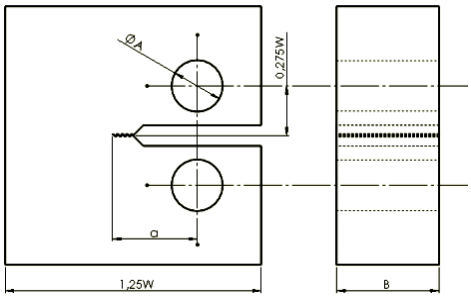


Figura 2- Probeta C(T); medidas [3]

Con la curva de la Figura 3 se obtiene la rigidez del material, teniendo en cuenta limitaciones de la máquina a evaluar y son 15kN de fuerza, en función a esto se halla el desplazamiento. Tomando el origen y el punto marcado (X=0,3994, Y=15,021) tenemos una recta que pasa por el origen de pendiente que a su vez representa la rigidez del material.

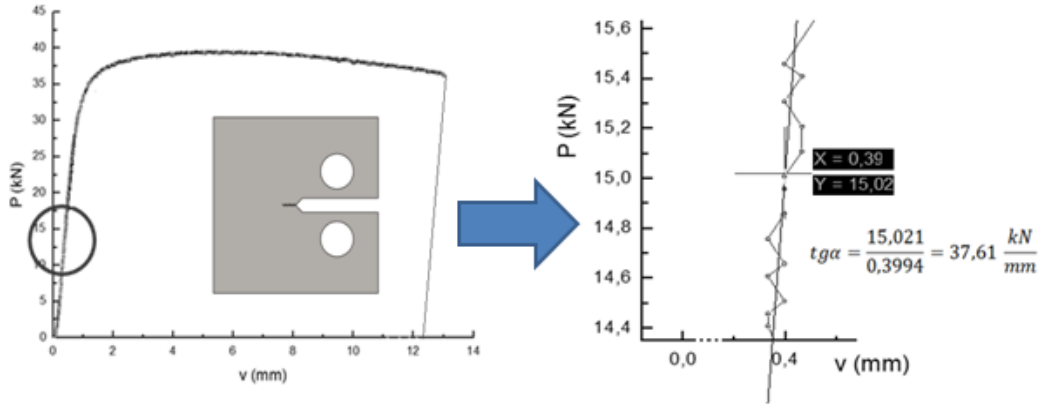


Figura 3- Curva de carga-desplazamiento de una probeta C(T) ensayada, modelo.

Sistema de control: Para éste ítem se define un sistema de control P+I (proporcional + Integral), donde la entrada es una señal del tipo rampa escalonada, el P+I actúa sobre la servo-válvula y el parámetro para la comparación se realiza en el vástago del cilindro donde se mide desplazamiento que es una consecuencia del alargamiento del la probeta.

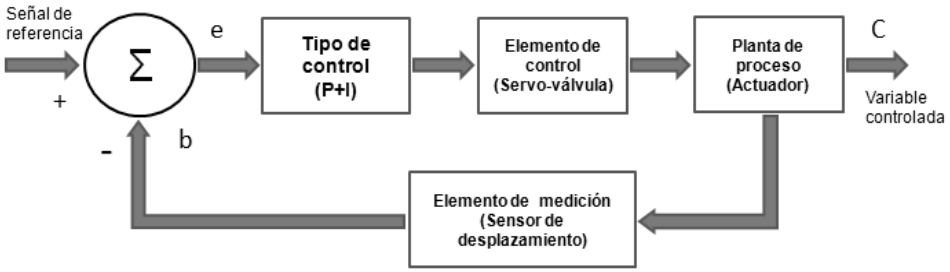


Figura 4- Esquema del sistema de control.

1.1. Parámetros del sistema Oleo hidráulico

En la Tabla 1 se muestran los parámetros brindados por los fabricantes de los elementos del sistema.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1- Parámetros de los componentes del sistema hidráulico

PARÁMETRO	Valor	Unidad
Unidad de potencia hidráulica: MTS 506.00 SN 129		
Caudal	2,3	l/min
Capacidad de reservorio (con deflectores interiores)	95	litros
Motor monofásico (Brown 110/220V 50Hz 1450 RPM)	1,5	hp
Bomba a engranajes (Sundstrand® TFP 100 modelo 1.7)	2,3	l/min
Presión de salida (en etapas de **baja**/alta)	**10,3**/210	bar
Temperatura de operación mín.	4	ºC
Aceite hidráulico Mobil DTE 25		
Temperatura Mínima/**Máxima** de operación	4/ 52	ºC
Índice de Viscosidad	98	-
Viscosidad ASTM D445 (a 40ºC)	44,2	cSt
Actuador hidráulico BrasVálvulas de carga radial 5tnf/300mm		
Diámetro del pistón	36,5	mm
Diámetro del vástago	19	mm
Carrera	150	mm
Máxima Presión	210	bar
Área útil del pistón	7,65	cm^2
Servo-válvula MOOG® 38 l/min		
Presión máxima de operación en P,T,A,B	315	bar
Caudal nominal con un Δpn de 35bar por vía	38	l/min
Respuesta al escalón para 0 a 100% de apertura	7	ms
Área útil del pistón	7,65	cm^2
Acumulador Epoll® AS 0,75 P 210 C G 7		
Presión máxima de operación	210	bar
Volumen nominal	0,75	l
Caudal medio	150	l/min

2. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN:

2.1. Probeta equivalente

Para la simulación de un elemento estructural se plantea un sub-modelo de características físicas semejantes, esto quiere decir que se utiliza un elemento definido dentro de la librería del programa en éste caso es un resorte de rigidez ajustable y se hace corresponder esa rigidez con la del material de la probeta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.1.1. Propiedades del resorte

Con un resorte de rigidez variable (ajustable) podemos simular la curva de fuerza-elongación del material. Utilizando el siguiente esquema:

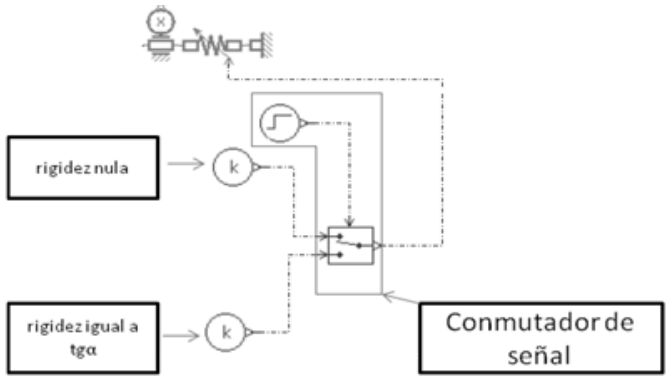


Figura 5- Rigidez de la probeta equivalente.

2.1.2. Parámetros de simulación (cont.)

En la tabla 6 se definen los demás parámetros requeridos para llevar a cabo la simulación del sistema completo. Estos elementos se los encuentra en la librería de programa utilizado (AMESim)

Tabla 2- Parámetros de simulación

Parámetro	Valor	Unidad
Aceite hidráulico Mobil DTE 25		
Temperatura	40	ºC
Densidad	870	kg/m^3
Módulo de compresibilidad	15000	bar
Viscosidad absoluta	51	cP
Unidad de potencia hidráulica: MTS 506.00 SN 129		
Tiempo de inicio de trabajo	0	s
Caudal al inicio-etapa 1/ Caudal al final-etapa 1	2,3	l/min
Actuador hidráulico BrasVálvulas de carga radial 5tnf/300mm		
Presión en el puerto 1 y 2	0	bar
Desplazamiento del vástago	75	mm
Diámetro del pistón	36,5	mm
Diámetro del vástago al final del puerto 1 y 2	19	mm
Longitud de carrera	150	mm
Volumen muerto al final del puerto 1 y 2	60	cm^3
Masa total movida	2,37	kg
Ángulo entre el vástago y una horizontal	90	g- sexa

ISBN: 978-987-1676-63-7

Servo-válvula MOOG® 38 l/min		
Posición inicial del carrete	0	
Velocidad inicial del carrete	0	1/s
Corriente que circula por la bobina	40	mA
Frecuencia natural	50	Hz
Coeficiente de amortiguamiento	0,7	null
Puerto P a A/B a T/ P a B/A a T, Caudal a 100% apertura	38	l/min
Puerto P a A/B a T/ P a B/A a T, Caída de presión de la vía	35	bar
Puerto P a A/B a T/ P a B/A a T, Numero de flujo critico	1000	null
Acumulador Epoll® AS 0,75 P 210 C G 7		
Proceso termodinámico de expansión-compresión	Adiabático	
Presión de pre-carga del gas Nitrógeno	68,95	bar
Volumen del acumulador	0,75	L
Coeficiente de la politrópica	1,4	null
Diámetro del orificio para intercambio de aceite	12,7	mm
Numero de flujo crítico	2000	null
Coeficiente de flujo para el orificio	0,7	null
Control (P+I)		
Ganancia proporcional	30	null
Ganancia Integral	30	null

3. HIPÓTESIS DE INGENIERÍA.

Para la construcción de los diferentes modelos en el programa de simulación, se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

1. En el aceite no se consideran impurezas.
2. La unidad de potencia hidráulica es modelada como una fuente de caudal constante ya que la misma tiene como dato que entrega un caudal de 2,3L/min.
3. En los acumuladores, la compresión y expansión del gas que se realiza mediante un proceso termodinámico politrópico.
4. Las etapas de la señal de entrada se definen en función de la velocidad de aplicación de carga que está reglamentada ASTM E399.
5. Se tomó la rigidez de una probeta determinada que fue ensayada con otra máquina de ensayos.
6. No se toman en cuenta las pérdidas de carga debido a los conductos hidráulicos que unen los diferentes componentes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. MODELO DEL SISTEMA

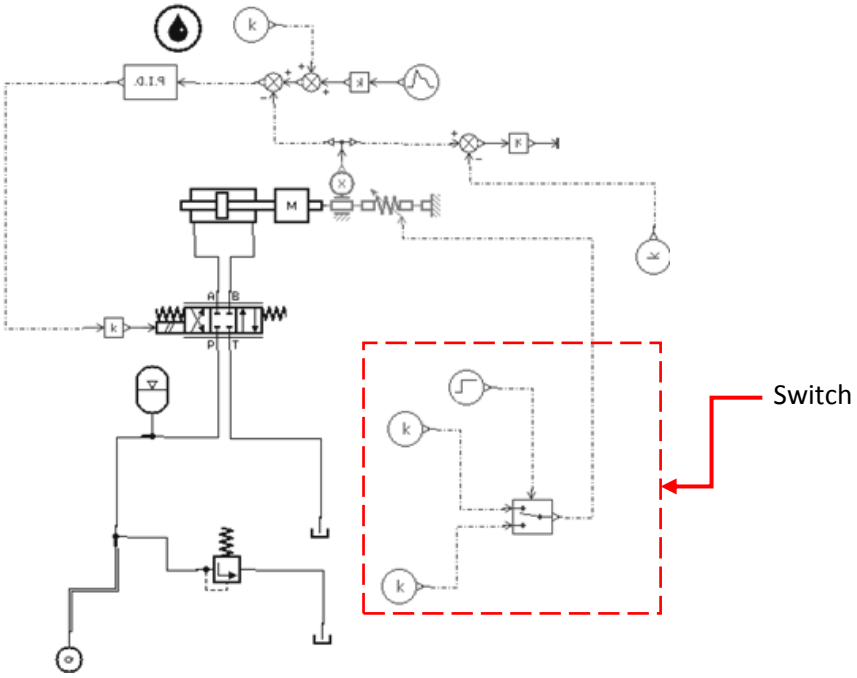


Figura 6- Modelo para simulación estática/dinámica.

En la Figura 6 se muestra un esquema del circuito hidráulico y de control con cada uno de los componentes utilizados para la simulación. Para el análisis estático, la rigidez de la probeta se la simula mediante dos constantes y un elemento de cambio (switch) controlado por una señal escalón. Mientras la salida del escalón es menor que 1 (uno), la rigidez vale 37,5kN/mm y cuando el escalón modifica su amplitud el switch cambia la rigidez de la probeta a un valor nulo para representar la ruptura (frágil en este caso) de la probeta. Por otra parte, para un análisis temporal del sistema que deja de ser una sistema estático para convertirse en un sistema dinámico, es necesario una señal de referencia sinusoidal. Para esta condición se cambian las condiciones de rigidez de la probeta, tomando un valor constante de 37,61kN/mm.

5. SIMULACIONES

5.1. Respuesta estática del sistema con una rigidez de 37,61kN/mm

De manera experimental se obtuvo la rigidez de una probeta ensayada bajo las normas ASTM E399 Figura 3 y ésta rigidez se utiliza para las simulaciones en el ordenador. Luego se simula la rotura de la probeta con una rigidez descripta, con una carga aproximada de 15kN (impuesta por limitaciones del sistema) y a una tasa de variación de carga de 1,7kN/s.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los primeros diez segundos del gráfico el cilindro está detenido y el acumulador es el que está siendo llenado, luego se va aplicando carga a la probeta a velocidad constante de 1,7kN/s. Aproximadamente 9 segundos después del llenado del acumulador se produce la rotura de la probeta y esto ocasiona un transitorio en el sistema, que es atenuado por el coeficiente de fricción debido a la viscosidad del aceite y por la caída de presión nominal de la servo-válvula. Una vez que se rompe la probeta, el pistón continúa en desplazándose hasta que se detiene.

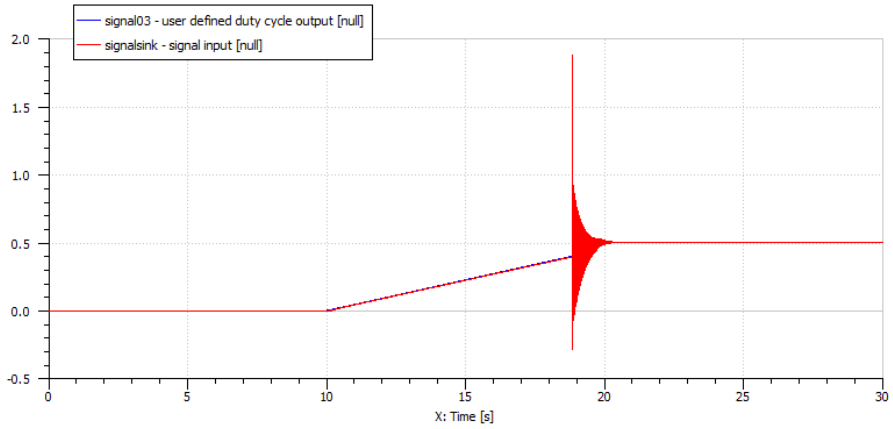


Figura 7- Respuesta estática del sistema

5.2. Respuesta temporal del sistema

Se utiliza una señal sinusoidal para analizar la respuesta temporal del sistema. La frecuencia de la onda en primera instancia se define en la cercanía del valor nulo para luego incrementarla en diferentes valores y así comparar que sucede. Además se debe conocer el nivel medio de la onda que es un parámetro necesario debido a que interesa conocer que sucede con un valor de amplitud máxima, ya que éste es una situación crítica de elongación de la pieza. Por lo tanto la amplitud la elongación de la probeta resulta de 0,4mm.

En la Figura 8 se observa que el sistema responde de manera muy similar a la entrada, que es la señal sinusoidal pura, luego en las figuras siguientes donde las frecuencias son de 10Hz y de 50Hz, el sistema tiene dificultades para seguir a la onda de referencia debido a inconvenientes en el funcionamiento de elementos del sistema, resultando más preponderante el movimiento oscilante de la servo-válvula.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5.2.1. *Frecuencia de trabajo de 1Hz.*

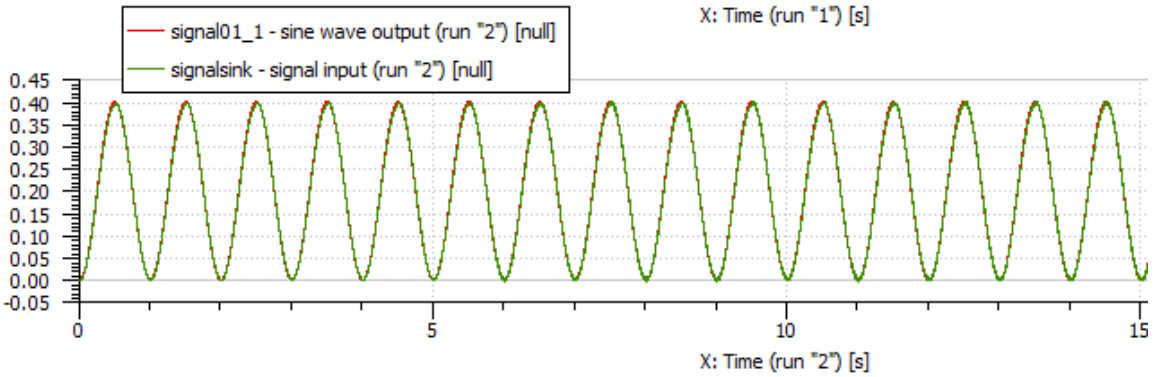


Figura 8- Comparación de las señales E/S a frecuencia 1Hz.

5.2.2. *Frecuencia de trabajo de 10Hz y 50Hz.*

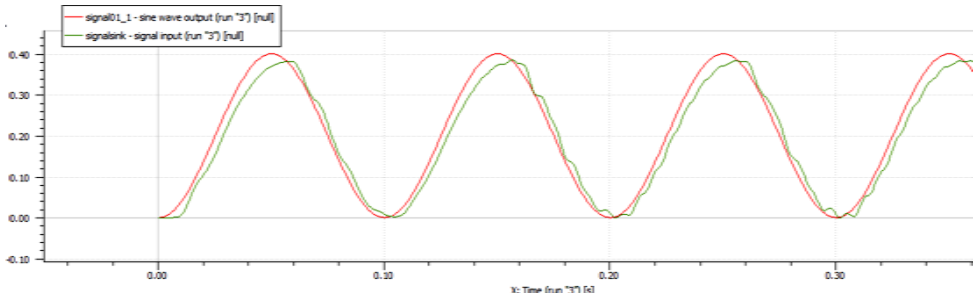


Figura 9- Comparación de las señales E/S a frecuencia 10Hz.

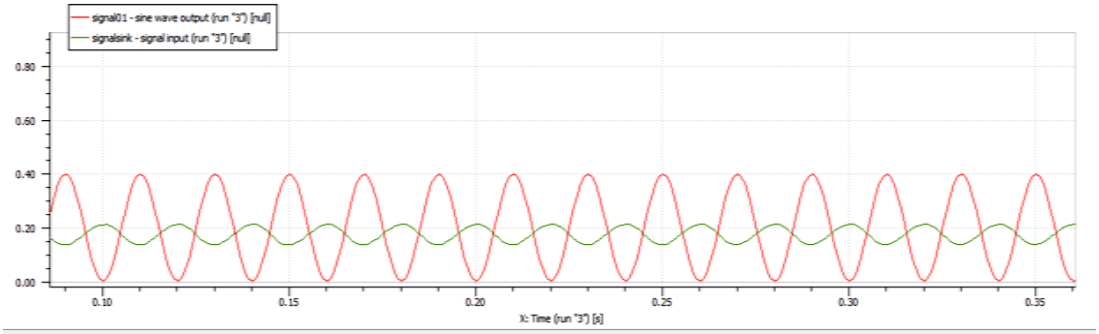


Figura 10- Comparación de señales E/S a frecuencias de 50Hz.

5.3. *Análisis de la respuesta en frecuencia del sistema con amplitud de 0,4mm*

Una herramienta que nos brinda el programa de simulación, es la fácil obtención del diagrama de Bode del sistema. Para ello; Se realiza éste barrido en frecuencia con el objetivo de conocer la diferencia existente entre señales que representan a la amplitud de desplazamiento entre los cabezales que sirven como elementos de sujeción de las probetas para éste ensayo se usaron probetas del tipo C(T).

ISBN: 978-987-1676-63-7

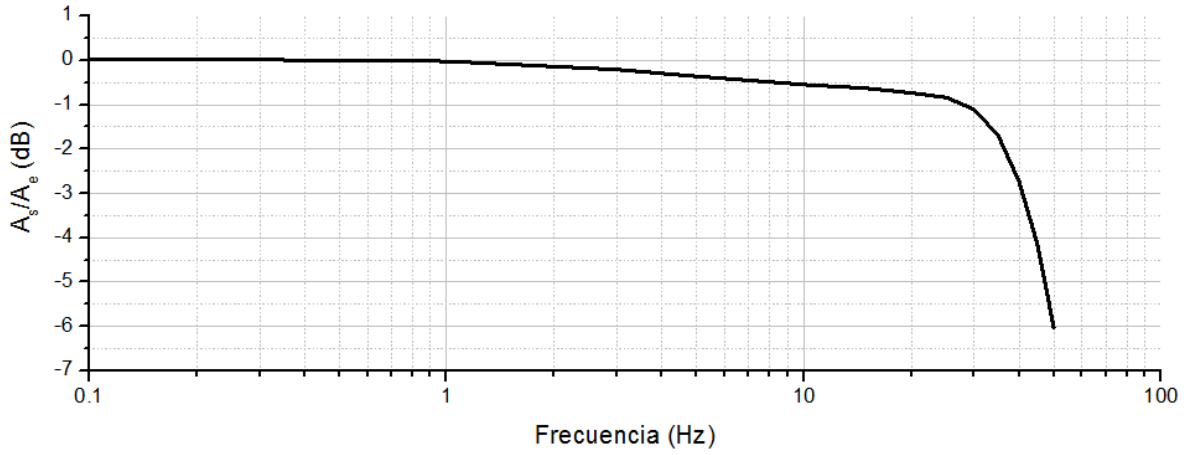


Figura 11- Diagrama de Bode, relación de amplitudes en relación con la frecuencia.

5.4. Respuesta en frecuencia del sistema con amplitud de 0,13mm

Se analizará la respuesta en frecuencia para una amplitud 0,13mm, que representa aproximadamente un tercio de 0,4mm por reglamentación. Por otra parte, un parámetro de comparación es la atenuación (respecto a la señal de referencia) de onda, se utiliza la siguiente expresión:

$$dB = 20.\log_{10}\left(\frac{A_{medido}}{A_{referencia}}\right) \qquad (6\text{-}1)$$

Lo interesante en conocer es la relación de amplitudes, la amplitud de respuesta en relación a la amplitud de la señal de referencia.

Tabla Nº 1- Porcentaje de atenuación de ondas E/S.

Hz	As/Ae	dB	% (As/Ae)
0,1	1,002	0,017	-0,2
1	0,997	-0,026	0,3
10	0,939	-0,547	6,1
50	0,5	-6,021	50

El porcentaje de atenuación indica cuanto se modifica la señal de respuesta del sistema en relación a la señal de entrada que comanda a la servo-válvula que es éste caso es una onda sinusoidal pura.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. CONCLUSIONES

- Para frecuencias contempladas entre los 0,1Hz hasta los 30Hz el sistema tiene la capacidad de seguir a la señal de referencia pero presenta una atenuación en la respuesta que no supera al 15% del valor de referencia.

- Se verificó mediante simulaciones que la máquina atiende los requerimientos necesarios para ensayos estáticos, cuya máxima carga es de 15 kN.

- La banda de frecuencia desde 3Hz hasta los 30Hz tienen una atenuación de la onda de respuesta al desplazamiento provocado en la probeta debido a que el caudal disponible de bombeo no es el suficiente como para ejercer una fuerza de 15kN requeridos. Esto se puede solucionar reemplazando la fuente hidráulica por una fuente de mayor caudal. Se evaluó que con una fuente que entregue un caudal nominal de 40 l/min se podrá obtener una fuerza de aproximadamente 15kN. Otro limitador es la servo-válvula cuyo caudal nominal es de justamente 40 l/min debido a esto se evaluó para ese caudal de bombeo.

7. REFERENCIAS

[1] Catálogo MOOG, *Electrohydraulic Valves*, MOOG Inc., Nueva York EEUU, 2013.

[2] Irlan Von Linsingen*. Fundamentos de sistemas hidráulicos*, UFSC, Florianópolis BR, 2011.

[3] ASTM E399. *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. ASTM, 1997.
.

[4] Federico Braun, Gonzalo Martínez. *Diseño, construcción y puesta en funcionamiento de una máquina universal de ensayos servo-hidráulica.* Laboratorio de propiedades mecánicas, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén 2013.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

AISLACIÓN TÉRMICA PRODUCIDA POR CAVIDADES DE AIRE. ANÁLISIS DE UN TECHO CON GEOMETRÍA SIMPLIFICADA Y FLUJO TURBULENTO

Agustín Brondino, Marcelo E. Berli y José Di Paolo

Grupo de Investigación en Mecánica de los Fluidos (GIMEF)
Cátedra de Mecánica de los Fluidos – Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe
Lavaise 610, Santa Fe, Pcia. de Santa Fe, Argentina
correo-e: marcelo.berli@gmail.com

RESUMEN

La utilización de medios pasivos de confort térmico en la construcción de viviendas es una medida que promete contribuir en la disminución de los elevados costos energéticos asociados al acondicionamiento de ambientes.

El techo es una de las partes de la vivienda donde se producen los mayores intercambios del calor con el medio ambiente. La continua radiación solar que recibe la parte superior es transmitida al cielo raso en contacto con el interior del edificio y la cámara de aire interpuesta entre ambos juega un papel fundamental en la transmisión de esta energía. En la actualidad, esta cámara no está optimizada como un componente pasivo de ahorro energético, convirtiéndose su diseño en un potencial elemento para disminuir las pérdidas de calor en invierno y ganancias en verano.

Con los actuales recursos informáticos, la Mecánica de Fluidos Computacional se ha convertido en una importante herramienta de predicción en problemas de ingeniería mecánica para comprender fenómenos físicos, asistiendo y direccionando experimentos para economizar significativamente en costos y tiempo. Por ello, en este trabajo se utilizó una técnica numérica basada en Elementos Finitos para estudiar el efecto de algunos parámetros de diseño estándares y novedosos, de una cavidad de aire (representativa del techo de una vivienda tipo) sobre la transmisión pasiva de energía térmica a través de sus superficies límites.

Dada la baja viscosidad del aire y las grandes dimensiones relativas del techo, se utilizó un modelo de flujo turbulento. El análisis se realizó sobre una geometría simplificada a dos dimensiones debido a los recursos computacionales disponibles y como preludio de futuras investigaciones. Los resultados obtenidos permitieron analizar comparativamente cavidades de aire abiertas y cerradas, concluyendo la ventaja de las primeras sobre las segundas, tradicionalmente usadas. Como es intuitivo, la utilización de aislantes térmicos mejorarán aún más la performance de las cavidades óptimas.

Palabras Claves: *convección natural, flujo turbulento, mecánica de fluidos computacional, ahorro energético, diseño de viviendas.*

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales partes a través de la cual una vivienda intercambia importantes cantidades de calor con el medio ambiente es el techo. Las temperaturas extremas a la que está expuesta la parte superior transmiten el calor recibido por la radiación solar (a través de ciertos aislantes) al cielorraso en contacto con el interior del edificio. La cámara de aire interpuesta entre ambos juega un papel fundamental en este intercambio pero actualmente no está optimizada como un elemento pasivo de ahorro energético. Así, para una vivienda común, esta cámara es un elemento potencial de diseño para disminuir las pérdidas de calor en invierno y ganancias en verano. Para lograr este objetivo, es fundamental conocer el comportamiento del flujo del aire que se encuentra en el interior de la misma ante condiciones térmicas establecidas.

El sistema de ventilación en techos mediante convección natural ha recibido extensa atención en los últimos años. Hirunlabh et al [1] realizaron un análisis a través de balances macroscópicos para evaluar la performance de los elementos de construcción en un techo que contiene un canal de ventilación inclinado de sección constante. Por otro lado, Ciampi et al [2] realizaron un análisis sobre una disposición de techo similar a la de Hirunlabh et al, considerando tanto régimen laminar como turbulento, y encontraron que en régimen laminar, para techos con microventilación, el ahorro de energía para compensar la transferencia de calor a través del techo puede alcanzar el 30 %. Asan y Namli [3], mediante balances microscópicos, analizaron el problema de convección natural de flujo laminar en una cavidad triangular cerrada simulando un techo inclinado, observaron que el aumento en la relación base-altura de la cavidad repercute significativamente en una reducción de la transferencia de calor a través de la base (cielorraso) de la cavidad. Posteriormente, el problema de convección natural, en techos con y sin aleros, fue abordado por Oztop et al [4], mediante un geometría que corresponde a un techo de sección triangular cerrada sujeta a condiciones de contorno de verano.

En trabajos previos de nuestro grupo se abordó el estudio de la cavidad de aire de un techo liviano (de chapa) a simple agua, considerando un flujo laminar de aire dominado por el fenómeno de convección natural y modelado mediante la aproximación de Boussinesq [5, 6]. Los resultados mostraron que la presencia de orificios laterales en las paredes de la cavidad genera un flujo cruzado de aire, impulsado por los gradientes térmicos en su interior, que extrae calor por convección conformando una barrera térmica. De esta manera, se predijeron reducciones en la transferencia de calor hacia la vivienda de hasta un 70 %. No obstante, ante las dimensiones de la cavidad y las propiedades del aire, el flujo puede ser predominantemente turbulento pudiendo esto modificar los valores predichos anteriormente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este trabajo se realiza el estudio del flujo de aire dominado por convección natural en un techo liviano a simple agua, utilizado un modelo de flujo turbulento, orientando los resultados a mostrar la influencia de algunos parámetros constructivos sobre la performance térmica de la cavidad.

2. MODELO MATEMÁTICO

La Figura 1 muestra la geometría simplificada en dos dimensiones (corte transversal de un techo liviano a simple agua de una vivienda) utilizada como dominio para resolver las ecuaciones que gobiernan la física del problema. La cavidad de aire está delimitada por la cobertura superior inclinada, el cielorraso y las paredes con orificios laterales. La longitud de los orificios se adoptó en 20 cm, espesor típico de una pared de ladrillos exterior de 15 cm más revoque. El parámetro 'Am' es la altura promedio, definida como la altura del techo en el punto medio del dominio, y es un indicador del volumen total de la cavidad de aire. El techo se considera ubicado sobre una habitación cuya planta es cuadrada con una longitud de lado de 4 m. Lateralmente, el techo está limitado por paredes que se asumen térmicamente aisladas. La cavidad está cubierta en su parte superior por chapas metálicas mientras que el cielorraso está compuesto por una fina capa de material conductor del calor. No obstante, se abordarán casos de estudios en los cuales este último estará recubierto de un aislante térmico.

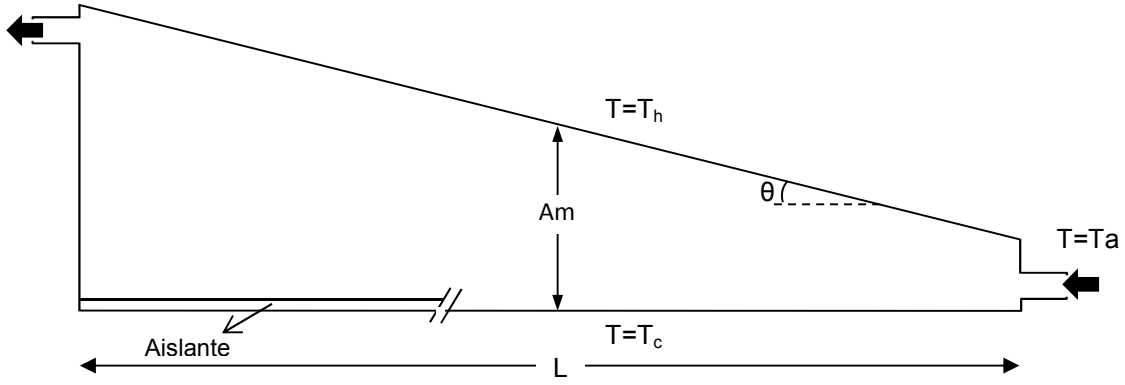


Figura 1: Vista lateral de la cavidad de aire analizada y los principales parámetros del sistema. La parte izquierda de la figura muestra la cavidad dotada de un aislante en el cielorraso mientras que la parte derecha muestra una cavidad sin aislación. T_a, T_c y T_h: temperatura ambiente, de cielorraso y de techo respectivamente.

2.1. Modelo

Ante ausencias de vientos que incidan sobre el techo, el movimiento del aire dentro de la cavidad se debe principalmente a fuerzas de flotación asociadas a los gradientes de densidad, que se originan por la diferencia de temperaturas entre el techo y el cielorraso. Este fenómeno se conoce como convección natural y su dinámica ha sido descripta en trabajos anteriores mediante la

aproximación de Boussinesq. Esta aproximación considera la variación de la densidad (mediante una función lineal con el cambio de temperatura) únicamente en las fuerzas volumétricas, resolviendo las ecuaciones de flujo laminar incompresible; no obstante, solo es válida para pequeñas variaciones producidas ante acotados gradientes térmicos. En un techo real, estos gradientes suelen ser superiores a los límites de validez de la aproximación de Bousinesq. En función de avanzar hacia simulaciones más realistas, en este trabajo se utilizará un modelo de flujo compresible, asumiendo un flujo turbulento en estado estacionario y despreciando los efectos de la radiación en la transferencia de energía. De esta manera las ecuaciones diferenciales que describen el flujo de convección natural son las siguientes:

Continuidad

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

Cantidad de movimiento

$$\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u} = \nabla\cdot\left[-P\mathbf{I} + (\mu+\mu_\mathrm{T})(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^\mathrm{T}) - \frac{2}{3}(\mu+\mu_\mathrm{T})(\nabla\cdot\mathbf{u})\mathbf{I} - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{I}\right] + (\rho-\rho_0)\mathbf{g} \tag{2}$$

Energía

$$\rho C_\mathrm{p}\mathbf{u}\cdot\nabla T = \nabla\cdot(k_\mathrm{A}\nabla T) \tag{3}$$

donde **u** es el vector de velocidades, ρ es la densidad del aire, ρ_0 es la densidad del aire a la temperatura ambiente (externa), P es la presión modificada, **g** es la aceleración de la gravedad, μ la viscosidad del aire, μ_T la viscosidad turbulenta, k la energía cinética turbulenta, C_p la capacidad calorífica del aire, k_A la conductividad térmica del aire y T la temperatura.

Para describir el flujo turbulento se utilizó el modelo de *k-ε*, que se ha demostrado es el más preciso para el cálculo del movimiento de aire dentro de habitaciones en viviendas y edificios [7]. Así, además de las ecuaciones de conservación se contemplan la Ecuación (4) de la variación de energía cinética turbulenta y la ecuación (5) de la velocidad de disipación turbulenta:

$$\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)k = \nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_\mathrm{T}}{\sigma_\mathrm{k}}\right)\nabla k\right] + P_k - \rho\epsilon \tag{4}$$

$$\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)\epsilon = \nabla\cdot\left[\left(\mu+\frac{\mu_\mathrm{T}}{\sigma_\epsilon}\right)\nabla\epsilon\right] + C_{\epsilon1}\frac{\epsilon}{k}\left(\mu_\mathrm{T}\left[\nabla\mathbf{u}:(\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^\mathrm{T}) - \frac{2}{3}(\nabla\cdot\mathbf{u})^2\right] - \frac{2}{3}\rho k\nabla\cdot\mathbf{u}\right) - C_{\epsilon2}\rho\frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

la viscosidad turbulenta μ_T se define por la Ecuación (6).

$$\mu_\mathrm{T} = C_\mu\rho\frac{k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los parámetros se consideran con valores constantes: $C_{\epsilon 1}$=1,44; $C_{\epsilon 2}$=1,92; C_{μ}=0,09; σ_k=1 y σ_{ϵ}=1,3.

En la sección de resultados, se mostrarán predicciones para cavidades con y sin aislante en el cielorraso. Para los casos en que se considera una capa de aislante, como se muestra en la Figura 1, se utiliza la Ecuación (7) para resolver de transferencia de energía térmica en el sólido asumiendo un material isotrópico:

$$0 = \Delta T \tag{7}$$

2.2. Condiciones de contorno

El modelo de flujo turbulento k-ϵ empleado no resuelve el perfil de velocidades en la pared sólida sino que se utilizan funciones de pared que modelan los altos gradientes de velocidad y temperatura que se producen en esa zona. Para ello, además de la condición de impermeabilidad de la pared definida por la Ecuación (8) y del flujo de energía cinética nulo, definido por la Ecuación (9), se utilizó la Ecuación (10) que utiliza una función de pared:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \tag{8}$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \tag{9}$$

$$\left[(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I}\right]\mathbf{n} = -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+}\, \mathbf{u}_{tang} \tag{10}$$

Con

$$\epsilon = \rho \frac{C_\mu k^2}{\kappa_v \delta_w^+ \mu}$$

Donde $\mathbf{u}_{tang}$ es la velocidad tangencial, definida como $\mathbf{u}_{tang} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$, $u_\tau$es la velocidad de fricción, κ_v es la constante de Von Kármán y δ_w^+ es el espesor adimensional de la función de pared. Además, en los orificios de entrada y salida se asumió tensión normal igual a cero, $\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} = 0$, y la presión en la entrada inferior se definió arbitrariamente igual a 0.

Para el análisis térmico se consideraron T_h y T_c constantes en cada simulación y las paredes laterales como adiabáticas. La temperatura del aire que ingresa a la cavidad es constante e igual a la tempera del ambiente (T_a). Finalmente, para los casos en que se considera la presencia de un aislante térmico sobre el cielorraso (lana de vidrio 50 mm), debe igualarse el flujo de calor entre el aire de la cavidad y el sólido que representa al aislante mediante la siguiente ecuación:

$$k_A \nabla T = k_S \nabla T \tag{11}$$

Donde k_S es la conductividad térmica del sólido.

Las ecuaciones diferenciales presentadas y sus correspondientes condiciones de contorno se resolvieron de forma numérica mediante el método de los elementos finitos utilizando el software comercial COMSOL 4.4.

2.2. Verificación del régimen de flujo

Trabajos anteriores [1-6] han abordado el análisis del fenómeno de convección natural en cavidades representativas de techos mediante modelos de flujo laminar. No obstante, ante las dimensiones de los mismos y las propiedades de aire, es razonable esperar que en condiciones normales el flujo pueda ser turbulento, lo cual fue necesario corroborar previo a la selección del presente modelo. Con este fin, se utilizaron como parámetros adimensionales el número de Reynolds y de Grashof, los cuales fueron estimados utilizando las propiedades físicas del aire seco presentadas en la Tabla 1. Estas propiedades se adoptaron para presión atmosférica y 30 ºC [8], correspondiente a la temperatura ambiente (de referencia) utilizada en el modelo.

Tabla 1. Propiedades físicas de aire seco a 30ºC y presión atmosférica.

Parámetro	Descripción	Valor
ρ	Densidad	1,205[kg/m^3]
μ	Viscosidad	1,82e-5[N s/m^2]
k_A	Conductividad térmica	0,0257 [W/(m K)]
C_p	Capacidad calorífica	1,005 [kJ/(kg K)]
β	Coeficiente de expansión térmica	3,43e-3[1/K]

El número de Reynolds compara la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas y se define por la relación $Re=\rho\, U_c\, L/\mu$, siendo U_c y L la velocidad y longitud características del modelo. Por otro lado, El número de Grashof indica la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas y se define por la relación $Gr= \rho^2\, g\, \beta\, \Delta T\, L^3/\mu^2$, siendo ΔT la diferencia de temperatura característica del sistema en estudio. Cuando las fuerzas de flotación son grandes comparadas con las viscosas el régimen se considera turbulento. La transición entre estos dos régimen para placas verticales es para un Gr del orden de 10^9 [8].

Si se definen como parámetros característicos, la velocidad de flujo de flotación $U_c = (g\, \beta\, \Delta T\, L)^{1/2}$, la longitud L=4m igual al largo del techo y la diferencia de temperatura entre el techo y el cielorraso, $\Delta T=T_h- T_c$=60ºC, obteniéndose los valores adimensionales $Re\sim10^6$ y $Gr\sim10^{11}$, que indican claramente que se espera un régimen turbulento o de transición, pero no laminar. Así, los resultados que se presentan en la siguiente sección se obtuvieron asumiendo que el flujo de aire dentro de la cavidad se encuentra en régimen turbulento para todas las condiciones simuladas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los siguientes resultados se corresponden con el análisis térmico de una vivienda en verano. Así, la temperatura ambiente exterior (Ta) será superior a la temperatura del interior de la vivienda, asumiendo que esta última es igual a la temperatura del cielorraso (T_c), mientras que la temperatura del techo (T_h) será mucho mayor que estas últimas debido a que éste recibe directamente la radiación solar. Si bien estas variables no son independientes entre sí, para obtener resultados preliminares sobre el diseño y optimización de la cavidad se adoptaron como invariantes y constantes en cada caso de estudio.

3.1 Una cavidad sin aislación

En la Figura 2 se muestran, para una cavidad abierta y cerrada, el perfil de temperatura y las líneas de corriente obtenidos a partir de las simulaciones. Para la cavidad cerrada puede apreciarse un flujo de recirculación interna mientras que para la cavidad abierta, se observa un flujo cruzado con algunas zonas de recirculación. Puede notarse que, ante iguales condiciones de contorno, la cavidad abierta presenta una notable disminución de la temperatura media respecto de la cavidad cerrada. En el caso de cavidad cerrada, la temperatura promedio es cercana a 64 ºC mientras que para la abierta es de 36 ºC, evidenciando que en el segundo caso, existe una importante disipación de calor convectiva hacia el exterior que evita el aumento observado en el primer caso y, por lo tanto, la trasferencia térmica hacia el interior de la vivienda.

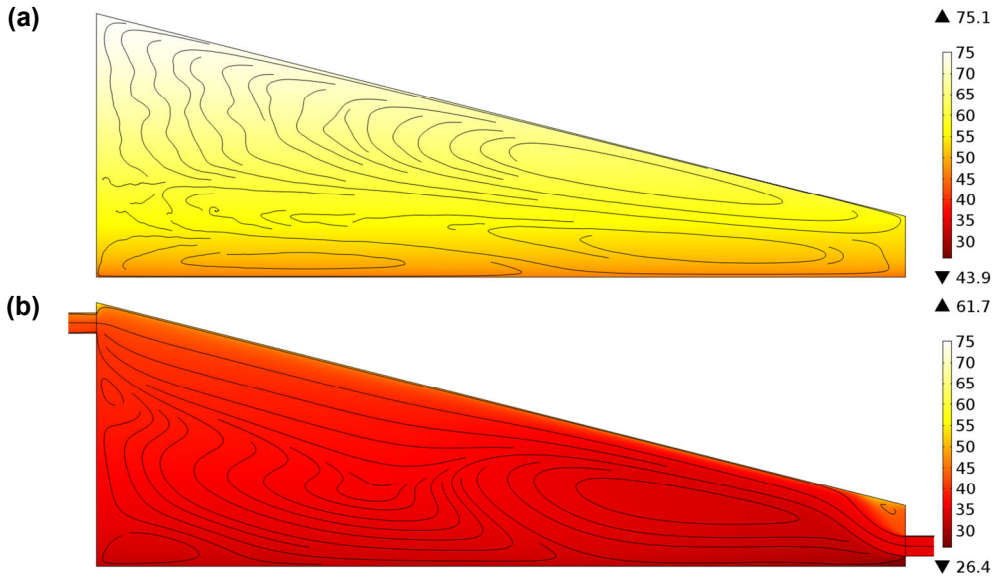


Figura 2: Perfil de temperatura y líneas de corriente típicos obtenidos para una cavidad cerrada sin aislación (a) y una cavidad abierta sin aislación (b). Parámetros utilizados en el cálculo: Am=0,8 m. T_c=25 ºC. T_h=85 °C, T_a =30 ºC.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Actualmente, los techos que poseen una cavidad de aire contienen solo rejillas de ventilación, pero carecen de aberturas adecuadas para ser utilizadas como elementos importantes en el diseño térmico. Como se ve en la Figura 3(a), a medida que aumenta el gradiente de temperaturas entre las chapas y el cielorraso de la cavidad, el caudal que pasa a través de los orificios crece notablemente, la transmisión de calor por convección se torna dominante y la transferencia de calor hacia la vivienda presenta una importante separación entre ambos casos.

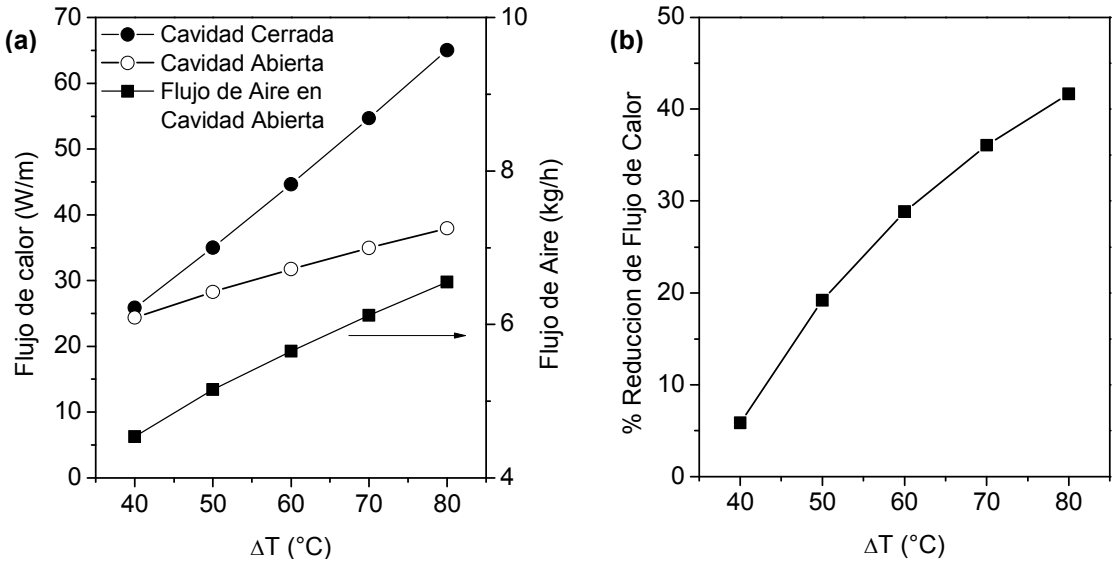


Figura 3: Comparación entre el flujo de calor transferido del techo al interior de la vivienda para cavidades abiertas y cerradas en función de la diferencia de temperatura entre el techo y el cielorasso. (a) Flujo de calor por m de habitación. (b) Porcentaje de reducción del flujo de calor entre ambos casos. Parámetros: Am=0,8 m. T_c=25 ºC. T_a =30 ºC.

3.2 Una cavidad con aislación

La Figura 4 muestra la comparación del flujo de calor entre una cavidad con y sin aislante en la base. El aislante adoptado es lana de vidrio con un espesor de 50 mm y una conductividad térmica de 0,04 W/(mK).

A partir de estos resultados puede observarse que, como es razonable de esperar, tanto para la cavidad abierta como cerrada el flujo de calor disminuye notablemente cuando se utiliza un aislante entre el cielorraso y el interior de la vivienda, siendo esta reducción de un 30% para la cavidad cerrada y hasta 70% en la abierta. Además, a partir de la Figura 4 se puede inferir que para los valores más elevados de ΔT, el flujo de calor para una cavidad abierta sin aislante es menor que para una cavidad cerrada con aislante (se observa una reducción del 18%). Esto es, una cavidad abierta sin aislante podría conferir un rendimiento térmico similar a una cavidad cerrada con aislante. No obstante, la cavidad abierta con aislante muestra una reducción superior al 70 %

ISBN: 978-987-1676-63-7

respecto de la cavidad cerrada con aislante, y superior al 80% respecto de la cavidad cerrada sin aislante.

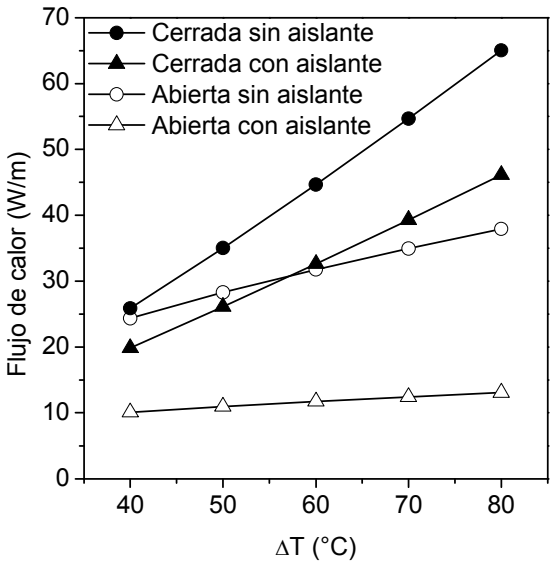


Figura 4: Comparación entre la cantidad de calor transferido del techo a la vivienda para cavidades abiertas y cerradas con y sin aislante en función de la diferencias de temperatura entre el techo y el cielorraso. Parámetros: Am=0,8 m. T_c=25 ºC. T_a=30 ºC. Aislante: lana de vidrio 50 mm.

3.2 Influencia de la geometría de la cavidad

Comúnmente los techos se diseñan con pendientes que oscilan entre el 7 y 15%, dependiendo de los materiales utilizados y las condiciones climáticas. Mayores inclinaciones son admisibles pero posiblemente en esos casos, el espacio interior sea ocupado para almacenamiento.

La Figura 5(a) muestra la variación del flujo de calor para distintas pendientes, de 7 a 20º. A diferencia de los resultados obtenidos en flujo laminar [6], para flujo turbulento no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento térmico (variación máxima de 5% entre las distintas configuraciones). La Figura 5(b) muestra el efecto la variación de la altura media (Am) sobre el flujo de calor entre la cavidad y el interior de la vivienda. El mínimo valor posible de este parámetro, para una inclinación de techo fija, está acotado por el extremo en el que la parte inclinada toma contacto con el orificio de entrada. Para el caso de cavidad abierta, se observa una importante disminución del flujo de calor medio con el incremento de Am entre 0,6 y 0,7 m (reducciones de hasta un 25%), pero para valores entre 0,7 a 1,2 m las diferencias son despreciables. Por otro lado, para el caso cerrado, la reducción es prácticamente lineal entre 0,6 m y 1 m alcanzando un valor de aproximadamente un 26%. En este sentido, la cavidad cerrada requiere un mayor aumento de la distancia entre las chapas y el cielorraso para lograr una reducción equivalente que

ISBN: 978-987-1676-63-7

en el caso cerrado. Esto es, con valor máximo de Am=0,7 m se es suficiente para el caso abierto, mientras que para el caso cerrado dicho valor asciende a 1 m. Es importante resaltar que para ambos casos, se observa un límite asintótico más allá del cual estas variaciones son despreciables y no mejoran el rendimiento térmico del techo. Estos resultados en su conjunto podrían ser útiles al considerar de los criterios de diseño para determinar los costos fijos (construcción) y operacionales (climatización y mantenimiento) de una vivienda.

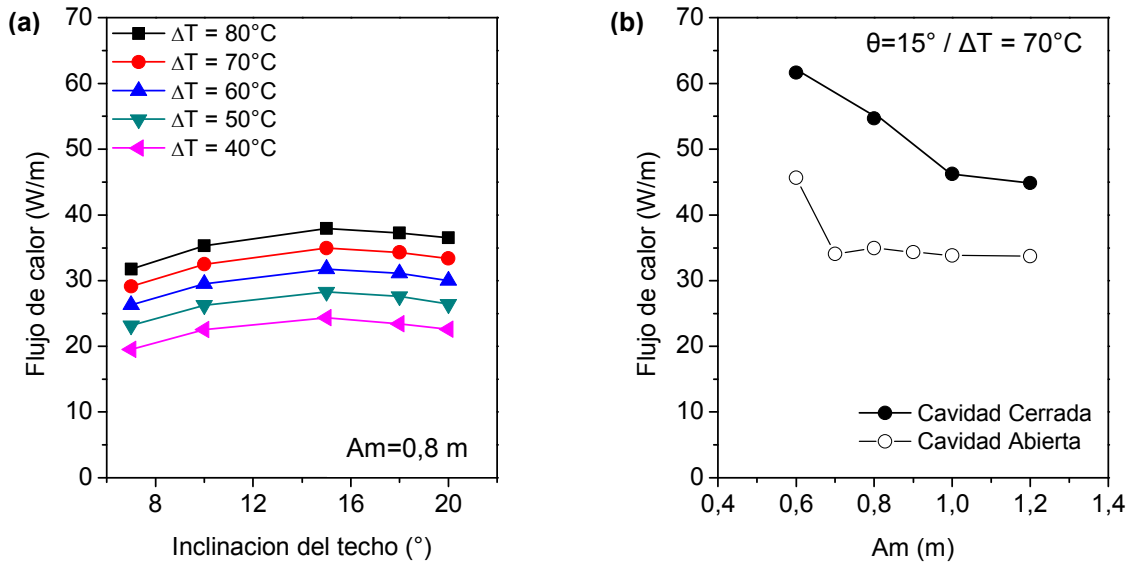


Figura 5: Flujo de calor entre la cavidad y el interior de la vivienda para distintos parámetros constructivos: (a) Variación de la inclinación del techo en cavidades abiertas y (b) Variación de la altura media Am de la cavidad. Parámetros: T_c=25 ºC. T_a=30 ºC.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se resolvió numéricamente un modelo de flujo turbulento de convección natural bidimensional dentro de una cavidad que representa al techo de una vivienda común, la cual presenta dos orificios opuestos para favorecer la circulación de fluido. Se obtuvieron resultados para algunos de los posibles parámetros de diseño de un techo a simple agua, para los cuales se concluye que la existencia de orificios de ventilación optimiza el comportamiento térmico de la cavidad ante condiciones de temperatura de verano. Los principales resultados se resumen a continuación:

- La presencia de orificios de tamaño adecuado reducen la transferencia de calor hacia la vivienda en valores que superan el 40%.
- La utilización de aislantes térmicos mejoran notablemente el rendimiento de la cavidad. No obstante, un techo con orificios y sin aislante muestra prácticamente el mismo rendimiento

ISBN: 978-987-1676-63-7

que un techo cerrado con aislante. Un techo con orificios y con aislante podría reducir la transferencia de calor en hasta un 80 % respecto de las cavidades cerradas.

- La transferencia de calor a la vivienda se reduce conforme aumenta altura de la chapa respecto del cielorraso, aunque este aumento tiene un límite a partir del cual no se observan variaciones significativas. En el caso abierto, esta altura media máxima es de 0,7 m, mientras que para el caso cerrado la misma es de 1 m.

A futuro se propone utilizar los parámetros de diseño obtenidos para estimar de manera más precisa el flujo de calor en las fronteras de interés utilizando modelos de regímenes de flujo que resuelvan el perfil de velocidades promedio en toda la región (no funciones de pared) e implementar un modelo de transferencia de calor completo que contemple la influencia de la radiación solar y la temperatura ambiente en la temperatura efectiva del techo de la vivienda. Asimismo, se espera poder valorar el mayor costo constructivo de techos con aberturas.

4. REFERENCIAS

[1] Hirunlabh, J., Wachirapuwadon, S., Pratinthong, N., Khedari, J. *New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation*. Building and Environment, vol 36, pp 383–391, 2001.

[2] Ciampi, M., Leccese, F., Tuoni, G.. *Energy analysis of ventilated and microventilated roofs*. Solar Energy, vol 79, pp 183–192, 2005.

[3] Asan, H., Namli, L. *Laminar natural convection in a pitched roof of triangular cross-section: summer day boundary conditions*. Energy and Buildings, vol 33, pp 69-73, 2000.

[4] Oztop H. F, Varol Y., Koca A. *Laminar natural convection heat transfer in a shed roof with or without eave for summer season*. App. Thermal Eng. vol 27, p 2252–2265, 2007.

[5] Berli M., Di Paolo J. y Saita F.A. *Mecánica de fluidos computacional aplicada al diseño térmico pasivo de techos*. I CAIM, Primer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, 1 al 3 de octubre de 2008, Bahía Blanca, Argentina.

[6] Berli M., Di Paolo J. y Saita F.A. *Heat transfer on a naturally cross-driven ventilated triangular cavity with openings*. Journal of Physics: Conferencie Series, vol 166, p 012019, 2009.

[7] Ghiaus C. y Allard F. (Editores). *Natural ventilation in the urban environment*. Ed. Eartscan, Londres, 2005.

[8] Bejan A. *Convection heat transfer*. Ed. Wiley, Hoboken, 2013.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional el apoyo económico recibido para realizar este trabajo en el marco del PID-UTN AMUTIFE 3457TC, “Optimización mediante métodos numéricos de la aislación térmica generada por cavidades con aire” y al Dpto. de Ing. Industrial de la FRSF el constante apoyo logístico.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TERMO-HIDRÁULICO DE NANOFLUIDOS NA REFRIGERAÇÃO DE REATORES NUCLEARES A ÁGUA LEVE

Alexandre Melo de Oliveira, Amir Zacarias Mesquita, Isabela Carolina Reis e Maritza Rodríguez Gual

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN
Av. Presidente Antônio Carlos, 6.627
Campus da UFMG - Pampulha
CEP 31270-901
Caixa Postal 941 - CEP 30161-970
Belo Horizonte - Minas Gerais, Brasil
alexandre.oliveira@cdtn.br, amir@cdtn.br, icr@cdtn.br, maritzargual@gmail.com

RESUMO

O desenvolvimento de nanofluidos é extremamente importante para aprimorar a condutividade térmica dos fluidos base. A condutividade térmica é a principal característica no que diz respeito à capacidade de transferência de calor em nanofluidos. Uma das maneiras de se melhorar a segurança das centrais nucleares está relacionada a melhoraria da sua capacidade de transferência de calor.

O estudo de novos fluidos que melhorem a taxa de remoção de calor é fundamental para se obter maior eficiência de sistemas energéticos. Dentre os diversos fatores que comprometem a eficiência dos sistemas energéticos, podemos destacar as limitações termofísicas dos fluidos convencionais, inibindo de forma bastante significativa algumas aplicações industriais. Neste trabalho pretende-se melhorar as características de transferência de calor de fluidos comumente utilizados, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, em água que é o fluido mais utilizados para refrigeração de reatores nucleares em operação atualmente.

O principal objetivo deste projeto de pesquisa é o estudo teórico e experimental da melhoria na transferência de calor do refrigerante em reatores nucleares, refrigerados à água leve, utilizando nanofluidos. Como suporte ao trabalho será projetado, montado e calibrado uma bancada experimental com intuito de estudar o comportamento termo-hidráulico destes componentes.

Pretende-se melhorar as características de transferência de calor de fluidos habitualmente utilizados, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, em água que é o fluido mais utilizados para refrigeração de reatores nucleares em operação atualmente. Com objetivo de avaliar os seus benefícios para a aplicabilidade e aos sistemas nucleares, ou seja, líquido de refrigeração primária, sistemas de segurança, estratégias de mitigação de acidentes graves.

Palavras Chaves: *Nanofluidos; Eficiência Térmica; Termo-Hidraulica.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de nanofluidos é extremamente importante para aprimorar a condutividade térmica dos fluidos base. A condutividade térmica é a principal característica no que diz respeito à capacidade de transferência de calor em nanofluidos. Uma das maneiras de se melhorar a segurança das centrais nucleares está relacionada a melhoraria da sua capacidade de transferência de calor. Nanofluidos são conhecidos por apresentar possibilidade de transferência de calor superior e são, portanto, investigados para aplicações de engenharia [1,8,14].

O estudo de novos fluidos que melhorem a taxa de remoção de calor é fundamental para se obter maior eficiência de sistemas energéticos. Dentre os diversos fatores que comprometem a eficiência dos sistemas energéticos, pode-se destacar as limitações termofísicas dos fluidos convencionais, inibindo de forma bastante significativa algumas aplicações industriais. Neste trabalho pretende-se melhorar as características de transferência de calor de fluidos comumente utilizados, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, em água leve que é o fluido mais utilizados, atualmente, na refrigeração de reatores nucleares.

A melhoria das propriedades térmicas é limitada pela condutividade térmica do fluido de trabalho. Com objetivo superar tais limitações, diversos estudos de fluidos com partículas sólidas em suspensões vêm sendo realizados, desde a primeira publicação de Maxwell no final do século [2]. Segundo [18], entretanto tais estudos estão limitados à utilização de partículas com escala micro, que apresentam algumas desvantagens como:

- Sedimentação – as partículas após algum tempo sedimentam-se, criando uma camada junto às superfícies reduzindo a capacidade térmica.
- Desgaste – é possível reduzir a sedimentação, através do aumento da velocidade de circulação do fluido, mas com aumento do desgaste dos equipamentos e tubulações, etc.
- Obstrução – devido às dimensões das partículas os canais tendem a ficar obstruídos, particularmente nos estreitos canais de refrigeração.
- Perdas de carga – aumentam de forma bastante significativa.
- Condutividade térmica – é proporcional à concentração de partículas, mas potenciando problemas anteriores.

Os fluidos base, mostrados na Tabela 1, apresentam baixa condutividade térmica quando comparados aos metais.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 1. Condutividade térmica de aditivos e fluidos base em sistemas de nanofluidos

Partículas	**Materiais**	**Condutividade térmica (W/mK)**
Metálicas	Cu	401
	Al	237
	Ag	428
	Au	318
	Fe	83,5
Não metálicas	Al_2O_3	40
	CuO	76,5
	Si	148
	SiC	270
	Nanotubos de carbono	270
Fluido base	H_20	0,613
	Etileno Glicol	0,253
	Óleo de motor	0,145

Fonte: [11]

2. NANOFLUIDOS

Nanofluidos são constituídos por dispersões coloidais com um refrigerante tradicional como uma base na qual as nanopartículas são suspensas. Em 1995, [1], que foi o primeiro a utilizar o termo nanofluidos, publicou os resultados de sua pesquisa teórica. Desenvolvimentos subsequentes em engenharia de nanofluidos contribuíram para o rápido crescimento da nanotecnologia e tecnologias de superfície ao longo da última década [4].

As suspensões coloidais mostraram substancialmente intrigantes do ponto de vista dos desempenhos térmicos, sobre quatro pontos:

1. Aumento da condutividade térmica (aprox. 150%);
2. Aumento monofásico coeficiente de transferência de calor (aprox. 60%);
3. Aumento do fluxo crítico de calor com regime de ebulição nucleada estendida (aprox. 200%);
4. Aumento da eficiência de resfriamento.

Nanofluidos são consideradas como suspensões de nanopartículas num fluido base tal como água. Verificou-se que apresentam propriedades térmicas melhoradas, por exemplo, atuando como líquido de arrefecimento eleva o ponto de fluxo crítico de calor e molhabilidade da superfície em pequenas concentrações, o que é uma característica útil nos reatores nucleares.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Em trabalho recente, [6] avaliaram experimentalmente nanofluidos de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNTs- *Multi-walled Carbon Nanotubes)* a base de água, com concentrações em volume de 0<φ<0,24%, para vazões mássicas de 20g/s até 90g/s. O calor fornecido pela parede do tubo através da resistência na seção de teste variou entre 500 W até 900 W. A avaliação do desempenho termo-hidráulico das três a mostras de nanofluidos testados foi realizada especificando o coeficiente relativo de transferência de calor por convecção, em função da potência de bombeamento relativa obtida nas potências de bombeamento na seção de teste. As três amostras estudadas, apresentaram um incremento na condutividade térmica, em média, de 6,3%, 8,8% e 17% superiores a do fluido base (água destilada). Demostrando o efeito da concentração no aumento desta propriedade. No entanto as três amostras também apresentaram um incremento na viscosidade em média de 8,8%, 17,8% e 11,6%.

Muito tem se estudado a respeito do desempenho da transferência de calor em diversos tipos de escoamento utilizando nanofluidos, constituídos de nanopartículas de diferentes materiais e diversos fluidos base, conforme mostrado na Tabela 2

Tabela 2 - Comparação dos trabalhos realizados que analisaram a transferência de calor por convecção em nanofluidos.

Autor	Faixa de escoamento	Tipo de Nanofluido	Incremento do coeficiente convectivo h (%)
[13]	Turbulento	Al2O3 em água	+45
[20]	Laminar	Al2O3 em água	+47
[21]	Turbulento	SiC em água	-7 para 3.5vol% mesma velocidade
[5]	Turbulento	TiO2 em água	+26 para 1vol% -14 para 2vol%
[16]	Turbulento	TiO2 em água	+22
[19]	Turbulento	Fe3O4 em água	+30,96
[12]	Laminar, transição e turbulento	MWCNTs em água	+33 para 1vol%, mesmo número de Reynolds. -12,6 para 1vol% mesma velocidade.
[7]	Turbulento	TiO2 e Al2O3 em água	+15%, mesmo número de Reynolds. -10%, mesma potência de bombeamento.

Fonte: [6]

Ainda que muitos dos estudos relatados mostrem que houve aumento da transferência de calor por convecção forçada utilizando nanofluidos escoando em regime laminar e turbulento, outras pesquisas mostram inconsistências nos resultados apresentados, ou seja, sob certas condições relatam incremento no coeficiente de transferência de calor e sob outras não apresenta acréscimos ou até mesmo apresentam uma diminuição no coeficiente de transferência de calor por convecção quando nanopartículas são adicionados aos fluidos base. Portanto, ainda são necessários mais estudos que validem e verifiquem o desempenho termo-hidráulico destes novos fluidos de arrefecimento [6].

Foi proposto um projeto conceitual de sistema de resfriamento de emergência do núcleo, a partir da injeção de nanofluido, combinando o sistema de injeção convencional com o mecanismo da injeção de nanofluido sem perda de desempenho e confiabilidade [8]. O resultado deste trabalho apresentou um método para separar o sistema de resfriamento de emergência do núcleo com a instalação de um tanque de injeção nanofluidos adjacente aos tanques de injeção de segurança de tal modo que um ambiente de pH baixo para nanofluidos pode ser mantida à pressão atmosférica, o que é favorável para a sua injeção em forma passiva.

Foi realizado um estudo sobre a utilização de nanofluidos para sistemas de resfriamento de emergência do núcleo, que é uma característica de segurança das centrais nucleares [14]. Tais estudos mostraram que houve um aumento do fluxo de calor crítico, através da injeção de nanofluido em caso de perda da refrigeração por acidente.

Foram obidas experimentalmente as curvas de inibição (temperatura versus tempo) em pequenas esferas (~1 cm) metálicas expostas a agua pura e nanofluidos à base de água com alumina, sílica e nanoparticulas de diamante em baixas concentrações ($\leqslant$0.1 vol%) [9]. As esferas utilizadas eram feitas de aço inoxidável e zircaloy, e foram resfriadas a partir de uma temperatura inicial de ~1000°C. Os resultados mostram que o comportamento de têmpera em nanofluidos é quase idêntica à da água pura. No entanto, verificou-se que algumas nanopartículas acumular na superfície da esfera, o que resulta na desestabilização da película de vapor em testes subsequentes com a mesma esfera, acelerando, assim, muito o processo de resfriamento.

Utilizou-se nanofluidos constituídos de dispersões diluídas de alumina, zircônia, e nanopartículas de sílica em água. Vários parâmetros que afetam a transferência de calor (ponto de ebulição, viscosidade, condutividade térmica, e a tensão superficial de ebulição) foram medidos e de forma consistente com outros estudos nanofluido [10], verificou-se ser semelhante aos de água pura. Entretanto para *pool boiling* experimentos mostraram melhorias significativas do fluxo crítico de calor nos nanofluidos (até 200%).

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.1 Condutividade térmica em sistemas de nanofluidos com adição de nanotubos de carbono

Existem vários métodos para a medição da condutividade térmica, oscilações de temperatura: placas paralelas em regime permanente (*steady-state parallel plate*) e a técnica do fio quente transiente (*transient hot wire*), sendo esta última a mais utilizada [11]. A técnica do fio quente funciona medindo a resposta temperatura/tempo do foi a um pulso elétrico abrupto. Nesta técnica o fio funciona como aquecedor e termômetro, sendo a condutividade térmica calculada através de uma derivação da Lei de Fourier.

Sistemas com suspensão de nanotubos de carbono têm apresentados os valores mais elevados para a condutividade térmica. Um estudo realizado por [3] sobre nanofluidos constituídos de nanotubos de parede múltipla adicionados à óleo, com objetivo de medir a condutividade térmica efetiva. Os resultados experimentais chamaram atenção por serem muito superiores aos indicados pelas previsões teóricas.

Em trabalho recente Rocha *et al.* (2015) estudaram nanofluidos à base de água de Al_2O_3 e ZrO_2 foram caracterizados quanto à sua utilização promissora em aplicações de transferência de calor. Prepararam-se três concentrações diferentes de soluções dispersas de nanofluidos citados (0,01% vol., 0,05% vol., e 0,1% vol.) de nanofluidos comerciais. As medições experimentais foram realizadas a diferentes temperaturas. Condutividade térmica, viscosidade e densidade dos nanofluidos foram medidos. Concluiu-se que a concentração em volume, tamanho de partícula/forma e temperatura são variáveis importantes.

Pretende-se melhorar as características de transferência de calor de fluidos habitualmente utilizados, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, em água que é o fluido mais utilizados para refrigeração de reatores nucleares em operação atualmente. Com objetivo de avaliar os seus benefícios para a aplicabilidade e aos sistemas nucleares, ou seja, líquido de refrigeração primária, sistemas de segurança, estratégias de mitigação de acidentes graves.

2.2 Condutividade térmica em sistemas de nanofluidos com adição de nanotubos de carbono

Existem vários métodos para a medição da condutividade térmica, oscilações de temperatura: placas paralelas em regime permanente (*steady-state parallel plate*) e a técnica do fio quente transiente (*transient hot wire*), sendo esta última a mais utilizada [11]. A técnica do fio quente funciona medindo a resposta temperatura/tempo do foi a um pulso elétrico abrupto. Nesta técnica o fio funciona como aquecedor e termômetro, sendo a condutividade térmica calculada através de uma derivação da Lei de Fourier.

Sistemas com suspensão de nanotubos de carbono têm apresentados os valores mais elevados para a condutividade térmica. Um estudo realizado por [3] sobre nanofluidos constituídos de nanotubos de parede múltipla adicionados à óleo, com objetivo de medir a condutividade térmica efetiva. Os resultados experimentais chamaram atenção por serem muito superiores aos indicados pelas previsões teóricas.

Em trabalho recente [15] estudaram nanofluidos à base de água de Al_2O_3 e ZrO_2 foram caracterizados quanto à sua utilização promissora em aplicações de transferência de calor. Prepararam-se três concentrações diferentes de soluções dispersas de nanofluidos citados (0,01% vol., 0,05% vol., e 0,1% vol.) de nanofluidos comerciais. As medições experimentais foram realizadas a diferentes temperaturas. Condutividade térmica, viscosidade e densidade dos nanofluidos foram medidos. Concluiu-se que a concentração em volume, tamanho de partícula/forma e temperatura são variáveis importantes.

3. CONCLUSÕES

Pretende-se melhorar as características de transferência de calor de fluidos habitualmente utilizados, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, através da adição de nanopartículas, constituídas de nanotubos de carbono, em água que é o fluido mais utilizados para refrigeração de reatores nucleares em operação atualmente. Com objetivo de avaliar os seus benefícios para a aplicabilidade e aos sistemas nucleares, ou seja, líquido de refrigeração primária, sistemas de segurança, estratégias de mitigação de acidentes graves.

4. REFERÊNCIAS

[1] Choi, S.U.S. *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*. Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, New York, 23, 99-105, 1995.

[2] Choi, S.U.S. *Nanofluid Technology: Current status and future research*. Second Korean-American Scientists and Engineers Association Research Trend Study Project Review and the Korea-U.S., Viena-VA, 1998.

[3] Choi, S.U.S.; Zhang, Z. G.; Yu, W.; Lockwood, F. E.; Grulke, E. A.. *Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions*. Applied Physics Letters, 79, 2001.DOI: 10.1063/1.1408272

[4] Chupin, A.; Hu, L.; Buongiorno, J. *Applications of nanofluids to enhance LWR accidents management in in-vessel retention and emergency core cooling systems*. Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, California, 2008.

[5] Duangthongsuk, W; Wongwises, S. *Effect of thermophysical properties models on the predicting of the convective heat transfer coefficient for low concentration nanofluid*. International Communications in Heat and Mass Transf. Vol. 35, 1320–1326. 2008. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.07.015

[6] Gómez, A.O.C.; Bandarra, F.E.P. *Análise Experimental do Desempenho Termo-Hidráulico de Nanofluidos MWCNTs/H2O*. Simpósio do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia-MG, 2014.

[7] Haghighi, E.B.; Utomo, A.T.; Ghanbarpour, M.; Zavareh, A.I.T.; Poth, H; Khodabandeh, R.; Pacek, A.; Palm, B.E. *Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparison of Their Performance*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019

[8] Kang, M.; Changhyun, J.; Sangjun, P.; In, C.B.; Gyunyoung, H.. *Design process of the nanofluid injection mechanism in nuclear power plants*. Nanoscale Research Letters, 6, n. 1, 2011. 363. DOI:10.1186/1556-276X-6-363

[9] Kim, H.; DeWitt, G.; McKrell, T.; Buongiorno, J.; Hu, L.. *On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles*. International Journal of Multiphase Flow, 35, 427-438, 2009. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.02.004

[10] Kim, S. J. Pool boiling heat transfer characteristics of nanofluids, 2007. Disponível em: http://hdl.handle.net/1721.1/41306. Acessado em 05 jan 2016.

[11] Yanjiao, L.; Zhou, J.; Tung, S;, Eric; Xi, Schneider, E.; Shengqi, X. *A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization*. Powder Technology, 196. p89-p101. 2009. DOI:10.1016/j.powtec.2009.07.025

[12] Meyer, J. P.; Mckrell, T. J.; Grote, K. *The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer, n. 58, 597-609, 2013. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.074

[13] Pak, B. C. and Cho, Y. I. *Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles*. Exp. Heat Transfer, n. 11, 151–170, 1998. DOI:10.1080/08916159808946559

[14] Pop, M.G.M.; Brian, G.L. *Nuclear power plant using nanoparticles in closed circuits of emergency systems and related method*, US8160197, 17 Abril 2012.

[15] Rocha, Marcelo S.; Cabral, E. L.; Sabundjian, G.; Yoriyaz, H.; Lima, A. C. S.; Junior, A. B.; Prado, A. C.; Filho, T. M.; Andrade, D. A.; Shorto, J. M. B.; Mesquita, R. N.; Otubo, L.; Filho, B. D. B.; Pinho, P. G. M.; Ribatsky, G.; Moraes, A. A. U. de. *Thermophysical Characterization of Al_2O_3 and ZrO_2 Nanofluids as Emergency Cooling Fluids of Future Generations of Nuclear Reactors*. Proceedings:: 2015 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Nice-France, 2015.

[16] Sajadi, A.R.; Kazemi, M.H. *Investigation of turbulent convective heat transfer and pressure drop of TiO2/waternanofluid in circular tube*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 38, n. 10. 1474–1478. 2011. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.007

[17] SciFinder. *The Choice for Chemistry Research.* Disponível em: https://scifinder.cas.org/ . Acessado em 05 jan 2016.

[18] Silva, B.A.A.D. *Caracterização de nanofluidos do ponto de vista termo-físico*. Universidade de Aveiro, 2010.

[19] Sundar, L.S.; Ramana, E.V.; Singh, M.K.; Sousa, A.C.M. *Magnetic Field Induced Enhancement in Thermal Conductivity and Viscosity of Stabilized Vacuum Pump Oil (VPO)—Fe_3O_4 Magnetic Nanofluids*. Journal of Nanofluids, 4, n. 1. 7-15. 2015. DOI: 10.1063/1.3348387

[20] Wen, D.; Ding, Y. *Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions*. International Journal of Heat and Mass Transfer, n. 47. 5181-5188. 2004. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.07.012

[21] Yu, W.; France, D.M.; Smith, D.S.; Singh, D.; Timofeeva, E.V.; Routborta, J.L. *Heat transfer to a silicon carbide/water nanofluid*. International Journal of Heat and Mass Transfer, n. 52, 3606-3612. 2009. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.036

Agradecimentos

Os autores destacam o agradecimento as seguintes instituições brasileiras: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e Instituto Nacional para Reatores Nucleares Inovadores (INCTRNI).

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANÁLISIS DE FALLA DE PISTONES DE MOTORES DIESEL MODERNOS

Martín Caldera, Juan M. Massone y Ricardo A. Martinez.

Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de Mar del Plata - UNMdP
Av. Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Argentina
correo-e: mcaldera@fi.mdp.edu.ar.
INTEMA -CONICET

RESUMEN

Las exigencias del mercado automotor actual, para lograr una mayor potencia específica de los motores modernos, combinada con un bajo consumo y reducción en las emisiones, han llevado al desarrollo de motores diésel turboalimentados con inyección directa de alta presión. Como consecuencia de esto, aumentaron las solicitaciones en las piezas más comprometidas del motor.

En particular, la temperatura y las cargas que sufren los pistones de los motores actuales, durante el proceso de conversión de energía, provocan mayores solicitaciones de dicho componente. En la literatura se han desarrollado varios mapas de temperatura, los mismos muestran que generalmente en la cavidad de la cabeza del pistón ("Bowl"), las temperaturas superan los 350ºC. En el labio del "Bowl", se localizan los valores máximos de temperatura. Los elevados valores de temperatura (de naturaleza fluctuante), generan deformaciones locales que se suman a las generadas por los esfuerzos mecánicos a los que está sometido el componente. Con este marco de solicitaciones al pistón que se denomina usualmente “fatiga termomecánica”, se generan fisuras en las zonas más comprometidas las que conducen a la falla catastrófica del pistón en algunos casos.

En este trabajo se ha realizado un análisis de este tipo de falla encontrado en pistones de modernos vehículos comerciales.

En este trabajo se estudiaron pistones fallados pertenecientes a un mismo modelo de motor. Para ello se realizó un análisis metalúrgico del material de los pistones fallados y se comparó con la microestructura de un pistón nuevo, sin uso. Permitiendo analizar el efecto que la temperatura introduce al material disminuyendo su resistencia a la fatiga.

Posteriormente se estudió el mecanismo de fractura actuante. Para ello se analizaron imágenes de SEM tomadas de la superficie de fractura generada por la falla.

Palabras Claves: *Motores Diesel, Pistones, Fallas, Materiales.*

1. INTRODUCCIÓN

Los actuales requerimientos de potencia específica en conjunto con bajos consumos y emisiones conducen a los modernos motores Diesel que utilizan inyección directa y turbocompresores. Esto hace que el diseño y operación de esta generación de motores sea más compleja y que sus componentes mecánicos estén expuestos a requerimientos más severos que los motores de años atrás.

Estos motores producen potencias específicas del orden de 80 KW/l y más, lo cual resulta en presiones media efectivas por sobre los 20 bar y presiones pico de entre 170 a 200 bar.

El pistón en estas máquinas, es el primer componente en la línea de generación de potencia, comenzando por la presión en su cabeza debido a la energía química liberada por el combustible durante el proceso de combustión. Esta corona representa la pared móvil de la cámara de combustión y esta rigurosamente sometida a cargas de origen térmico además a los ampliamente estudiados esfuerzos mecánicos producidos por el movimiento alternativo del motor.

Algunos aspectos son examinados en esta sección de manera de establecer las bases del análisis desarrollado en este trabajo.

En primera instancia se considera la forma de los pistones. Los motores modernos usan émbolos donde la corona misma representa la cámara de combustión que ha conducido a una forma que presenta un bowl (A) tallado en esta cabeza. (Figura 1)

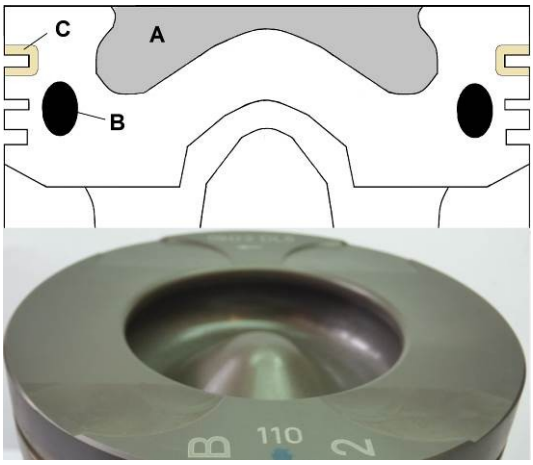


Figura 1. Tipo de pistón analizado.

La forma de este bowl trabaja sobre el movimiento del aire durante la admisión (swirl) y controla el squish durante la carrera ascendente de compresión, antes del comienzo de la combustión y que el pistón sea empujado hacia abajo. De esta manera el aire se mueve en un vórtice dentro del pistón provocando un mejor mezclado una vez que se inyecta el combustible.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los bowls tienen una variada cantidad de formas que afectan la mezcla aire – combustible y de esta manera es posible obtener una mejor combustión, reflejada en términos de mayor potencia con economía de combustible.

Esta forma de conversión de energía causa un aumento muy rápido de la presión y temperatura dentro de la cámara. Se alcanzan temperaturas pico en el rango de 2000-2500ºC o aún mayores, cayendo rápidamente aunque los gases de escape salen a elevadas temperaturas (700-1000ºC).

El calor es principalmente transmitido a través de las paredes de la cámara y la cabeza del pistón por convección, existiendo fluctuaciones de temperatura entre 10 y 40ºC [1]. El calor en la corona del pistón es principalmente liberado al fluido refrigerante siguiendo el camino pistón-aro- pared y una pequeña parte es trasferida a la carga fresca de gas que ingresa en un nuevo ciclo operativo.

El aceite lubricante que moja las paredes internas del pistón, absorbe otra parte y en algunos diseños fluye e través de galerías internas del pistón, detrás de los aros. (B en la Figura 1).

Varios mapas de temperatura han sido publicados mostrando temperaturas que rondan los 400ºC en el bowl del pistón utilizado en los motores del tipo estudiado en este trabajo (Figura 2).

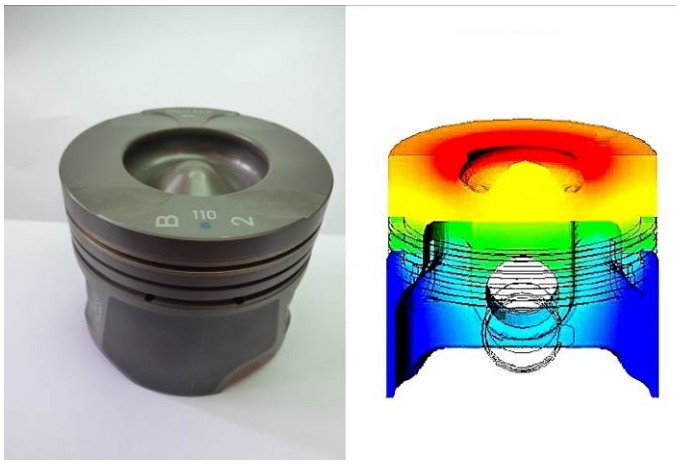


Figura 2. Mapa de temperaturas de funcionamiento.

El campo de temperaturas generado en la corona (zona roja) produce deformaciones que contribuyen a incrementar las distorsiones generadas mecánicamente. Así ambas componentes trabajan en conjunto produciendo la alteración de tamaños desde la pollera hasta la corona del émbolo.

El ciclo térmico provocado en el labio del bowl sumado a las restricciones que provoca la deformación inhibida en zonas adyacentes más frías causan la fluencia del material en puntos específicos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las cargas mecánicas incluyen la presión de los gases, las fuerzas inerciales y fuerzas transmitidas en el perno asociados a la línea de trasmisión, generando un mapa de estado de tensiones complejo.

Las fuerzas de presión alcanzan 180-200 bar, las velocidades del pistón pueden alcanzar hasta 25 m/s a temperaturas de unos 400ºC, transmitiendo vía el perno hacia el cigüeñal [1]. Analizando este estado del pistón es fácil darse cuenta que se provoca una ovalización del componente.

Estas condiciones operativas requieren de un diseño con los correctos espesores que sean capaces de prevenir excesiva deformación. Considerando nuevamente que el pistón es una parte móvil su peso debe estar acotado para minimizar los esfuerzos inerciales al mínimo posible.

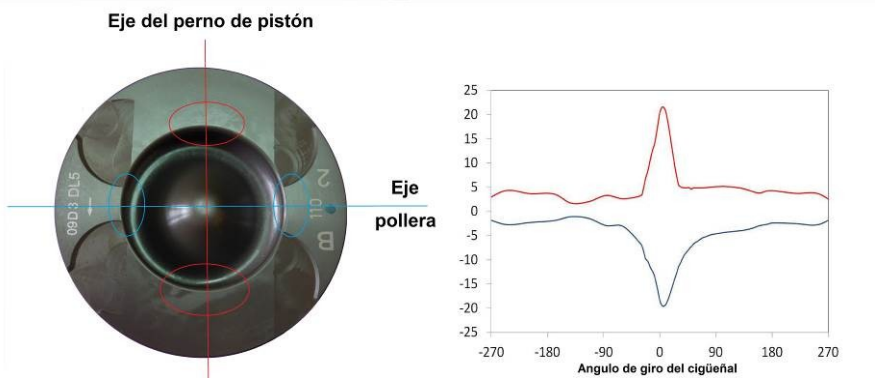


Figura 3. Mapa tensional en la cabeza del pistón.

La Figura 3 esquematiza una distribución de tensiones típica en la cabeza del pistón, donde es posible observar que la tensión de tracción es concentrada en la dirección del perno (indicada con color rojo) mientras que en el eje perpendicular estos esfuerzos son compresivos (indicados con color azul). Esta figura es solo representativa y debe ser entendida solo con el propósito de detectar las zonas más comprometidas.

En motores modernos de este tipo las ranuras de los aros de compresión está afectados fuertemente por los esfuerzos generados, necesitando que el aluminio del que están construidos sea reforzado en estas zonas. Los diseñadores han adoptado una solución que consiste en reforzar la primera ranura haciéndola de fundición de hierro (Ni resist – zona "C" de la Figura 1).

Las condiciones operativas enunciadas hasta aquí podrían inducir daño durante los servicios originados a partir de las distintas fuentes señaladas localizándose principalmente en el perno, la cabeza, ranuras de aros o en la pollera.

Tradicionalmente, los daños sufridos en pistones son atribuidos a desgaste, problemas de inyección y lubricación, la fatiga es también responsable de un número significativo de fallas en pistones [2].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Bajo las condiciones expuestas los materiales utilizados para su fabricación son aleaciones específicas para el uso, no utilizadas en otros componentes mecánicos. Los pistones son producidos colados o forjados de aleaciones de aluminio – silicio resistentes a alta temperatura.

Los materiales de pistón más comunes deben cumplir un compromiso entre una serie de demandas contradictorias. Las aleaciones de Al-Si (predominantemente eutécticas) son empleadas de manera casi exclusiva para la fabricación de pistones. Alta conductividad, baja densidad y resistencia a alta temperatura son algunas de las buenas propiedades de estas aleaciones.

2. CASO DE FALLA ANALIZADO EN ESTE TRABAJO

2.1 Condiciones operativas

El pistón analizado en este trabajo corresponde a un motor Diesel utilizado en una camioneta mediana. La marca y modelo no serán revelados, aunque las especificaciones técnicas mostradas permitirán el entendimiento del ambiente bajo el cual se produjo la falla.

Se trata de un motor de cuatro cilindros con pistones de 96 mm de diámetro con un volumen de cilindrada de 3 litros que brinda una potencia máxima de 170 HP a 3600 r.p.m. y 350 Nm de troque durante un buen rango de r.p.m.

El motor está equipado con un turbocompresor de geometría variable e intercooler que asiste al proceso de renovación de la carga. La cámara de combustión consiste en un bowl en la parte superior del pistón y el suministro de combustible se realiza por un inyector central con ocho toberas radiales.

El bowl es simétrico y el émbolo tiene tres aros, dos de compresión y un rasca aceite. Un inserto de fundición de hierro Ni resist refuerza la ranura del primer aro de compresión. Detrás de los aros existe una galería de refrigeración por aceite que es alimentado por agujeros en la parte inferior.

El motor bajo estudio fue operado en nuestro país donde el combustible utilizado es una mezcla con 10% de Biodiesel basado en las normativas vigentes (ley nacional 26093 incisos 7 y 8)

2.2 Evento de falla analizado

La situación analizada trata de pistones que presentan una falla repetitiva utilizados en tareas rurales luego de 150000-180000 km de uso.

La falla se presenta con el aspecto mostrado en la Figura 4 donde es posible observar un agujero dentro del bowl. Este agujero comunica el interior del bowl con las ranuras del segundo aro de compresión y el rasca aceite pasando a través de la galería de refrigeración, estando siempre la falla en la dirección del perno de pistón.

ISBN: 978-987-1676-63-7

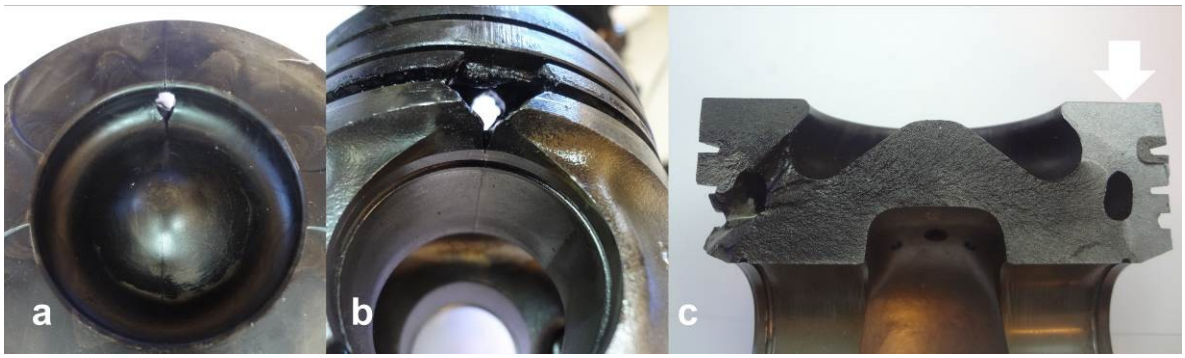


Figura 4. Aspecto de la falla estudiada en este trabajo.

Una vez que el motor se desarma es posible detectar que la fisura propagante ha avanzado produciendo casi la separación del pistón en dos partes.

3. METODOLOGIAS UTILIZADAS

Varios pistones con el mismo patrón de falla fueron analizados y comparados con un pistón sin uso con el propósito de establecer el grado de daño introducido durante el servicio dado por el motor.

Los pistones analizados permanecieron en una pieza ligados por un remanente que sobrevivió al proceso de fractura, las mitades fueron separadas con el objetivo de observar las superficies de fractura y de esta manera identificar el o los lugares donde se inicia el proceso de propagación.

Además se analizaron pistones que funcionaron en el mismo motor sin haber reportado la falla.

Las tareas realizadas incluyeron por otra parte la determinación de la composición química, con el objetivo de conocer el material del cual están fabricados lo émbolos, se realizaron tintas penetrantes para detectar fisuras, se tomó la dureza del pistón en diversas secciones, se prepararon muestras para observar la microestructura mediante microscopía óptica de diferentes zonas y las superficies de fractura se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

La composición química fue determinada por medio de un espectrómetro de emisión por chispa BAIRD DV6. El material bajo estudio se trata de una aleación de aluminio casi eutéctica ASi12CuNIMg comúnmente utilizada para este propósito.

La microestructura que presenta un pistón nuevo y otro en el que se observa la falla se pueden observar en la Figura 5 con diferentes magnificaciones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

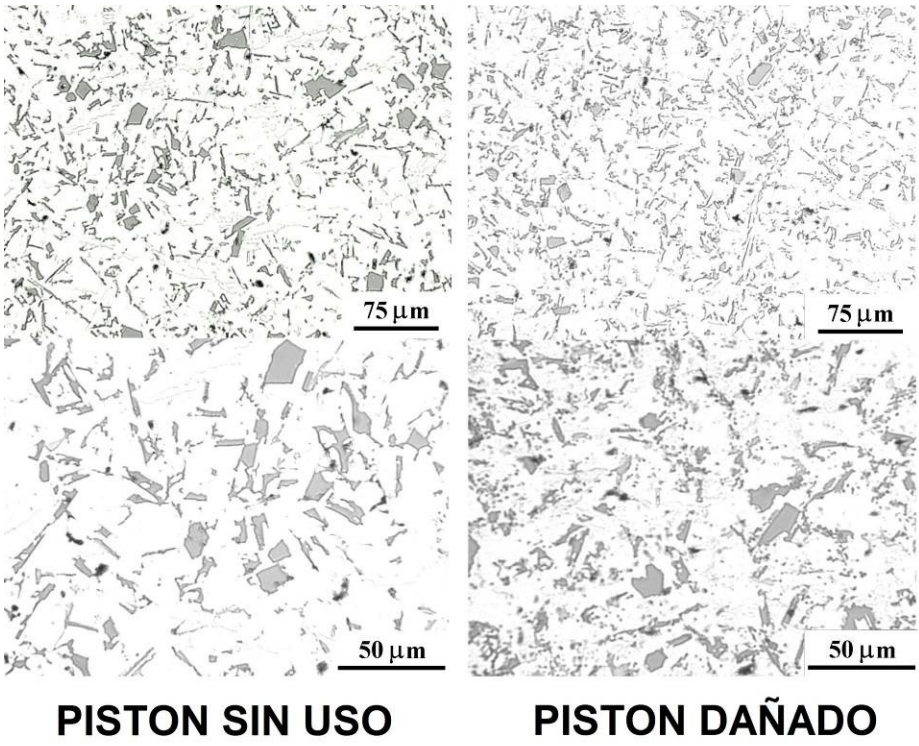


Figura 5. Microestructura observada en los pistones

La estructura del material está caracterizada por dendritas de fase α (solución sólida Al(Si), compuestos intermetálicos eutécticos (α+Si eutéctico) y partículas de silicio primario.

Las fases intermetálicas tienen el rol de elevar la resistencia del material utilizado en la fabricación de los pistones. Estas fases son térmicamente estables y las mismas bloquean el deslizamiento de los granos Al – α afectando los límites de grano. Algunas de estas fases intermetálicas encontradas en estas aleaciones son frecuentemente Mg_2Si, Al_7Cu_4Ni, Al_3CuNi, Al_3Ni, Al_2Cu y otras [3,4].

Se ha reportado que la adición de elementos tales como Cu, Mg, Mn, Fe y Ni ayudan a mejorar las propiedades de las aleaciones utilizadas en la fabricación de pistones [5].

Por ejemplo, la adición de Cu y Mg perfeccionan la resistencia dado que precipitan una fina fase secundaria. Por otro lado el Ni mejora la tolerancia a temperaturas elevadas mientras que el Cu potencia la resistencia a la corrosión [6].

Durante la solidificación de estas partes, algunas pequeñas microporosidades podrían ser observadas. Sin embargo, estas no fueron observadas en las zonas cercanas a la superficie, donde la falla del pistón ha ocurrido, donde podrían haber actuado como iniciadores del proceso de fisuración.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Por otra parte, las partículas de SI primario que son duras y frágiles están distribuidas en espacios interdendríticos. Estas si favorecen la generación de fisuras superficiales como se puede observar en la Figura 6. Estas fisuras tempranas se propagan a través de la matriz bajo las severas condiciones a las que se encuentra expuesto el pistón (fatiga termomecánica) durante la operación del motor.



Figura 6. Inicio de fisura producido en partícula de Si primario

Comparando las microestructuras descriptas de la Figura 5 es posible observar las diferencias en la zona del labio del bowl. Por ejemplo el espaciado de los brazos secundario es más reducida en el caso del pistón que presento la falla.

Las fases intermetálicas parecen haber sufrido un proceso de disolución mostrando como, en principio, agudas esquinas se han vuelto redondeadas. Esta transformación metalúrgica es debida a la alta temperatura a la que el componente está sometido, lo cual produce una degradación en la resistencia del material y fisuras nucleadas, tal como las observadas en la Figura 6, que conducen a una falla mayor (Figura 7).



Figura 7. Progreso de fisura observado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La caída en los valores de dureza medidos en la zona del bowl confirma este proceso de degradación en cuanto a la resistencia del material, los valores van desde 123HBw en el pistón sin uso cayendo hasta 63HBw luego del período de uso del mismo.

El porcentaje de Biodiesel presente en el combustible utilizado, se cree que tiene influencia despreciable en el proceso de falla como para considerarlo un factor a tener en cuenta. Se podría además esgrimir que el uso de biodiesel podría hasta ser beneficioso disminuyendo las temperaturas de operación, lo que redundaría en un funcionamiento menos perjudicial.

Los chorros de la inyección dejan claras marcas en la cabeza del embolo tal como se puede observar en la Figura 8. Estos chorros que inicialmente se proyectan dentro del bowl progresan dejando unas marcas (plumas) que son observadas en la parte plana de la cabeza y se generan cuando continúa la inyección y el pistón está en su carrera descendente de expansión.

No es evidente la existencia de un movimiento de swirl demasiado intenso dentro de la cámara de combustión aunque pareciera haber una desviación leve en el sentido contrario a la agujas del reloj.

La Figura 8 no permite detectar algún problema en el sistema de inyección dado que las plumas son todas muy similares en los 8 rastros visibles y tampoco pareciera que algún inyector estuviera obstruido.

Otro aspecto surgido de este patrón de marcas es que en todos los casos la falla se produce entre dos plumas originadas por los chorros de inyección.



Figura 8. Marcas de los chorros de inyección.

Las fisuras tienen su origen en el labio del bowl y progresan como o muestra la flecha en la Figura 9 siguiendo una dirección radial con centro en la punta del labio. Las fisuras progresan en dos posibles direcciones, una yendo hacia el diámetro exterior del pistón y la otra hacia abajo, encontrando salida en la galería de refrigeración de aceite interna del pistón, es muy probable que en ese momento se produzca una llama continua que primero funde y luego erosiona al material,

ISBN: 978-987-1676-63-7

agrandando el agujero que luego encuentra salida entre el segundo aro de compresión y el aro rasca aceite.

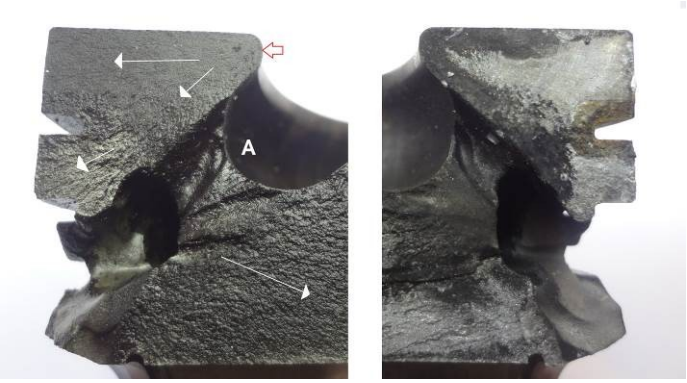


Figura 9. Aspecto de la fractura.

La superficie de fractura es plana al principo mostrando luego de algún avance algunas macro estriaciones.

Las zonas debajo del primer aro de compresión y luego de abrir el agujero pasante muestran marcas tipo contains chevron.

La temperatura que se alcanza en estas áreas ronda los 400ºC, de esta manera el efecto combinado de tensiones y temperaturas junto con las evidencias mostradas anteriormente, y que surgen del presente análisis de fallas, permiten asegurar que la falla se debe a una degradación del material del pistón luego del tiempo al que ha estado sometido a las severas condiciones, impuestas por su funcionamiento.

5. CONCLUSIONES

Se trata sin duda de un problema inherente a las severas condiciones a las que se exponen estos componentes en motores de última generación. Estas llevan a que la fatiga termomecánica sea la responsable de la rotura.

La falla comienza en las partículas primarias de Si y se ve favorecida por la degradación de la estructura, producto del proceso que sufren los compuestos intermetálicos presentes.

La notable degradación producida por las altas temperaturas, manifestada por la disminución de dureza comparada con un pistón sin uso, es un factor que conduce a la falla.

Las altas tensiones causadas por los esfuerzos combinados, a los cuales está sometido el componente, contribuyen a la ocurrencia del suceso analizado.

Para contrarrestar este problema, se podría recomendar algún tratamiento de afinamiento de la microestructura en la zona del labio del bowl.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La adición de Cu podría extender la vida del componente ya que mejoraría su resistencia a la fatiga.

Otras alternativas, como los pistones de materiales compuestos de matriz metálica, podrían aportar una solución aunque más onerosa.

6. REFERENCIAS

[1] Silva F. S., C. et al, Fatigue on engine pistons – A compendium of case studies , Engineering Failure Analysis, vol. 13, pp. 480–492, 2006.

[2] Handbook of Diesel Engines. Klaus Mollenhauer _ Helmut Tschoeke, editores. ISBN 978-3-540-89082-9. © Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.

[3] N.A. Belov, D.G. Eskin, N.N. Avxentieva, Constituent phase diagrams of the Al–Cu–Fe–Mg–Ni–Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys, Acta Materialia, Vol. 53, pp 4709–4722, 2005.

[4] G. Rajaram, S. Kumaran, T. Srinivasa Rao, Effect of graphite and transition elements (Cu, Ni) on high temperature tensile behaviour of Al–Si Alloys. Materials Chemistry and Physics, Vol. 128, pp 62–69, 2011.

[5] E.H. Dix Jr., Physical Metallurgy of Aluminium Alloys, American Society for Metals, pp. 200, 1958.

[6] Mbuya T. O. et al, Micromechanisms of short fatigue crack growth in an Al–Si piston alloy, Materials Science & Engineering, A 612, pp. 302–309, 2014.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONICET y a la Universidad Nacional de Mar del Plata por el financiamiento otorgado.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INFLUENCIA DEL USO DE BIODIESEL EN COMPONENTES DE MOTORES DE CICLO DIESEL.

Martín Caldera, Ricardo A. Martinez y Ariel Stochi

Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata
Av. Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Argentina
correo-e: mcaldera@fi.mdp.edu.ar.
INTEMA -CONICET

RESUMEN

El biodiesel se plantea como una alternativa al combustible Diesel debido a su carácter renovable y biodegradable. Entre sus principales ventajas se encuentran la disminución en la producción de CO2, y la no emisión de SO2, debido a que no contiene azufre. Puede ser utilizado puro (B100) o mezclado con Diesel en diferentes concentraciones. Por ejemplo B20 significa una mezcla con 20% de biodiesel y 80% de Diesel. Sin embargo el uso de estas mezclas podría afectar a los componentes metálicos de la cámara de combustión y a algunos polímeros, produciendo su degradación.

El objetivo de este trabajo es estudiar cómo afecta el uso de mezclas con biodiesel sobre las propiedades de componentes del motor, tales como las partes poliméricas y sobre el aceite lubricante.

Se realizaron ensayos mecánicos a muestras de diferentes polímeros, utilizados en partes del sistema de alimentación de combustible de motores Diesel, expuestas a diferentes tiempos de contacto con biodiesel. En particular se realizaron ensayos de absorción de combustible en mangueras y su influencia en las propiedades mecánicas finales. Los resultados obtenidos muestran la mayor absorción y pérdida de propiedades mecánicas cuando las mezclas combustibles poseen mayor cantidad de biodiesel.

Por otro lado, se realizaron ensayos químicos al aceite del motor en distintas etapas de un ensayo de larga duración, realizado en banco de pruebas con el objetivo fue determinar la posible contaminación del mismo y variación de sus propiedades lubricantes.

A partir de los datos obtenidos con los diferentes ensayos, se obtendrán conclusiones respecto al comportamiento de los materiales que mantienen contacto con el biodiesel, y definir su grado de influencia sobre los mismos.

En base a estas conclusiones, se busca poder determinar que materiales y lubricantes serían los más convenientes para emplear en motores y sistemas de inyección Diesel, que utilizan como combustible cortes gasoil-biodiesel.

Palabras Claves: Biodiesel, Motores Diesel, Materiales, Degradación, Propiedades.

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales que experimenta nuestro planeta son causados fundamentalmente por el efecto invernadero, el mismo consiste en el proceso por el cual ciertos gases de la atmósfera retienen gran parte de la radiación emitida por la Tierra y la remiten de nuevo a su superficie, calentándola. Actualmente, el CO_2, presente en la atmósfera, está creciendo en gran forma debido a diferentes actividades desarrolladas por el hombre, pero principalmente por la combustión de carbón, petróleo y gas natural, proceso que libera el carbono de estos combustibles fósiles.

Por otro lado, es de conocimiento público que los combustibles fósiles son un recurso limitado, y es cierto que con los niveles extremadamente crecientes en el consumo de este tipo de combustibles la escasez del petróleo se torna cada vez más próxima [1]. En las últimas tres décadas, se ha notado un fuerte interés en lograr una disminución en el consumo innecesario de combustibles fósiles y un mejor aprovechamiento de la energía. Un claro ejemplo, es la mejora en la eficiencia de funcionamiento de los motores de combustión interna, la disminución en el tamaño y peso de los automóviles, etc.

Actualmente gobiernos y científicos de los países más desarrollados trabajan en pos de evitar estos inconvenientes. Un ejemplo de ello es el desarrollo de fuentes de energía alternativas, “renovables”, que permitan: en primer lugar disminuir la generación de gases que aportan al aumento del efecto invernadero, y en segundo lugar disminuir o al menos mantener el consumo desmedido de las fuentes de energía no renovables [1-2]. Las tendencias más importantes marcan el uso de combustibles generados a partir de biomasa, los cuales son 100% renovables, llamados biocombustibles. Dentro de estos podemos encontrar el biodiesel, aceite vegetal (biooil), el bioetanol, el biogas, y el gas pobre. El biodiesel puede ser utilizado puro (B100) o mezclado con diesel en diferentes concentraciones. Por ejemplo B20 significa una mezcla con 20% de biodiesel y 80% de diesel. Si bien los bajos niveles de producción de estos combustibles hacen imposible el reemplazo total de los derivados del petróleo, ayudan a minimizar el consumo de estos últimos y fundamentalmente ayudan a evitar la generación de gases nocivos para la atmósfera [2-6]. En nuestro país la legislación existente (Ley Nacional 26093/06, artículos 7 y 8) estableció para principios del 2010 un uso obligatorio de cortes 5% de biodiesel en el gasoil y 5% de bioetanol en las naftas [7].

Los autores de este trabajo han realizado estudios previos sobre un motor de ciclo diésel [8 y 9]. El primer trabajo consistió en realizar ensayos de prestaciones del motor operando con gasoil y diferentes mezclas gasoil-biodiesel. Se observaron tendencias que marcan una leve caída de los valores de potencia y cupla motriz cuando aumenta el porcentaje de biodiesel de la mezcla, por

ISBN: 978-987-1676-63-7

otro lado el consumo específico aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de biodiesel en el corte. Además muestran que la temperatura de los gases de escape disminuye al aumentar el porcentaje de biocombustible, lo cual se justifica por el menor poder calorífico de este combustible [3]. Finalmente se evidencia una menor emisión de CO al incrementar el porcentaje de biocombustible lo cual queda justificado por la presencia de átomos de oxígeno en la molécula de biodiesel [2].

La bibliografía referente a los biocombustibles es abundante, sin embargo pocos trabajos se enfocan en optimizar el motor de combustión interna, ciclo Diesel, desde el punto de vista mecánico y de la ingeniería de los materiales, para mejorar su rendimiento y durabilidad, cuando este funciona con biocombustibles o cortes biodiesel–gasoil.

La compatibilidad del biodiesel con los materiales utilizados en los motores debe ser un punto de atención. En relación con los materiales poliméricos, por ejemplo podemos encontrar los utilizados en el sistema de combustible. Estos materiales son susceptibles al ataque de varios químicos y pueden traer aparejada su degradación, con influencia en sus propiedades físicas y estabilidad, que conllevan a posibles fallas importantes de la máquina. [10, 11]

Algunos autores [12] han trabajado utilizando mezclas de combustibles diesel-biodiesel investigando la dureza y la resistencia a la elongación de varios elastómeros. En algunos observaron cambios sus propiedades físicas, mientras que en otros como los poipropilenos no han encontrado efecto negativo del uso de biocombustibles

Otros estudios han mostrado que el uso de biodiesel produce la hinchazón de los elastómeros (como trilobutyl-dilene, gomas acrílicas y HNBR- hydrogenated nitrile rubber) aún en mezclas tan bajas como B10, esto indica que hay una relación compleja entre biodiesel y los elastómeros y existen algunos datos contradictorios en la bibliografía, por lo que es de interés realizar estudios adicionales en este aspecto [13]. Bajo estas circunstancias, la absorción del combustible así como la extracción de componentes solubles de los mismos, tales como plastificantes, son diferentes para cada tipo de polímero.[14,15]

El control de la degradación del aceite lubricante, durante su uso, es un tema fundamental para prolongar la vida del motor de combustión interna. En particular se pretende identificar las propiedades del aceite que se ven alteradas con el cambio del tipo de combustible.

Han sido reportados valores [16] sobre la variación en la viscosidad, la misma disminuye con las horas de funcionamiento. Otro parámetro importante, la densidad, que aumenta con el tiempo de funcionamiento, pudiendo esto justificarse por el aumento de las partículas de desgaste y el

ISBN: 978-987-1676-63-7

contenido de humedad del aceite lubricante. En este caso, la tendencia creciente disminuye cuando el motor es operado con un corte B20.

1.1. Objetivos del trabajo

Determinar los efectos de la utilización de biocombustibles (biodiesel y cortes biodiesel-gasoil) sobre las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos de las piezas del sistema de alimentación. Estudiar la contaminación del aceite lubricante del motor, con su correspondiente detrimento de las propiedades lubricantes, al utilizar biodiesel como combustible.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El combustible utilizado para todos los estudios fue gasoil grado 3, de la petrolera YPF, el cual contenía al momento de la realización de los ensayos, un porcentaje de 7,5% de biodiesel (B7,5). La medición de mencionados porcentajes se realizó con un equipo marca Delphi modelo YDT 553. El Biodiesel, a base de aceite de soja, cumple con las normas internacionales ASTM 6715 y EN 14214.

Para la realización de los ensayos de absorción se sumergieron muestras (peso nominal 15 gramos) y probetas de diferentes materiales en recipientes conteniendo cinco diferentes cortes: a) B7,5, b) B25, c) B50, d) B75, e) biodiesel (B100). La cinética de absorción de fluido por parte de los materiales fue seguida por medio de mediciones gravimétricas en al menos cuatro muestras utilizando una balanza analítica con una precisión de ± 0,01 mg.

Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente. Las muestras se retiraron de su envejecimiento una hora antes de la prueba con el fin de lograr el equilibrio térmico. Los tiempos máximos de envejecimiento fueron de 4200hs. (Aproximadamente 6 meses)

Para la determinación de las propiedades mecánicas de las probetas se realizaron ensayos de tracción según la norma ASTM D3039M – 95 sobre probetas de sección completa en mangueras. Se utilizó un dinamómetro marca Instron, modelo 4467. La velocidad de ensayo fue de 50 mm/min. Se obtuvieron registros tensión-deformación, a partir de los cuales se calcularon el módulo elástico y la resistencia a la tracción del material. Asimismo se registró la carga máxima en todos los casos.

Los ensayos de funcionamiento se realizaron en el laboratorio de Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería de la UNMdP, sobre un motor marca Pertrak 4-203. Se empleó un freno dinamométrico hidráulico, marca Go-Power de 500 hp de capacidad. El motor funcionó durante 40 horas con un corte B50 y se extrajeron muestras de aceite lubricante cada 10 horas de funcionamiento. El aceite lubricante utilizado fue de la petrolera YPF, "Extravida XV100", 15W40.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El análisis de las 4 muestras de aceite se realizó en el laboratorio de análisis de aceites del Arsenal Naval Mar del Plata.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Ensayos de absorción:

En la Figura 1 se pueden apreciar los resultados obtenidos para la absorción de biodiesel para la manguera de tela-poliéster (manguera negra). En todos los casos se aprecia una marcada absorción en las primeras etapas del ensayo, denotada por el incremento de masa de la muestra, seguida por una pérdida de masa hasta la estabilización. Asimismo es posible apreciar que se logró un equilibrio en la absorción solamente para los cortes más bajos de biodiesel (B7,5 y B25). El porcentaje final de aumento de masa se situó cercano al 4% en el caso del B7,5, y del 6% en el caso del B25.

En el caso de cortes B50 y superiores se puede observar que no se alcanzó el equilibrio, aún para tiempos de exposición prolongados, con una pendiente aproximadamente lineal luego de la estabilización, que se produjo aproximadamente a las 1000hs en todos los casos. La forma de la curva también muestra que el proceso es irreversible e induce cambios de masa significativos debido a procesos de difusión.

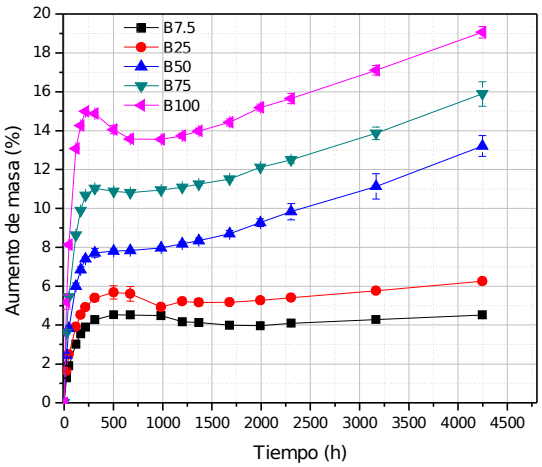


Figura 1: Absorción de biodiesel para la manguera de tela-poliéster

En la Figura 2 se pueden apreciar los resultados obtenidos para la absorción de biodiesel para la manguera de policloruro de vinilo (PVC) (manguera amarilla). Se puede apreciar en todos los casos un aumento de peso que indica una absorción del combustible, seguido por una importante baja en el peso total de las muestras para cortes superiores a B50. Esta baja puede explicarse por

ISBN: 978-987-1676-63-7

una disolución y migración de componentes del polímero tales como plastificantes (que otorgan flexibilidad) y colorantes por parte de los componentes más livianos presentes en el biocombustible.

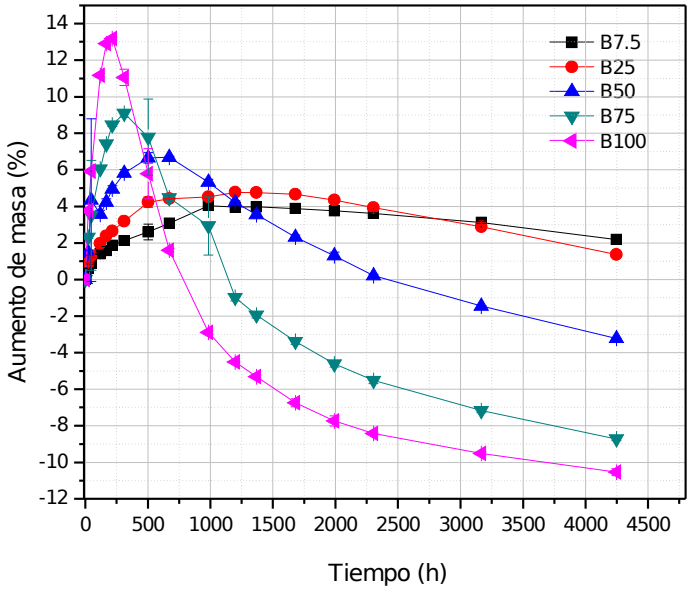


Figura 2: Absorción de biodiesel para la manguera de *PVC*

3.2. Comportamiento mecánico:

En la figura 3 se pueden apreciar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de la manguera tela-poliéster. Las dos primeras barras corresponden a los valores de las probetas no expuestas a ningún combustible antes del ensayo, (s/exp). Es posible observar una importante disminución de propiedades mecánicas, haciéndose más notorio este efecto en cortes superiores a B50, coincidentemente con la mayor absorción observada para dichos cortes. En cuanto a la elongación máxima se puede apreciar que los valores tienden a estabilizarse para cortes superiores a B25, posiblemente debido a que estas mangueras poseen tela como refuerzo el cual impide mayores deformaciones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

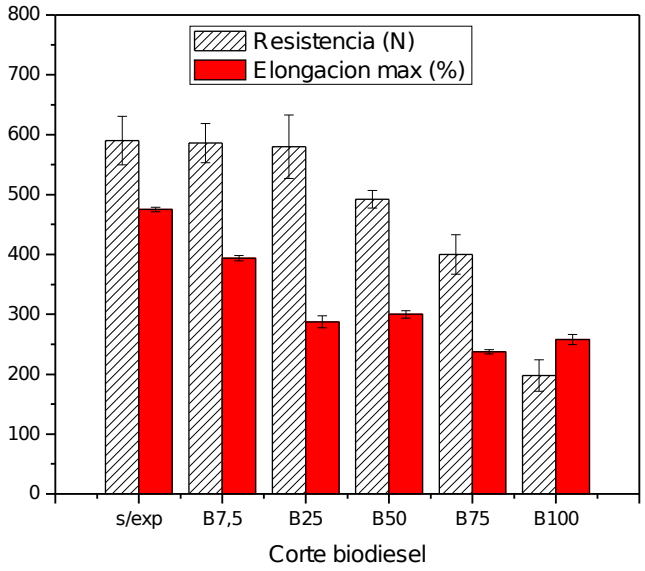


Figura 3: Propiedades mecánicas de la manguera de tela-poliéster

En la figura 4 se pueden apreciar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de la manguera de PVC. Es posible observar que las cargas máximas se mantienen, no registrándose pérdida importante en la resistencia. En cambio, el comportamiento en deformación se ve afectado, corroborando el hecho de migración de plastificantes, haciéndose más notorio este efecto en cortes superiores a B50, coincidentemente con la mayor absorción y posterior pérdida de masa observada para dichos cortes. Asimismo se observaron cambios en la coloración de las mangueras ensayadas confirmando la migración de colorantes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

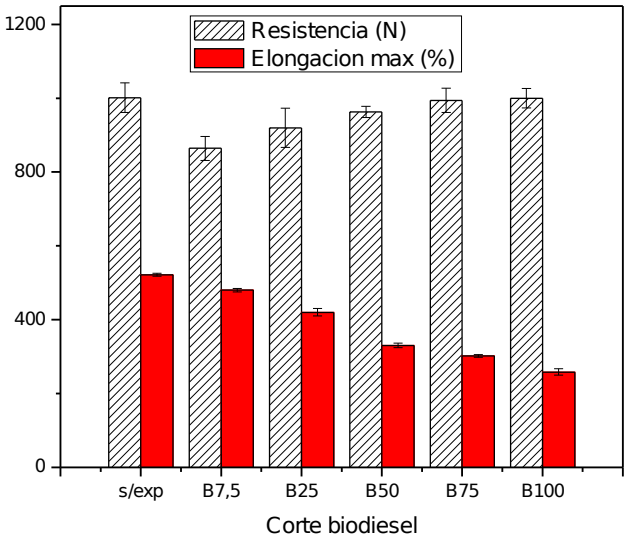


Figura 4: Propiedades mecánicas de la manguera de PVC

3.3. Ensayos de aceite lubricante:

La Tabla 1 muestra los valores de las diferentes propiedades del aceite lubricante analizadas luego de 10, 20, 30, y 40 horas de uso con combustible B50. Además se muestran los valores correspondientes al aceite nuevo (antes de uso).

Con respecto a la viscosidad a 40ºC se nota una primer tendencia a la disminución y luego un incremento, alcanzando valores finales similares a los iniciales. Sin embargo la viscocidad a 100ºC muestra una leve tendencia al incremento. Ambos resultados son contradictorios a lo esperado que es una disminución de la viscocidad con el tiempo de uso, debido a la disolución del lubricante con combustible. [16]

Por otro lado, los valores de densidad no se ven afectados durante el tiempo de funcionamiento analizado. Aunque sería de esperar que los valores de densidad aumenten a causa de las partículas de desgaste "debris" y la humedad que aumenta en contenido con el uso del aceite.

Los análisis realizados no revelan variaciones significativas en el contenido de humedad del fluido lubricante. La humedad en el lubricante causa efectos corrosivos sobre las partes metálicas del motor y degradación de los aditivos del aceite lubricante. El aumento del contenido de humedad se debe fundamentalmente a la diferencia de temperatura del aceite y del aire ambiente, en conjunción con el fenómeno físico de la presión de vapor de la humedad ambiente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Finalmente, el punto de inflamación hace evidente una leve tendencia a la disminución, con el funcionamiento, en este caso la tendencia coincide con la marcada en la bibliografía [16]. La disminución del punto de inflamación con el uso, se fundamenta en la dilución del aceite con combustible, esta dilución debilita las fuerzas de Van der Waal`s de los enlaces de la molécula de lubricante facilitando la vaporización del mismo.

Tabla 1. Variación de las diferentes propiedades del aceite lubricante con las horas de ensayo.

Horas de ensayo	0 (aceite nuevo)	10	20	30	40
Viscosidad a 40ºC (cSt)	**164,38**	**155,54**	**116**	**126**	**159,8**
Viscosidad a 100ºC (cSt)	**15**	**15,1**	**15**	**15,2**	**16**
Indice de Viscosidad	**90**	**97**	**133**	**124**	**103**
Densidad (gr/ml)	**0,895**	**0,895**	**0,898**	**0,897**	**0,898**
Agua por destilación (%)	**1 % Max**	**Trazas**	**Trazas**	**0,1**	**0,1**
Punto de inflamación (ºC)	**230**	**230**	**208**	***215***	***210***

De lo analizado anteriormente podemos concluir que la duración del ensayo realizado no ha sido suficiente, como para marcar tendencias definidas sobre las variables estudiadas.

3. CONCLUSIONES

-El ensayo de absorción de las probetas de tela-poliéster (manguera negra), en todos los casos muestran una marcada absorción en las primeras etapas del ensayo, seguida por una pérdida de masa hasta la estabilización.

-Se logró un equilibrio en la absorción solamente para los cortes más bajos de biodiesel (B7,5 y B25). El porcentaje final de aumento de masa se situó cercano al 4% en el caso del B7,5, y del 6% en el caso del corte B25.

-En el ensayo de absorción de las probetas de manguera de policloruro de vinilo (PVC) (manguera amarilla), en todos los casos se puede apreciar un aumento de peso seguido por una importante baja en el peso total de las muestras para cortes superiores al B50.

-Los ensayos mecánicos realizados sobre probetas de la manguera tela-poliéster muestran una importante disminución de propiedades mecánicas, haciéndose más notorio este efecto en cortes

ISBN: 978-987-1676-63-7

superiores a B50. En cuanto a la elongación máxima se puede apreciar que los valores tienden a estabilizarse para cortes superiores a B25.

-Los ensayos mecánicos de la manguera de PVC evidenciaron que las cargas máximas se mantienen, no registrándose pérdida importante en la resistencia. En cambio, el comportamiento en deformación se ve afectado en cortes superiores a B50.

-Se observaron cambios en la coloración de las mangueras ensayadas confirmando la migración de colorantes.

-Los ensayos de degradación del aceite lubricante mostraron una disminución de viscosidad seguida de un aumento luego de varias horas, la densidad y el porcentaje de humedad no se ven alterados y el punto de inflamación tiene una leve tendencia a la disminución con las horas de funcionamiento.

-Se propone para trabajos futuros realizar ensayos de funcionamiento más prolongados y contrarrestar los valores con gas oil puro o comercial (B7,5).

4. REFERENCIAS

[1] Demirbas, Ayhan. (2009). “Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review”. *Applied Energy. vol 86. pp 108-117.*

[2] Agarwal, Avinash. (2007). "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for Internal combustion engines". *Progress in Energy and Combustion Science. vol 33. pp 233-271.*

[3] Murillo, S.; Miguez, J.; Porteiro, J.; Granada, E.; Moran, J. (2007). "Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines". *Fuel. vol 86. pp 1765-1771.*

[4] Romano, S.D.; Gonzáles Suárez, E. (2009) “Biocombustibles líquidos en Iberoamérica”. Ediciones Cooperativas, Capital Federal, Argentina. ISBN 978-987-652-043-0.

[5] Demirbas, Ayhan. (2000). “Conversion of biomass using glycerin to liquid fuel for blending gasoline as alternative engine fuel”. Energy Convers Manage. vol 41. pp 1741-1748.

[6] Agrawal, A. K.; Das, L.M. (2001). “Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines”. Trans ASME. vol 123. pp 440-447.

[7] Revista encrucijadas, Universidad de Buenos Aires (UBA), Vol 45.

[8] Caldera, M.; Bour, M.; Castagnaro, E.; Martinez, R.. (2012). “Estudio de prestaciones de motor diésel alimentado por cortes gasoil-biodiesel”. *3º Congreso CAIM 2012,* Buenos Aires, Argentina,

02 al 05 de Octubre de 2012. 4º Congreso CAIM 2014, Resistencia, Chaco, Argentina, 02 al 05 de Septiembre de 2014.

[9] Caldera, M.; Bour, M.; Castagnaro, E.; Martinez, R.. (2014). "Estudio del funcionamiento de un motor diesel con recubrimiento cerámico parcial de la cámara de combustión alimentado por cortes gasoil-biodiesel".

[10] Thomas EW, Fuller RE, Terauchi K. Fluoroelastomer compatibility with biodiesel fuels. SAE Technical paper No. 2007-01-40061.

[11] Mitra S, Ghanbari-Siahkali A, Kingshott P, Rehmeier HK, Abildgaard H, Almdal K. Chemical degradation of crosslinked ethylene-propylene-diene rubber in an acidic environment, part I: effect on accelerated sulphur crosslinks. Polymer Degradation and Stability 2006;91(1):69e80.

[12] Bessee GB, Fey JP. Society of Automotive Engineering; 1997. Technical paper No. 971690.

[13] Shafer A. Biodiesel research Mercedes Benz-engine warranty policy. Presented at commercialization of biodiesel: establishment of engine warranties, University of Idaho National Center for Advanced Transportation Technology;1994:125e41.

[14] Trakarnpruk W, Porntangjitlikit S. Palm oil biodiesel synthesized with potassium loaded calcined hydrotalcite and effect of biodiesel blend on elastomer properties. Renewable Energy 2008;33:1558e63.

[15] Frame E, McCormick RL. Elastomer compatibility testing of renewable diesel fuels. National Renewable Energy Laboratory; 2005. Technical Report NREL/ TP-540e38834. www.nrel.gov/vehiclesandfuels/npbf/pdfs/38834.pdf.

[16] Avinash Kumar Agarwal, *Lubricating Oil Tribology of a Biodiesel-Fuelled Compression Ignition Engine*, Fall Technical Conference, ASME Internal Combustion Engine Division and Rail Transportation Division, Erie, Pennsylvania, USA, 07 al 10 de Septiembre de 2003.

Agradecimientos

Se agradece al CONICET y a la Universidad Nacional de Mar del Plata por el financiamiento otorgado, al "Arsenal Naval Mar del Plata" por los análisis de aceite lubricante y a la empresa Patagonia Bioenergía S.A. por la donación del biodiesel utilizado.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANALISIS EXERGETICO DE SISTEMAS INDUSTRIALES DE AIRE COMPRIMIDO

Alderetes Carlos O.*[1]

[1] Planta Piloto de Ingeniería Química – Universidad Tecnológica Nacional (UTN)
Facultad Regional Resistencia
French 414 – (H3500CHJ)- Resistencia, Chaco
correo-e: calderetes@gmail.com

RESUMEN

El aire comprimido se usa en diversas aplicaciones comerciales, medicinales e industriales y está considerado como el cuarto servicio auxiliar (facilities) en importancia junto a la energía, agua y vapor. Este servicio, independiente de sus funciones operativas, representa un consumidor de energía de relevancia, ya que se estima consume en promedio entre el 10-15% de la energía de una planta industrial, llegando en algunos casos hasta el 20%

En el presente trabajo y tomando como referencia al Segundo Principio de la Termodinámica y siguiendo los lineamientos del estándar ASME EA4-2010: Energy Assessment for Compressed Air Systems, se analiza exergéticamente un sistema industrial de aire comprimido perteneciente a una planta fabricante de bebidas carbonatadas. El análisis exergético permitirá llevar a cabo procesos de benchmarking con plantas similares y evaluar su optimización energética

En la primera parte del trabajo se analizan las principales operaciones y equipos involucrados, se plantean las ecuaciones principales y se determinan las principales perdidas de exergía en la instalación. En la segunda parte, y tomando como base el diagnóstico inicial, se plantean las reformas y/o cambios que deben implementarse en las instalaciones y operaciones a los efectos de minimizar las pérdidas de exergía y el consumo de energía de la planta. Posteriormente, se presentan los ahorros de energía y el aumento global de eficiencia energética y exergética del sistema. Finalmente, el trabajo muestra la importancia de implementar estas herramientas de análisis conjuntas para abordar la optimización exergética del proceso

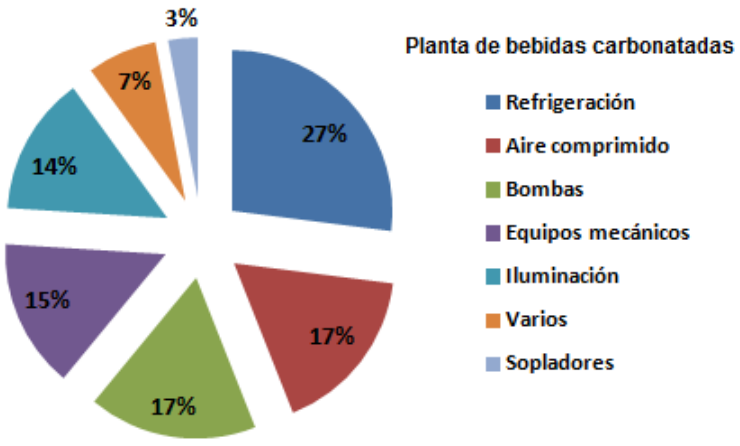
Palabras Claves: *aire comprimido, exergía, optimización, costos.*

1. INTRODUCCIÓN

El uso racional de los combustibles y de la energía constituye una preocupación esencial de todos los países tanto desarrollados como en vías de desarrollo. El escenario nacional muestra un pronóstico de demanda creciente tanto de energía y combustibles como de precios también. Esta preocupación por la racionalización energética y los problemas ambientales asociados, llevó a que en el año 2009 la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) publicara cuatro nuevos estándares: Energy Assessment for Industrial Systems destinados a los facilities industriales y luego la Organización Internacional de Estandarización (ISO) publicara en el 2011 una nueva Norma ISO 50001:2011 – Energy Management Systems al respecto [1],[2]

Es en este contexto, donde los sistemas industriales de aire comprimido adquieren particular importancia ya que este servicio demanda entre el 10-15% en promedio de la energía total consumida por la planta [3]. Una de las industrias que presenta un gran potencial de ahorro energético en sus servicios es la fabricación de bebidas carbonatadas. La elaboración de estos productos demanda energía eléctrica y térmica para sus operaciones. La figura Nº 1 muestra una típica distribución del consumo de energía eléctrica en las mismas y en la que puede observarse que el sistema de aire comprimido demanda el 17% de la energía total de la planta [4]
Las embotelladoras de bebidas carbonatadas son grandes consumidoras de aire comprimido ya que más del 75% del volumen producido en el país se envasa en botellas de PET [5]

Figura 1 “Composición del consumo de energía de la planta”



Con el propósito de optimizar energéticamente el sistema de aire comprimido de la planta embotelladora, se consideraron las recomendaciones y metodología establecida en el estándar

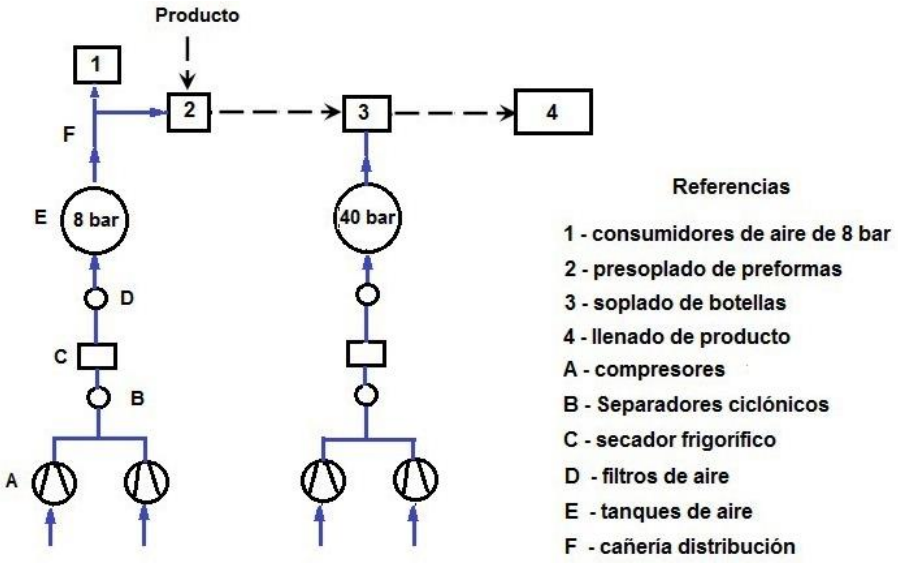
ISBN: 978-987-1676-63-7

ASME EA4-2010: Energy Assessment for Compressed Air Systems. Este estándar identifica tres subsistemas funcionales (generación, distribución y consumo) o niveles de jerarquía a través de los cuales se irán efectuando las mediciones y relevamiento de datos.

2. ANÁLISIS DEL CASO

Para este análisis se tomaron los datos de una planta embotelladora de mediana capacidad, en donde las características operativas e instalaciones de aire comprimido se muestran en la figura Nº2 y en la tabla Nº1

Figura 2 “Esquema del sistema de aire comprimido”



El aire comprimido en la planta se usa principalmente para:

- ✓ Presoplado y soplado de las botellas de PET (tereftalato de polietileno)
- ✓ Transporte, acomodamiento y llenado de botellas
- ✓ Mandos neumáticos
- ✓ Instrumentación
- ✓ Usos generales en planta

ISBN: 978-987-1676-63-7

Una característica interesante de este sistema es la necesidad de contar con aire comprimido a dos niveles de presión y caudales. Estas demandas son:

- Etapa de baja presión (0.8 MPa) para el presoplado de las preformas de PET mediante compresores a tornillo (FAD = 1x16 Nm^3/min x 110 Kw + FAD = 1x10 Nm^3/min x 75 Kw)
- Etapa de alta presión (4 MPa) para el moldeo del material PET mediante compresores a pistón de tres (3) etapas (FAD = 1x25 Nm^3/min x250 Kw + FAD = 1x17 Nm^3/min x200 Kw)
- FAD = free air delivery; Nm^3 = metros cúbicos en condiciones normales (0ºC; 0.101 MPa)

Esta condición debe ser satisfecha con dos equipos de compresión tecnológicamente diferentes que a su vez tienen eficiencias termodinámicas distintas. El reto es buscar la mejor combinación que otorgue confiabilidad operativa al menor costo energético. Estas operaciones en plantas de gran capacidad y modernas son realizadas en equipamiento de soplado que permiten usar solamente compresores de alta presión con recupero de aire en baja presión

Tabla 1 “Datos principales de las instalaciones”

Datos de producción		**Datos de las instalaciones**	
Volumen producción	240.000.000 l. / año	Capacidad de soplado	8000 botellas /h
Días de operación	330 días / año	FAD en alta presión*	42 Nm3 / min
Tiempo efectivo operación	22 horas / día	Tanque de alta presión	10.000 litros
Consumo energía	0.38 MJ / l.bebida	FAD en baja presión*	26 Nm3/ min
Líneas de producción PET	4	Tanque de baja presión	5000 litros

*FAD: free air delivery

3. BALANCE DE MASAS Y ENERGÍA

En la figura Nº 3 se esquematiza el sistema de aire comprimido a través del cual se plantearán los balances de masas, energía y exergía

El balance de masas está dado por:

$$Gau = Ge - (Gac + Gc + \Sigma Gp) \quad (1)$$

El balance de energía es:

$$Ee + Eaf + Es = Eu + Ep + Qc + Qaf + Qs \quad (2)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

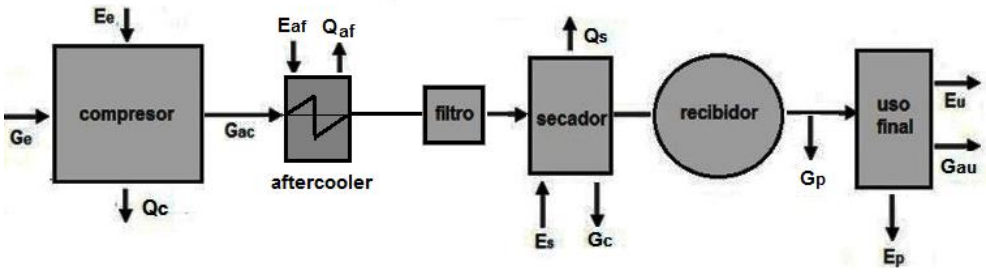
Eficiencia global del sistema (%):

$$\varepsilon = 100 * \frac{Eu}{Ec + Eef + Es} \quad (3)$$

Donde:

- Ge, Gac, Gc, Gau y Gp representan respectivamente los flujos másicos de aire aspirado, aire comprimido, condensado, aire utilizado y aire de fugas en [kg/s]
- Eu, Ee, Eaf, Es, y Ep representan respectivamente, la energía útil en el sistema, la energía suministrada al compresor, aftercooler, al secador frigorífico y pérdidas varias de energía en [kwh] y Qc, Qaf,v Qs indican el calor eliminado en el proceso de compresión, postenfriamiento y secado del aire en [kwh]

Figura 3 “Esquema para el balance de masas y energía”



En el sistema de aire comprimido, el término Ep incluye pérdidas varias tales como, las pérdidas por caídas de presión en la distribución, en los elementos de filtración y regulación, las pérdidas por fugas y por presión en exceso. Se obtienen por medición directa y estimaciones en base a datos de los fabricantes de equipos [6], [7], [8]

4. BALANCE DE EXERGÍA

Para este balance es preciso definir las condiciones de referencia del medio ambiente y se fijaron las siguientes: presión atmosférica P_o = 0.1 MPa y temperatura ambiente T_o = 298 K (25ºC). El balance exergía consiste en determinar las pérdidas en los siguientes procesos:

- ✓ Compresión del aire (estado de carga y vacío según el duty cycle de cada equipo)
- ✓ Cambios en las condiciones de aspiración y/o descarga
- ✓ Post enfriador y secado del aire

ISBN: 978-987-1676-63-7

- ✓ Procesos transitorios de carga y descarga de los tanques amortiguadores de la demanda
- ✓ Fugas de aire por falta de estanqueidad
- ✓ Caídas de presión en la distribución del aire
- ✓ Caídas de presión en los elementos de tratamiento y regulación del aire

Despreciando los cambios de exergía cinética y potencial, la exergía específica del aire comprimido para un sistema cerrado está dada por la ecuación siguiente [9-13]

$$a = (u - u_o) + P\,(v - v_o) - T_o\,(s - s_o) \tag{4}$$

$$a = R.T_o.\ln\frac{P}{P_o} + R.T.\frac{P_o}{P} + R.T_o\left[\frac{\left(\frac{T}{T_o} - k - k.\ln\frac{T}{T_o}\right)}{k-1}\right] \tag{5}$$

donde: u, v, s: representan la energía interna, volumen y entropía específica del aire en [kJ/kg] en las condiciones de proceso y a las del medio ambiente de referencia. Las variables P y T representan la presión y temperatura absoluta del aire en las condiciones de proceso y de referencia en [MPa] y [ºK] respectivamente y R la constante del aire en [kJ /kgºK]

Analizando la ecuación (5) y calculando los coeficientes de sensibilidad de la exergía específica respecto a la presión y temperatura del aire comprimido y respecto de la temperatura ambiente, esto es:

$$\Delta p = \frac{\partial a}{\partial P}, \qquad \Delta t = \frac{\partial a}{\partial T}, \qquad \Delta t_o = \frac{\partial a}{\partial T_o} \tag{6}$$

Haciendo un análisis de sensibilidad vemos que, dando un aumento del 1% para cada variable manteniendo constante las demás, la exergía aumenta en mayor proporción en el siguiente orden y cuando:

- ✓ sube la presión del aire
- ✓ aumenta la temperatura ambiente
- ✓ baja la temperatura del aire

Por lo contrario, la exergía específica disminuye cuando:

- ✓ baja la presión del aire
- ✓ baja la temperatura ambiente
- ✓ aumenta la temperatura del aire

ISBN: 978-987-1676-63-7

Despreciando los cambios de exergía cinética y potencial, la exergía específica del aire comprimido para un sistema abierto está dada por:

$$b = h - h_o - T_o\,(s - s_o) = c_p\,(t - t_o) - T_o\,(c_p.\ln\frac{T}{T_o} - R.\ln\frac{P}{P_o}) \qquad (7)$$

Donde: b, h y s: representan la exergía, entalpía y entropía específica del aire en [kJ/kg], en las condiciones de proceso (P y T) y a las del medio ambiente de referencia (P_o, T_o)

El balance de exergía para un sistema abierto se puede escribir como

$$\Sigma G_i.b_i = \Sigma G_s.b_s + \Sigma E_p \qquad (8)$$

$$\Sigma E_p = \Sigma G_i.b_i - \Sigma G_s.b_s = T_o \Sigma \Delta S_{irr} \qquad (9)$$

Donde: Gi, Gs, b_i, b_s representan los flujos másicos y exergías específicas de las corrientes que ingresan y egresan del sistema en [kg/sec] y [kJ/kg] respectivamente. El término ΣE_p representa la exergía perdida en el sistema y el factor ΔS_{irr} representa el aumento de entropía del sistema analizado [kJ/sec.K]. A partir de las ecuaciones generales veremos las pérdidas de exergía en cada componente del sistema en función del potencial que cada uno representa.

5. BALANCE EXERGETICO DEL SISTEMA

- El balance de exergía del compresor y after cooler está dado por:

Compresor:

$$G_i.b_i + N_c = G_s.b_s + E_p \qquad (10)$$

$$N_c = (h_1 - h_2) / \eta_{ad}.\eta_{mec}.\eta_v \qquad (11)$$

Rendimiento exergético:

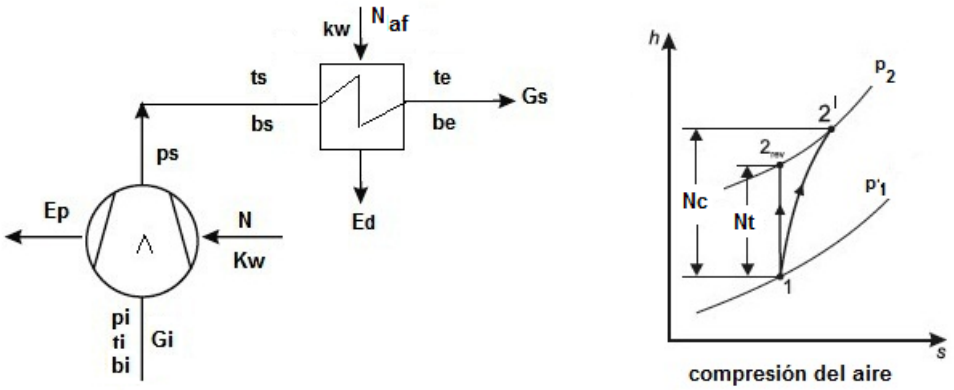
$$\varepsilon_c = [G_i\,(b_s - b_i) / N_c]\,100 \qquad (12)$$

Aftercooler:

$$N_{af} + G_s.b_e = G_s.b_s + E_p \qquad (13)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Figura 4 “Esquema del compresor y aftercooler”



- La exergía perdida en el secador de aire está dada por

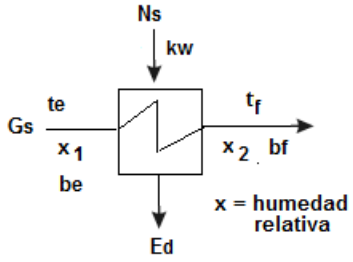
Secador frigorífico:

$$Gs.be + Ns = Gs.bf + Ep \quad (14)$$

Rendimiento secador frigorífico:

$$\varepsilon s = [Gs\ (bs - bi) / Ns]\ 100 \quad (15)$$

Figura 5 “Esquema del secador frigorífico”



.

La exergía perdida en los tanques de amortiguación y ecualización de la demanda de aire constituyen sistemas abiertos en estado transitorio y se aplican tanto en los procesos de carga como descarga de los mismos. La pérdida está dada por el proceso de mezcla entre la corriente

que ingresa y la masa acumulada en el tanque. Depende de la acumulación en el tanque, de la diferencia de presión entre las corrientes y de la frecuencia del proceso de llenado y vaciado
El balance de exergía en los tanques de aire comprimido viene dado por

Acumulación:

$$Ga = Gi - Gs \quad (16)$$

$$Ep = (Gi - Gs)(bs - bi) \quad (17)$$

Las pérdidas de exergía por pérdidas de carga en las cañerías de transporte y distribución y en los elementos de tratamiento del aire y su regulación (ciclones, filtros, reguladores, etc.) se pueden considerar como sistemas adiabáticos. Esta pérdida se calcula como:

$$Ep = - To.R \ln \frac{P2}{P1} \quad (18)$$

Las pérdidas de exergía por fugas se calculan teóricamente como la descarga a través de un orificio en la que el aire comprimido se expande hasta equilibrarse con la atmósfera. En la práctica puede valorizarse como igual al flujo de exergía que se fuga al exterior en el punto donde tiene lugar, esto es:

$$Ep = Gax.bx \quad (19)$$

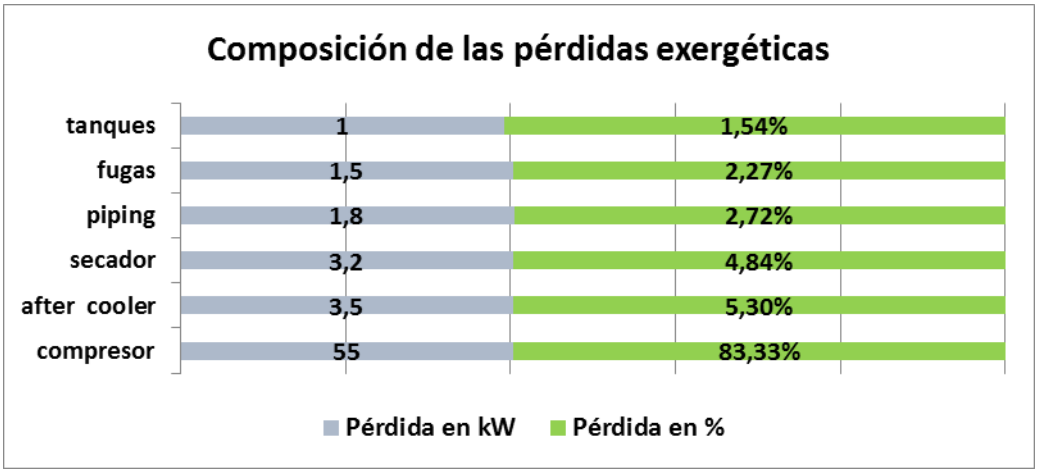
A partir de las ecuaciones planteadas y de los relevamientos de planta se ha calculado las pérdidas de exergía en el sistema cuyos resultados se resumen en la tabla Nº2 y la figura Nº6

Tabla 2 “Balance exergético sistema aire comprimido”

Balance exergético	**Línea 0.8 MPa**	**Línea 4 MPa**
Exergía ingresada	155 kw	439 kw
Exergía recuperada sistema AC	89 kw	259 kw
Exergía útil en el soplado	174 kw	
Exergía perdida sistema AC	66 kw	180 kw
Exergía perdida en el soplado	174 kw	
Rendimiento exergético proceso	29.30%	
Índice pérdida del proceso	70.70%	
Rend. exergético compresor	62.70%	64%
Rend. exergético aftercooler	96.72%	93%
Rend. exergético secador	96.70%	97.65%

ISBN: 978-987-1676-63-7

Figura 6 “composición de pérdidas exergéticas – línea de 0.8 MPa”



Como se observa en el gráfico, la mayor pérdida exergética está centrada en los equipos de compresión principalmente, en donde se focalizarán las acciones de mejora

El Ciclo de Vida de los Costos (LCC) de los sistemas de aire comprimido, muestra que el consumo de energía eléctrica representa alrededor del 75% de los costos totales, razón por la que es imperativo reducir las pérdidas de exergía en el proceso [15]

6. OPTIMIZACIÓN EXERGÉTICA

Los compresores a tornillo trabajan con un ciclo de 80% del tiempo en marcha y de 20% en vacío, mientras que los compresores a pistón lo hacen a razón de 70 a 30% (duty cycle). La marcha en vacío implica un rendimiento exergético nulo, es decir pura pérdida de exergía. En la tabla Nº3 se resume la situación de los compresores en estos dos estados de carga

Tabla 3 “variación del rendimiento exergético en estado de carga / vacío”

Parámetro	Línea de 0.8 MPa	Línea de 4 MPa
Potencia en carga	143 kW	430 kW
Potencia en vacío	37 kW	126 kW
Potencia promedio	122	339
Rendimiento exergético a plena carga	62,70%	64%
Rendimiento exergético promedio	58.36%	53.48%

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para evitar el deterioro exergético que implica la marcha en vacío, se propone:

- Reemplazo del sistema actual de control (carga /descarga) por un sistema de velocidad variable con control maestro computarizado, que permita regular el flujo conforme a la demanda y evitar la marcha en vacío, ordenando la parada y arranque de los equipos. Con un sistema de control de velocidad variable puede ahorrarse según las experiencias implementadas, hasta un mínimo de 20% de la energía requerida por el sistema, lo que significa un ahorro de 620 MWh anuales
- En el aftercooler se podrá recuperar 54 kWh para calentar 900 kg/h agua de 20 a 70ºC para usos diversos en planta tales como limpieza de tanques, preparación de jarabe o simplemente para precalentar el agua de alimentación a calderas. Esto significa un ahorro de 392 MWh / año que contribuye a reducir el consumo de energía térmica
- Otra alternativa es fraccionar el proceso de compresión en la línea de alta presión, instalando una etapa de compresión como booster de (0.1- 0.8 MPa) mediante compresores a tornillo y alimentar a un compresor que eleve la presión desde estos valores hasta los 4MPa. Con esta disposición, se reemplaza en la primera etapa de compresión el consumo específico de 8-9 kW /Nm^3.min de un compresor a pistón, por otro de 5-6 kW /Nm^3.min dada por el compresor a tornillo. De esta forma se obtiene una reducción del consumo de unos 100 Mwh anuales
- Para evitar el arranque de los compresores debido a las fugas en el sistema durante los períodos no productivos, deberá instalarse a la salida de los tanques una válvula pilotada y temporizada por reloj que asegure la estanqueidad del mismo. Limitamos así la pérdida por fuga y se ahorran otros 10 MWh anuales
- Resumiendo, con una demanda de energía de 3100 Mwh anuales en los compresores, es posible ahorrar en estos ítems, unos 1100 Mwh anuales, lo que implica una reducción del 35% en los costos energéticos

Otros sectores de pérdidas tales como el secado del aire, pueden ser optimizados. Los secadores de masa térmica dan una mejor performance energética que los secadores frigoríficos estándares. Cada mejora deberá valorizarse financieramente a los efectos de juzgar la conveniencia de la inversión, más aún en un contexto de precios en alza e importación de energía y combustibles como el que tiene lugar en el país

El sistema analizado es típico en plantas embotelladoras de capacidad pequeña o mediana en las que las soluciones propuestas pueden tener lugar, ya que en las plantas de gran capacidad y de buen nivel de modernización, la planta de soplado opera solamente en alta presión y recupera parte del aire comprimido en baja presión (0.6 o 0.8 MPa) para las etapas posteriores, teniendo en

ISBN: 978-987-1676-63-7

estos casos un bajo consumo específico y una mejor eficiencia energética que las instalaciones citadas

7. CONCLUSIONES

Las plantas embotelladoras de bebidas carbonatadas son importantes consumidoras de energía eléctrica en sus instalaciones de soplado PET. Utilizando la evaluación energética estandarizada por la Norma ASME E4-4-2009 junto al análisis exergético, es posible identificar y valorar las pérdidas energéticas en los sistemas de aire comprimido y enfocar las acciones de mejora continua tendientes a reducirlas y optimizar la performance exergética de los mismos. En el caso analizado es posible reducir hasta un 35% el consumo de energía eléctrica mediante la aplicación de las herramientas citadas

8. REFERENCIAS

[1] ASME EA4-2010: Energy Assessment for Compressed Air Systems. Published by the American Society of Mechanical Engineers, NY- 2009
[2] ISO 50001-2011: Energy Management Systems. Published by ISO
[3] Improving Compressed Air System Performance. Published by the U.S. Department of Energy, 2003. Website: www.eere.energy.gov/industry
[4] Gangj Ahmad. Energy Conservation Opportunities in Carbonated Soft Drink Canning / Bottling Facilities. Houston, Texas, 2002. Disponible en: www.baseco.com
[5] Ablin Amalie – Revista Alimentos Argentinos, Nº 58. http:// www.alimentosargentinos.gov.ar /contenido/revista/pdfs/58/bebidaoriginal.pdf
[6] Scales W. et al – Best Practices for Compressed Air Systems. Second Edition, 2007 Published by Compressed Air Challenge, U.S.
[7] Screw Compressors – Kovacevik & Stocik. Edit.Springer Verlag, 2007
[8] Bloch Heinz – A Practical Guide to Compressors Technology. Edit by John Wiley Sons, 2006
[9] Baehr H._Kabelac – Thermodynamik. Edit. Springer Verlag, 2006
[10] Mayinger Franz – Thermodynamik. Edit. Springer Verlag, 2006
[11] Bejan Adrian – Advanced Engineering Thermodynamics. Edit by John Wiley Sons, 2006
[12] Andrianova T. et al – Problemas de Termodinámica Técnica. Editorial Mir Moscú, 1977
[13] Carranza Alberto, et.al – Exergía del aire comprimido. Revista Scientia et Technica, Año 10, Nº25, 2004 – Colombia

[14] Baehr.H – Ein exergie-entropie diagramm für luft. Revista Chemie-Ing.Tech.Nº33, 1961 / Nº5, página 335-338

[15] 7th International Conference on Compressors and their Systems. City University London, 2011. Edit. Woodhead Publishing Limited. UK

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Calderas a bagazo. Proyecto, operación y mantenimiento

Alderetes Carlos O.*[1]

[1] Planta Piloto de Ingeniería Química – Universidad Tecnológica Nacional (UTN)
Facultad Regional Resistencia
French 414 – (H3500CHJ)- Resistencia, Chaco
correo-e: calderetes@gmail.com

RESUMEN

El actual escenario energético argentino muestra una reducción de reservas de combustibles fósiles, un aumento de importaciones de energía y de combustibles y precios no sustentables. Este panorama exige inmediatos cambios en la política energética y es en este marco en donde la biomasa tiene una gran importancia para cogenerar, ya que su uso implica disminuir las importaciones y generar nuevos ingresos por la venta de energía excedente a la red pública. La instrumentación reciente de la Ley 27.191 (Fomento de fuentes de energías renovables para generación de energía) a través del Decreto 531/2016, pone en evidencia estas necesidades en materia energética

La industria azucarera dispone de importantes volúmenes de bagazo y residuos de cosecha cañera (RAC) para ser usados con este propósito, tal como sucede en el resto de los países azucareros del mundo, en donde en algunos de los cuales se llega a generar hasta más del 5% de la energía total requerida por el país usando estos recursos (Brasil)

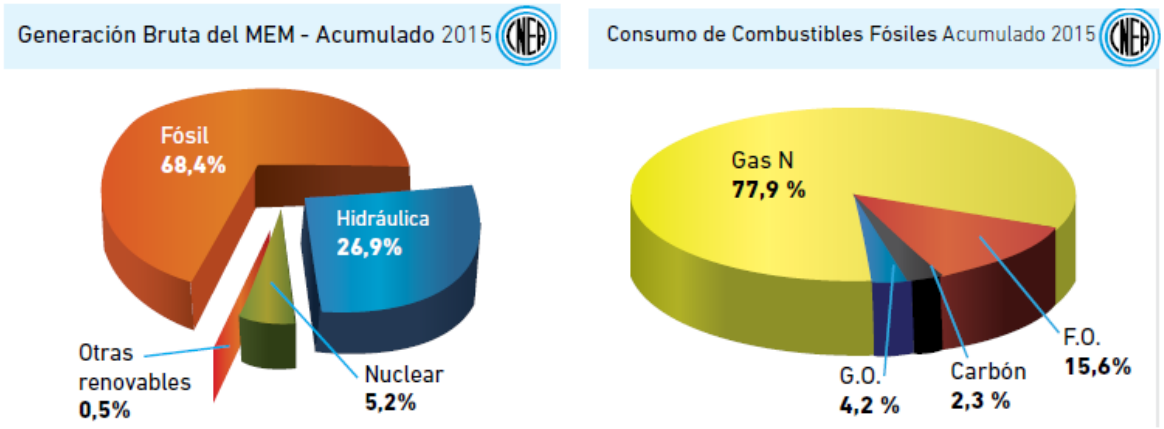
En este trabajo se analiza en la primera parte, el notable desarrollo tecnológico del mercado de calderas para bagazo y la aparición en el corto plazo de normativas nacionales que exigirán las inspecciones y ensayos necesarios para garantizar la seguridad e integridad mecánica de las calderas en operación. La industria azucarera necesitará modernizar sus antiguos equipos y deberá adecuar las calderas existentes de más de 50 años de antigüedad, bajo las normas de aceptación internacional (ASME; NBIC; API, etc.). En la segunda parte y dando respuestas a estos desafíos, se expone la presentación de un libro en español que integra y actualiza todos los aspectos relacionados con estas calderas bajo los estándares citados, concebido como medio de actualización profesional por parte de quienes deben actuar con estos equipos bajo las mejores prácticas de ingeniería vigentes

Palabras Claves: *calderas, bagazo, integridad mecánica.*

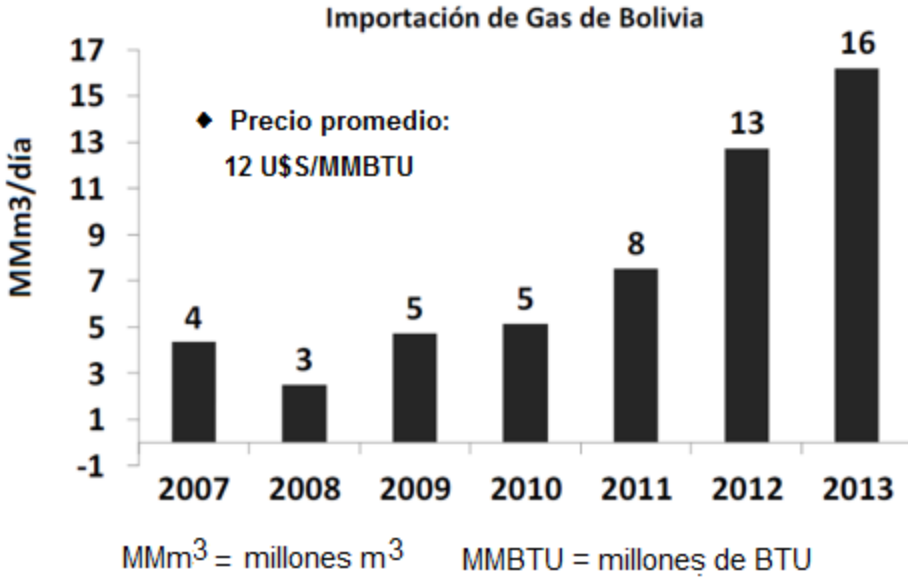
1. INTRODUCCIÓN

El panorama energético argentino en los últimos 10 años se caracteriza por una fuerte reducción de reservas de gas y petróleo, seguida de notables incrementos de importaciones tanto de combustibles fósiles como de energía y todo esto con una política de precios internos no sustentables en el tiempo. Esta situación es particularmente importante dada la composición de la matriz energética, fuertemente dependiente del gas natural. Esto se refleja en la figura 1

Figura 1 “Matriz energética argentina (2015) e importaciones de gas natural”



MEM: Mercado Eléctrico Mayorista; F.O: fuel oil; G.O: gasoil; Gas N: gas natural



Queda claro que esta política debe ser modificada a los efectos de atenuar el peso de las importaciones y a la vez aprovechar los recursos disponibles. Con miras a conseguir estos objetivos es que se aprobó en forma reciente el Decreto 531/2016 que instrumenta la aplicación de la Ley 27.191 de Fomento de las Energías Renovables para Producción de Energía Eléctrica, según la cual establece como objetivos alcanzar los siguientes valores [1]:

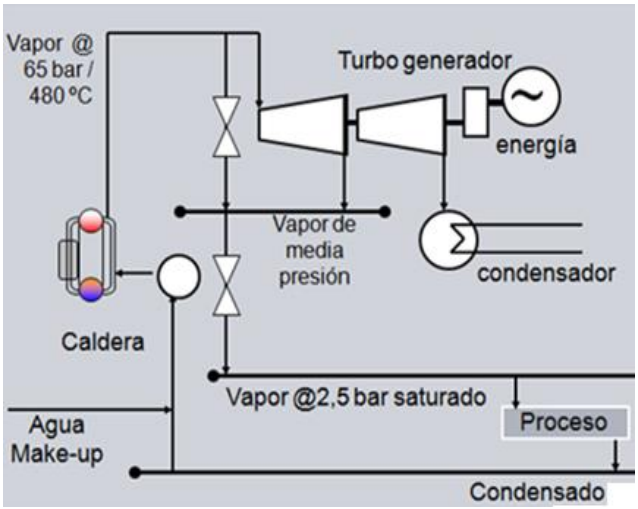
Año 2017: **8%** de la generación total proveniente de energía renovables
Año 2025: **20%** “ “ “

2. INDUSTRIA AZUCARERA Y ENERGIA RENOVABLE

La industria azucarera argentina cuenta con 23 ingenios azucareros, 16 de los cuales tienen destilerías para la obtención de bioetanol y 9 de las mismas, cuentan con plantas deshidratadoras para producir alcohol anhidro para uso en automotores. Estos complejos industriales tienen en el bagazo sobrante de la molienda y en los residuos de la cosecha cañera (RAC), la biomasa necesaria para cogenerar tanto la energía térmica como eléctrica requerida por el proceso y pueden además vender el excedente energético a la red [2]

La cogeneración en Argentina proveniente de esta industria en muy pequeña todavía ($< 0.1\%$, sólo dos ingenios cogeneran) comparada con la de Brasil ($> 5\%$) o Colombia (0.5%), pero con el cambio de condiciones en política energética esto tomará otras dimensiones. En la figura siguiente puede verse un ciclo típico de cogeneración en media presión

Figura 2 “Ciclo clásico de cogeneración”

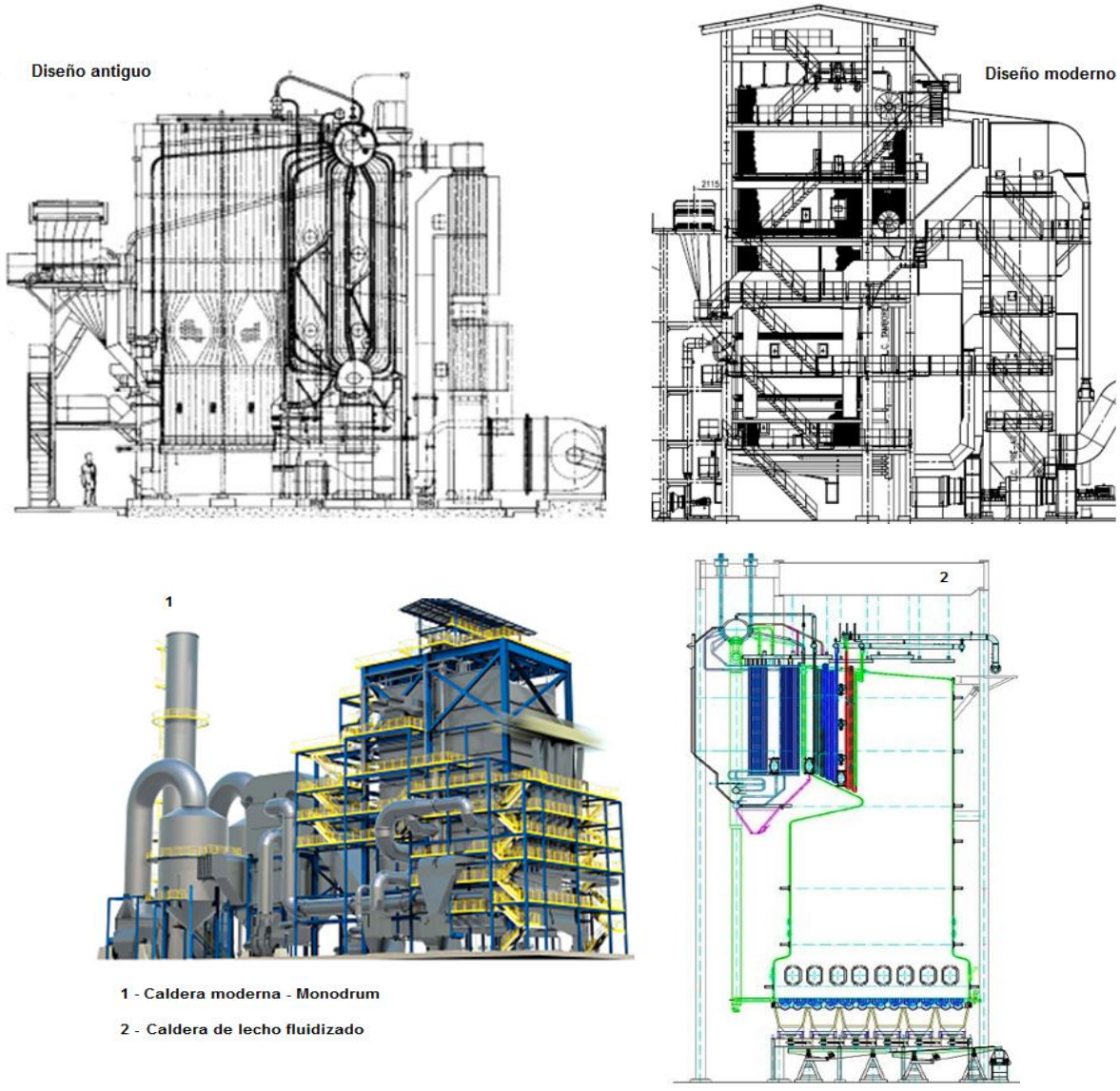


ISBN: 978-987-1676-63-7

3. GENERACIÓN DE VAPOR

El crecimiento de la cogeneración impulsó el mercado de calderas a bagazo que desarrolló equipos con diseños, capacidades y condiciones de presión y temperaturas nunca antes visto en la industria de azúcar de caña [3]. En esta industria, por más de 50 años, el ciclo térmico de generación de calor y potencia usó calderas de baja presión y temperatura de vapor (< 25 bar, <350ºC) y con capacidades inferiores a las 100 t/h. La figura siguiente muestra los equipos antiguos y actuales

Figura 3 “Tipos de calderas a bagazo”



Estos equipos modernos van reemplazando en los nuevos proyectos de cogeneración (alta presión y temperatura) a las calderas antiguas, cuyas capacidades se muestran en la tabla Nº1

Tabla 1 “capacidades y condiciones de operación de calderas modernas”

Tipos de calderas disponibles en el mercado				
Diseño	**Capacidad t /h**	**Presión bar**	**Temperatura ºC**	**Rendimiento %**
Dos domos	≤ 220	≤ 68	450 - 500	84 - 86
Monodrum	150-350	65-120	480 - 530	83 - 85
Lecho Fluidizado	200-400	80-120	550 - 580	88 - 90

4. DESAFIOS DE LA COGENERACION

La decisión empresarial de cogenerar implica una serie de decisiones técnicas y financieras que deben evaluarse en cada caso [4]. Entre estas decisiones encontramos:

- ✓ ¿Qué potencia y tipo de ciclo se usará?. Con turbinas de contrapresión, extracción y contrapresión, extracción y condensación?
- ✓ ¿Qué condiciones de presión y temperatura se precisarán en el vapor?
- ✓ ¿Qué tipo de caldera es la más indicada y cuáles son los criterios y parámetros adecuados para su selección?
- ✓ ¿Cuáles son las condiciones de operación de la caldera-turbogenerador que maximizan el rendimiento exergético del ciclo de cogeneración?
- ✓ ¿Las calderas se entregan llave en mano o se tercerizará la construcción de algunas de sus partes componentes? Componentes a presión y no a presión?
- ✓ ¿Bajo qué normas de diseño, fabricación, control y ensayo se construirán las calderas?
- ✓ ¿Se adquiere ingeniería y fabricación conjunta o se eligen proveedores individuales?
- ✓ ¿El montaje y la supervisión lo hará el fabricante o será tercerizado?
- ✓ ¿Qué sistema de aseguramiento de calidad se exigirá?

ISBN: 978-987-1676-63-7

- ✓ ¿Quién efectúa el comisionado de la obra y el ensayo de recepción? Están penalizadas las desviaciones y definidas las tolerancias?
- ✓ ¿Quién asume la responsabilidad integral del proyecto ante desviaciones de calidad, capacidad o rendimiento?
- ✓ ¿Qué calificación requiere el personal de operaciones y mantenimiento para los equipos modernos de alta capacidad y presiones de trabajo?
- ✓ ¿Quién define estas cuestiones y cuáles son las competencias técnicas requeridas para la toma de decisiones? Personal propio o consultores externos?

Estas preguntas son apenas una parte de las que el personal técnico debe tomar, indicar, especificar y/o recomendar y está claro que tratándose de inversiones importantes (> 20 U$S millones) deben ser cuidadosamente evaluadas

5. BIBLIOGRAFIA SOBRE CALDERAS

Al revisar la bibliografía sobre calderas en español encontramos que no existe un libro específico relacionado con estos equipos y que los existentes son mayoritariamente descriptivos, con escasos cálculos y básicamente desactualizados, no conteniendo los significativos avances producidos en el campo tecnológico con relación a los siguientes ítems:

- ➢ Normativa de diseño térmico y mecánico,
- ➢ Desarrollo de materiales, fabricación y control de calidad
- ➢ Herramientas de simulación
- ➢ Propiedades del bagazo y RAC
- ➢ Dinámica de la combustión
- ➢ Sistemas de instrumentación y control
- ➢ Herramientas de monitoreo de condiciones
- ➢ Leyes ambientales y sus requerimientos

En otros idiomas los libros sobre calderas son de aplicaciones generales con algunas menciones al bagazo como combustible y varios de ellos con las mismas observaciones anteriores. Estas razones y los desafíos presentes a los técnicos de la industria azucarera llevaron al proyecto de

preparar un libro específico que contuviera, actualizara e integrara todos los aspectos antes citados, teniendo como base el desarrollo que la industria metalmecánica introdujo en el diseño y fabricación de modernas calderas en estos últimos años [5],[6],[7],[8]

6. CALDERAS A BAGAZO. PROYECTO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Con este título el libro registrado en nuestro país con ISBN 978-987-42-0250-5 ha sido concebido como un manual de cálculos, de 22 capítulos, 670 páginas, con más de 80 ejemplos resueltos, extensamente ilustrado con figuras, gráficos, tablas, etc. que abordan de manera integral todas las cuestiones relacionadas con este tipo de calderas. Este manual incluye:

- Propiedades del bagazo y RAC y su comportamiento en el proceso de combustión
- Balances de masas y energía del equipo. Dinámica del proceso de combustión
- Diseño térmico del hogar, haz convectivo y equipos de recuperación de calor, siguiendo una metodología estandarizada por la normativa rusa del CKTI, 3º edición 1998
- Selección de materiales y diseño mecánico de partes a presión según lineamientos de los estándares ASME I, II, VIII y IX y EN 12952-Partes 1-16. [9],[10], [11]
- Requerimientos de calidad de agua y vapor según estándares ASME, VGB y EPRI. Instalaciones requeridas. Sistema de agua de alimentación
- Requerimientos de leyes ambientales con relación a la emisión de gases contaminantes y material particulado. Instalaciones necesarias
- Fenómeno de creep y vida útil de los componentes bajo el criterio de Larson & Miller.
- Mecanismos de desgaste y fallas característicos. Métodos de prevención
- Instrumentación y sistema de control. Lazos de control. BMS y la seguridad
- Procedimientos de puesta en marcha. Tensiones térmicas en el startup de la caldera. Procedimientos de parada normal y de emergencia
- Secado de bagazo con gases de combustión (capítulo escrito en colaboración con profesionales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres de Tucumán – EEAOC) [12]
- Ensayos de performance según ASME PTC4-2013

- Circulación natural. Verificación de cargas térmicas y de temperatura de pared
- Problemas de ensuciamiento por cenizas. Impacto sobre la emisividad del hogar y en los haces tubulares. Formas de eliminación
- Transporte y regulación de aire y gases de combustión. Selección de ventiladores según estándares de AMCA.
- Técnicas de inspección y mantenimiento de calderas según estándares ASME VII, V, IX y del National Board Inspector, API 579, NACE y EPRI
- Extensión de vida y vida residual según EPRI. Ciclos de arranque-parada y la fatiga térmica. Cálculo de la vida consumida según criterio de Palmgren & Miner
- Buenas prácticas en reparación y alteración de calderas según lineamientos del National Board Inspector Code
- Dispositivos de alivio de presión según ASME I, VIII y PTC25 [13]. Selección, montaje y mantenimiento
- Montaje de calderas. Composición del peso del equipo. Manipulación de partes varias

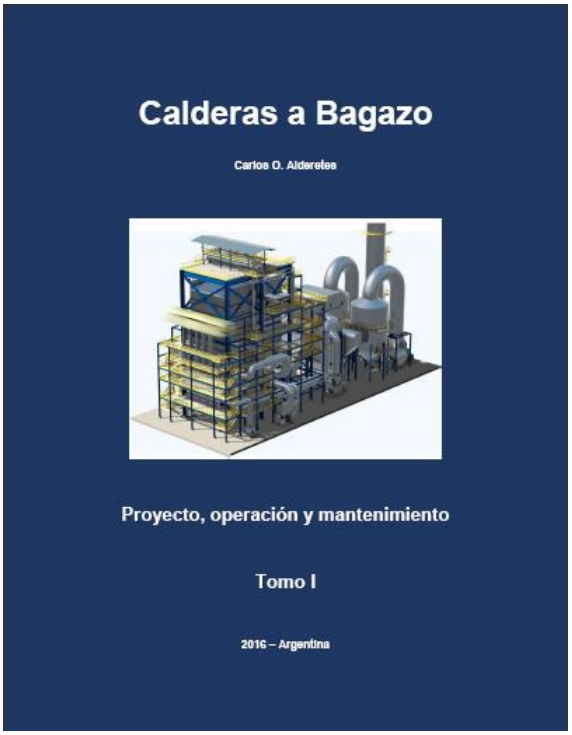
El propósito del libro es que integre de manera práctica todas las recomendaciones provenientes de los fabricantes y de la normativa aceptada internacionalmente para calderas tales como la emitida por ASME, VGB, CEN, NBIC y EPRI. Además de ayudar a los profesionales y técnicos de la industria azucarera latinoamericana, es también un propósito que este sirva de material de estudio en las carreras de ingeniería mecánica, industrial y química en las cátedras que aborden la generación de vapor a partir de biomasa

El manual viene acompañado con planillas Excel destinadas a resolver los balances de masas y energía del equipo, información necesaria en cálculos de diseño y/o verificación de equipos existentes. El libro contiene más de 300 referencias bibliográficas citadas en cada capítulo

En los cálculos desarrollados se trató de reducir al mínimo el uso de ábacos u otras herramientas gráficas y presentar las ecuaciones que los originaron, con el propósito que el lector pueda desarrollar planillas electrónicas que le permitieran simular diversos escenarios y obtener resultados de análisis multivariable. Un caso típico de esta situación es la que se plantea en el hogar donde se pueda estudiar el efecto en la generación de vapor al cambiar el exceso de aire, su temperatura, la humedad del bagazo o la formación de cenizas en los tubos

Estas situaciones complejas serían muy laboriosas efectuarlas en forma gráfica y en muchos casos de imposible análisis ya que no todas estos recursos pueden volcar en un mismo ábaco la participación de diversas variables

Figura 4 “Manual calderas a bagazo”



7. CONCLUSIONES

La cogeneración exige nuevos conocimientos y herramientas a los profesionales que deben actuar en procesos de especificación, recomendación y/o selección de modernas calderas y turbogeneradores. Igualmente a aquellos que deben operar y mantener estas nuevas unidades en un contexto diferente como lo es el de proveer energía a la red como empresa de servicios. El manual elaborado viene a proporcionar parte de esas herramientas necesarias al poner en conocimiento una porción importante de la normativa internacional vigente y de los últimos avances producidos por parte de los proveedores de calderas para bagazo. Esta información puede contribuir a una mejor toma de decisiones y minimizar las incertidumbres que ellas implican

ISBN: 978-987-1676-63-7

8. REFERENCIAS

[1] Anónimo - Ley 27191. Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía. Disponible en: www.infoleg.gob.ar

[2] Rein P. - Cane Sugar Engineering. Editorial Verlag Dr.Albert Bartens, 2007- Berlín

[3] Sanchez M.G. et al: The evolution through the single-drum steam boiler inside the expansion of cogeneration in the Brazilian sugar mill context, ENCIT 2006, 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Curitiba, Brazil.

[4] Alderetes Carlos: Calderas a Bagazo. Presentación en el XX Congreso de la Sociedad Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar, Tucumán, Abril 7-9 del 2016. Argentina

[5] Torreguitar Raúl et al. – Combustión y generación de vapor, 2º edición. Editorial Prisma Pub, Buenos Aires. Argentina, 1975

[6] Mesny Marcelo – Generación de vapor. Editorial Marymar, Buenos Aires. Argentina, 1976

[7] Hugot E. - Handbook of Cane Sugar Engineering. Elsevier 1986, 3º edit

[8] Stultz. & Kitto- Steam, its generation and use, 41 editions. Published by Babcok Wilcox Company, USA, 2005

[9] ASME Boiler and Pressure Vessels Code. Section I / II / V / IX. Published by the American Society of Mechanical Engineers, NY, 2010

[10] EN 12952-2: Water-tube boiler and auxiliary installations – Parts 1/2/3/5/6. Published by European Committee for Standardization (CEN), 2003

[11] Rayaprolu K. - Boilers for power and process. Edit.CRC, 2009, US

[12] Aralde, L. E.; D. Paz y G. J. Cárdenas – Metodologia de cálculo de un secadero de bagazo en transporte neumático. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 69(1-2); 71-79, 1992. Argentina

[13] ASME PTC 25 - Pressure Relief Devices. Edit by ASME, 2014

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INFLUENCIA DEL MOTOR COMO GENERADOR EN UNA BOMBA MONOBLOCK USADA COMO TURBINA

Audisio, Orlando Aníbal [1], Marchegiani, Ariel Ricardo [2] y Kurtz, Victor Hugo [3]

[1, 2] Laboratorio de Maquinas Hidráulicas (La.M.Hi.), Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400 - (Q8300IBX)
Neuquén Capital - Neuquén Argentina.
Correo-e: orlando.audisio@fain.uncoma.edu.ar - ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar
[3] Departamento de Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Juan Manuel de Rosas 325, N3360 - Oberá, Misiones, Argentina
Correo-e: kurtzvh@fio.unam.edu.ar

RESUMEN

Se presenta en este trabajo, una evaluación de las ventajas y desventajas de la utilización de bombas centrifugas tipo monoblock como turbinas hidráulicas. Se llevaron a cabo varios ensayos experimentales de laboratorio, tanto del conjunto motor-bomba como de la bomba solamente, comparando los resultados obtenidos en las dos modalidades.

En una primera etapa, se estudió el comportamiento del motogenerador, tomando como variable de entrada; La potencia hidráulica y variable de salida; La potencia eléctrica generada.

En otra oportunidad se ensayó el equipo como maquina hidráulica solamente. Esto es: Variable de entrada; La potencia hidráulica y variable de salida; La potencia mecánica obtenida.

Finalmente se repitieron los ensayos de la primera etapa. Compararon los resultados obtenidos, para cada caso.

La principal conclusión de este análisis experimental está relacionada a la baja potencia que se obtiene de este monoblock si se quiere generar en corriente alterna, garantizando calidad de energía en cuanto a frecuencia y tensión; esto motivado, principalmente, por la imposibilidad de modificar la velocidad de rotación del motor eléctrico en el modo turbina.

Palabras Claves: *Bomba Reversa, PCH, Energía renovable, Turbinas, Generación Asincrónica, BUTUs*

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se considera la situación energética en países en desarrollo y, en especial en áreas rurales, las pequeñas centrales hidráulicas (PCH) juegan un importante rol en el desarrollo de las mismas. Sin embargo, el costo de inversión inicial que requiere una PCH es considerado relativamente alto y esto ha restringido, en algunos países más que en otros, el desarrollo de estas potenciales energías renovables. El uso de Bombas Centrífugas Standard como Turbinas (BUTUs) puede ofrecer una alternativa técnica y con una apreciable ventaja económica. [1]

Llevando este concepto un poco más adelante, sobre todo en potencias muy bajas, sería muy conveniente utilizar una bomba monoblock (conjunto bomba-motor acoplados en un solo conjunto desde fábrica) como turbina, ya que los costos del equipamiento electromecánico se reducirían enormemente, debido a que se estaría utilizando, además, el motor asincrónico como generador. [2]

Dada las condiciones geométricas fijas de una bomba centrifuga, cuando esta está operando en sentido reverso, las características del flujo en la carcasa y el impulsor producen un muy bajo rendimiento; esto se torna muy marcado a cargas parciales. Este es uno de los problemas más difíciles de manejar para un sistema en una PCH sobre la base de una BUTUs. Por este motivo, una bomba operando como una turbina es muy sensible a los cambios de parámetros tales como altura y caudal. En consecuencia, una errónea selección de la bomba dará lugar a un punto de trabajo no óptimo y una entrega de la potencia insuficiente, sobre todo cuando el uso de su motor como generador impone condiciones adicionales.

2. ANÁLISIS DE LA BOMBA COMO TURBINA A EJE LIBRE

Ensayo del equipo como máquina hidráulica solamente. Esto es: Variable de entrada; *La potencia hidráulica* y variable de salida; *La potencia mecánica obtenida*.

Los ensayos de rendimiento y determinación del campo de operación de la bomba como turbina fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, a fin de determinar la perfomance, rendimiento y campo de operación de la misma.

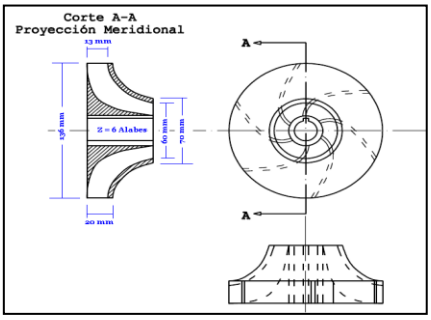
El equipo que fue ensayado se trata de una bomba centrifuga de una sola etapa tipo monoblock marca IRUMA Modelo 60/5 (FB-2) con brida de entrada de $\varnothing_1$ 60 mm y brida de salida $\varnothing_2$ 60 mm. En la estandarización de ANSI se trata de una unidad tipo *single stage, end-suction pump*. Esta bomba tiene una velocidad específica media n_{sq} de 36,90. Los parámetros de diseño son mostrados en la Tabla 1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1: Datos Técnicos Bomba IRUMA E-60/5

Q	23	31	**37,5**	41,8	45	48	Potencia Motor Electrico 3 kW (4 HP)
H	20	18	**16**	14	12	10	
PA Electrica [HP]	2,8	3,1	**3,2**	3,4	3,5	3,6	
PA Electrica [kW]	2,088	2,312	**2,386**	2,535	2,61	2,685	
η	0,600	0,658	**0,685**	0,629	0,564	0,487	
ns	24,43	30,69	**36,87**	43,03	50,11	59,34	

Impulsor:		
Diametro exterior	136	mm
Diametro Interior	70	mm
Diametro Neto Interior	60	mm
Ancho Salida	20	mm
Ancho Neto Salida	13	mm
Numero de Alabes	6	
Velocidad de Rotacion	2890	RPM



En la Figura 1 se observa la máquina ensayada acoplada a un freno dinamométrico.



Figura 1: Bomba centrifuga acoplada a freno dinamométrico.

El ensayo se realizó para un rango de caudales a fin de determinar el campo de operación de la misma. Los métodos de medición fueron aplicados conforme a las reglas de la IEC, la BSI, y la DIN [7] y [9].

Se determinaron el rendimiento óptimo de la máquina a eje libre, es decir sin incluir el motor como generador, con su correspondiente punto de operación y, el campo de operación de la máquina para distintos caudales. Los resultados fueron analizados y combinados en distintos diagramas que dan un conocimiento acabado del funcionamiento en el modo turbina.

Para ello, y con una presión de entrada constante, se midió con un caudalímetro tipo electromagnético el caudal o descarga, la presión aguas arriba de la turbina, p_1^T, la presión

ISBN: 978-987-1676-63-7

aguas abajo de la turbina, p_2^T, el torque o par torsor en el eje de la turbina, y la velocidad de rotación de la turbina. Con estos datos se determinaron la altura neta para el modo turbina, energía hidráulica y eficiencia de la turbina, de la siguiente manera:

• Altura Neta o Energía Específica

$$H_N^T = H_1^T - H_2^T = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2.g} + \frac{p_1^T - p_2^T}{\rho.g} + \Delta z \quad [m] \tag{1}$$

• Potencias Hidráulica

$$P_{hid}^T = \rho.g.Q.H_N^T \quad [kW] \tag{2}$$

• La eficiencia de una turbina hidráulica es medida por su rendimiento. En general el rendimiento es una indicación de que porcentaje de la potencia entregada por el agua a la turbina es transformada en potencia mecánica en el eje, es decir:

$$\eta_g^T = \frac{P_{eje}^T}{P_{hid}^T}.100 \quad [\%] \tag{3}$$

O sea,

$$\eta_g^T = \frac{P_{eje}^T}{\rho.g.Q.H_N^T} \tag{4}$$

Donde ρ es la densidad del agua, Q es el caudal, y H_N^T es la altura neta de la turbina, y P_{eje}^T es la potencia en el eje de la turbina, dada por:

$$P_{eje}^T = T.\omega = \frac{2.\pi.n}{60}.T \qquad [kW] \tag{5}$$

Donde T es el torque en el eje de la turbina y n es la velocidad de rotación de la misma [5], [6] y [8].

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Utilizando los resultados del ensayo para el modo turbina a eje libre, se determinaron las curvas de performance que se muestran en las Figuras 2 y 3, tales como:

$$H_N^T = H_1^T(Q); \qquad P_{hid}^T = H_{hid}^T(Q); \qquad \eta_g^T = \eta_g^T(Q);$$
$$\varphi_g^T = \varphi_g^T(Q); \qquad \psi_g^T = \psi_g^T(Q); \qquad \pi_g^T = \pi_g^T(Q)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Donde:

φ = Coeficiente Caudal = Q/nD^3 [---],

ψ = Coeficiente Altura= gH_N/n^2D^2 [---],

π = Coeficiente Potencia= $P_{eje}/(\rho n^3 D^5)$ [---]

Tabla 2: Características de la Bomba Centrífuga Ensayada en modo Turbina

	Torque	RPM	Caudal	Altura	Pot.Mec	Pot.Hid	Rendi	Diam	U2	Coef.Caudal	Coef.Presion	Coef.Potencia	Coef.Diametro
	[kg m]	[RPM]	[l/s]	[m]	[kW]	[kW]	[---]	[mm]	[m/s]	[---]	[---]	[---]	[---]
Bomba como Turbina	0,55	2810	11,5	25	1,588	2,820	0,56	136	20,01	0,1220	0,6125	0,04286	2,533
	1,15	760	12,17	25	0,898	2,985	0,30	136	5,41	0,4863	8,3735	1,22501	2,439
	0,56	2648	12,49	25	1,523	3,063	0,50	136	18,86	0,1432	0,6898	0,04914	2,408
	1,17	827	12,54	25	0,994	3,075	0,32	136	5,89	0,4605	7,0717	1,05255	2,403
	1,26	1164	12,6	25	1,507	3,090	0,49	136	8,29	0,3287	3,5697	0,57218	2,397
	0,67	2502	12,9	25	1,722	3,164	0,54	136	17,82	0,1566	0,7726	0,06585	2,369
	1,18	1330	13,35	25	1,612	3,274	0,49	136	9,47	0,3048	2,7342	0,41044	2,329

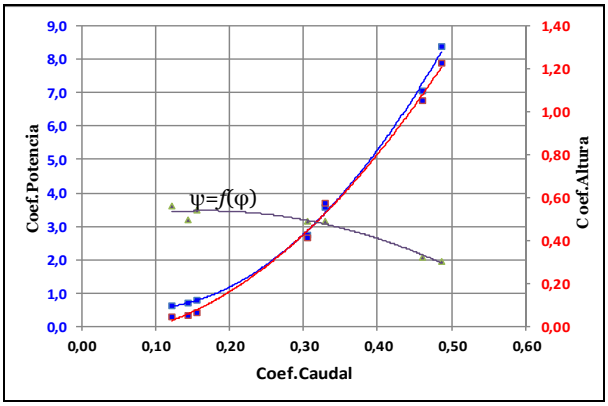


Figura 2: Coeficientes de Potencia y Altura en función del coeficiente de caudal

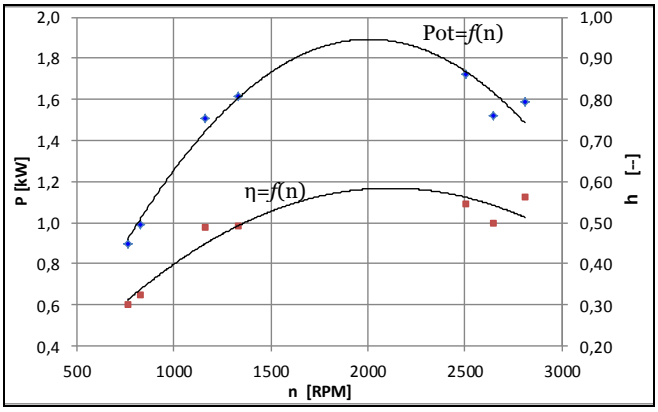


Figura 3: Potencia y rendimiento en función de la velocidad de rotación

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. ENSAYOS ELECTRICOS

El estudio del comportamiento del motogenerador, fue desarrollado tomando como variable de entrada la *potencia hidráulica* y como variable de salida la *potencia eléctrica generada*. Como se ve en la figura 4.

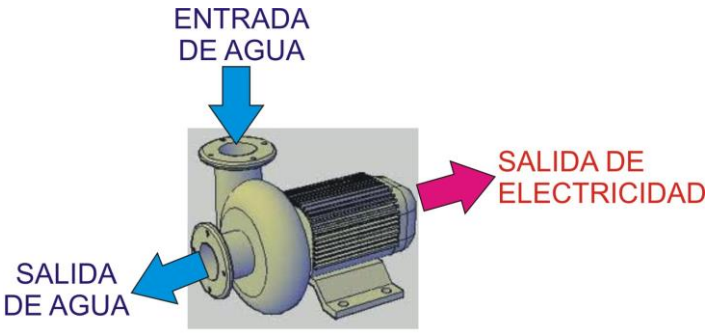


Figura 4: Entrada potencia hidráulica, salida potencia eléctrica generada

3.1 Ensayo en Vacío

Para determinar algunos de los parámetros del electromotor, no indicados en la placa de características del mismo, se conectó inicialmente el motor sin carga a la red de alimentación comercial.

Por otro lado, para el cálculo de los capacitores de excitación necesarios para que el motor funcione como generador asincrónico (conforme al método utilizado) [3]. Se hace necesario conocer, entre otros parámetros, la corriente que consume el motor en vacio.

La mayoría de los parámetros del motor necesarios para el cálculo de los capacitores de excitación, se obtienen de la hoja de datos técnicos o de la placa característica del motor. Pero no así la corriente en vacío que, generalmente, se tiene que medir. El procedimiento de medición fue el mismo que para la bomba como turbina y el motor como generador, indicado en párrafo 3.1.1.

3.1.1 Medición de la Corriente en Vacío del Motor

El motor en configuración estrella, se conectó a la red eléctrica comercial de 220/380 Vac., midiendo las corrientes de fase y, las tensiones de línea y de fase.

Al momento del ensayo eléctrico en vacío, el motor se encontraba acoplado a la bomba, ya que forman una sola unidad. Se tomó como hipótesis inicial, que la bomba acoplada al motor sin carga no presenta par antagónico. Esta hipótesis fue corroborada posteriormente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La consideración hipotética expuesta en el párrafo anterior, también fue utilizada en el ensayo del equipo como maquina hidráulica solamente. Esto es, tomando como variable de entrada la *potencia hidráulica* y como variable de salida la *potencia mecánica obtenida*. Además, se asumía que el motor no representaba carga para el sistema ensayado.

3.2 Ensayo como Turbogenerador

Ensayo del equipo como generador: **Variable de entrada**: Potencia hidráulica. **Variable de salida**: Potencia eléctrica generada (Fig. 5).

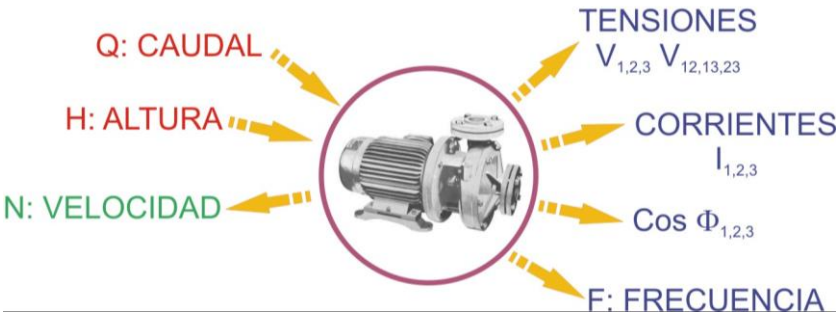


Figura 5: Variables medidas

Con el valor medido del caudal y altura, es posible determinar la potencia hidráulica P_h (entrada), mientras que con la intensidad de corriente, la tensión generada y el factor de potencia, la potencia generada P_g (salida). Relacionando ambas potencias, se halla el rendimiento del sistema.

La velocidad de rotación se compara con el valor de la frecuencia generada, con el fin de establecer el punto de trabajo de la máquina.

3.2.1 Potencia Eléctrica Generada

La potencia activa desarrollada por un sistema de tres fases, con cargas lineales alimentadas con fuentes sinusoidales, se puede expresar conforme al teorema de Boucherot [4], como la suma de las potencias desarrolladas por cada una de las fases.

$$P = \sum_{i=0}^{i=3} P_i \tag{6}$$

$$P = \sum_{i=0}^{i=3} P_i = P_{z1} + P_{z2} + P_{z3} \tag{7}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$P = U_1.I_1 \cos \phi_1 + U_2.I_2 \cos \phi_2 + U_3.I_3 \cos \phi_3 \quad (8)$$

Los subíndices 1, 2 y 3, corresponden a las tres impedancias de cargas, sin importar la forma en que estén conectadas.

A la izquierda del esquema (Fig. 6) está representado el motor como generador. Mientras que a la derecha las cargas eléctricas.

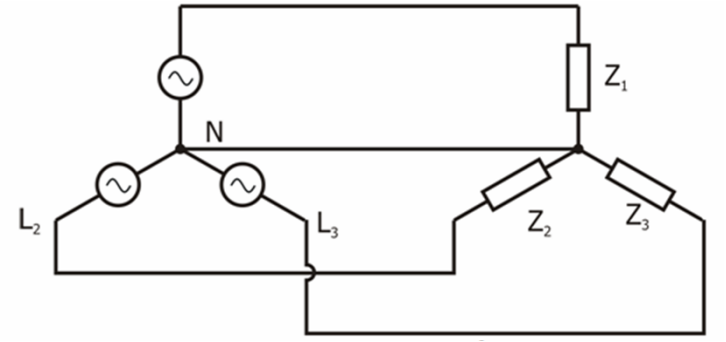


Figura 6: Circuito trifásico, motor como generador.

Para la medición de la frecuencia de la tensión generada, se utilizó un frecuencímetro de aguja.

Mientras que para la medición de las tres intensidades de corrientes, las seis tensiones eléctricas y los tres factores de potencia a la salida del motor actuando como generador. Se usó un polímetro electrónico digital.

Se emplearon lámparas incandescentes como carga eléctrica, en la configuración estrella con acceso a neutro.

En la Figura 7 se observa la máquina ensayada como generador de energía eléctrica. Es posible ver los capacitores de excitación en la parte inferior de la imagen.

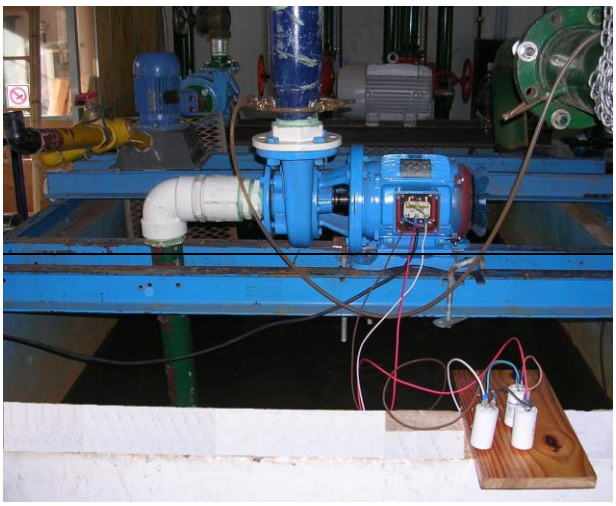


Figura 7: Bomba centrífuga como unidad generadora.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Figura 8 se muestra la máquina ensayada, los equipos de medición y el tablero de control de cargas.



Figura 8: Ensayo de la bomba centrífuga generando, tablero de mediciones y cargas.

3.3 Resultados de las Mediciones Eléctricas

Tabla 3: Características del equipo ensayado en modo turbogenerador a altura constante

Velocidad [rpm]	Caudal [l/s]	Altura [m]	Pot. Eléctrica [W]	Pot. Hidráulica [W]	Rendimiento [….]	Observaciones
3139	12	27	1400	3179	0,44	V = 224 V ; f = 52 Hz
3155	12	27	1525	3178	0,48	V = 210 V ; f = 52 Hz
3017	13,8	27	1430	3655	0,39	V = 196 V ; f = 50 Hz
3024	14	27	1460	3720	0,38	V = 190 V ; f = 50 Hz
3006	14	27	1300	3708	0,35	V = 150 V ; f = 50 Hz

Tabla 4: Características del equipo turbogenerador a altura variable.

Velocidad [rpm]	Caudal [l/s]	Altura [m]	Pot. Eléctrica [W]	Pot. Hidráulica [W]	Rendimiento [….]	Observaciones
3155	17,5	32,5	1938	5579	0,35	V = 220 V ; f = 52 Hz
3122	16,5	30	1814	4856	0,37	V = 210 V ; f = 52 Hz
3033	15	26,5	1255	3899	0,32	V = 210 V ; f = 50 Hz
3149	16,5	30	1487	4856	0,31	V = 199 V ; f = 50 Hz
3024	14	27	1460	3720	0,38	V = 190 V ; f = 51 Hz

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la tabla 3, se muestran los resultados de los ensayos efectuados a la motobomba actuando como hídrogenerador eléctrico. En esta primera etapa, se realizaron las pruebas a altura constante.

Se puede ver en la tabla 3, que es prácticamente imposible obtener tensión nominal y frecuencia nominal al mismo tiempo. Esta situación es típica de los generadores a inducción.

De los ensayos a altura variable, mostrados en la tabla 4, dejan ver que el máximo rendimiento, se tiene a una tensión relativamente baja y a frecuencia algo mayor a la nominal.

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión de este análisis experimental está relacionada a la baja potencia que se obtiene de este *monoblock,* si se quiere generar en corriente alterna garantizando calidad de energía en cuanto a frecuencia y tensión; esto motivado, principalmente, por la imposibilidad de modificar la velocidad de rotación del motor eléctrico en el modo turbina.

Al utilizar el motor de la bomba como generador, se está imponiendo una velocidad de giro para el modo turbinas, lo que implica que si esta no es el que se corresponde con el de mejor performance del modo turbina, tendremos una máquina trabajando en un rendimiento lejos del óptimo; aspecto este que se pone de manifiesto a partir del post-procesamiento de los datos experiméntales obtenidos.

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, los rendimientos observados estuvieron por encima de lo esperado y, la bomba operando como turbina, presentó un funcionamiento estable, silencioso y de buena calidad.

Por otro lado, la BUTUs ensayada, tomando en cuenta de manera preliminar el costo del sistema, representa, y confirma, una interesante solución para la generación hidroeléctrica.

Asimismo, este ensayo posibilitó validar las expresiones teóricas, obtenidas a partir de trabajos propios y de investigación de bombas centrifugas operando como turbinas hidráulicas y de la generación eléctrica utilizando motores a inducción como generador.

5. REFERENCIAS

[1] Audisio O. A. *Correlación en el Uso de la Bomba Centrifuga Operando como Turbina en Pequeños Aprovechamientos Hidráulicos*. IV CAIM 2014 – Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. Resistencia - Del 2 al 5 de septiembre. Resistencia, Chaco.

[2] Kurtz V. H. *Bombas Centrifugas Monoblock Utilizadas Como Turbinas Hidráulicas.* Argentina. Posadas - Misiones. 2013. Libro. Artículo Completo. Jornada. Jornada Científica Tecnológica UNaM 2013 – 40 Aniversario. Universidad Nacional de Misiones.

[3] Marchegiani A, Kurtz V.H. *Ensayo de Una Picoturbina Pelton Compacta, de Fabricación Local.* Perú. Cajamarca. 2009. Revista. Resumen. Encuentro. XIII Encuentro Latinoamericano y del Caribe.

[4] E. Spinadel, *"Circuitos Eléctricos y Magnéticos. Temas Especiales"*, Nueva Librería, Buenos Aires, 1982, Caps. 3, 11 y 12.

[5] Stepanoff, A.J.; *Centrifugal and Axial Flow Pumps* – New York: John Wiley and Sons, Incorporated (1957)

[6] Chapallaz, J.; Eichenberger, P.; Fischer, G. *Manual on induction motors used as generators.* Braunschweig: Vieweg, 1992. ISBN 3-528-02068-7.

[7] EUROPEAN SMALL HYDRO ASSOCIATION (2004). *Guide on how to develop a small hydropower plant. Bruxelas: Alteneer Programme* - European Small Hydro Association.-

[8] Gülich, Johann F. – *Centrifugal Pumps* – ISBN 978-3-540-73694-3 – Springer Berlin Heidelberg New York. - 2008

[9] *PROCESS PUMP SELECTION - A SYSTEMS APPROACH* - Edited by John Davidson IMechE for the Process Industries (MEP) - ISBN 0 85298 602 5 – 1986.

Nota: Es posible ver parte de los ensayos iniciales de la bomba como turbina en: https://www.youtube.com/watch?v=W08mZg3HwcE

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

"UTILIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE HÍBRIDO (GNC+H2) EN MOTORES DE USO VEHICULAR"

Horacio Trigubó[1], Nicolás Galante[2], Roberto Franzi[3], Sergio Macchello[4]

[1,2,3,4] Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires - Av. Medrano 951, CABA.
htrigubo@cedi.frba.utn.edu.ar

RESUMEN

La creciente motorización global vehicular, la disminución mundial de las reservas de petróleo y la necesidad de restringir la emisión de gases contaminantes, han impulsado el desarrollo de combustibles alternativos en reemplazo de los tradicionales.

Por lo mencionado, el grupo de investigación, trabajó en el proyecto de utilizar en motores ciclo OTTO un nuevo combustible gaseoso constituido al mezclar GNC con H_2 (5 al 20%) por las siguientes razones:

El Gas Natural está incrementando mundialmente su utilización por su menor precio de venta, y con modificaciones de bajo costo, los motores pueden funcionar produciendo menor emisión de HC y CO. Sin embargo, la mayor temperatura de combustión de las mezclas GNC/Aire origina una considerable emisión de NOx.

El Hidrógeno es considerado el combustible del futuro por la posibilidad de obtenerlo a partir de recursos renovables utilizando métodos no contaminantes. Además sus propiedades posibilitan que los motores funcionen con mezclas pobres disminuyendo el consumo y las emisiones contaminantes.

También argumentos técnicos impulsan la utilización del nuevo combustible híbrido [GNC +H_2] con la ventaja fundamental de que los motores utilizarán la misma tecnología del GNC.

El programa de investigación consistió en el ensayo comparativo en dinamómetro de un motor actual de producción al funcionar con combustibles líquidos (nafta) y gaseosos [GNC, (GNC+H_2)], verificándose su performance, consumo y emisiones contaminantes, con la condición de que para el híbrido, se modificaron: el sistema de alimentación de combustible; el sistema de encendido y la riqueza de mezcla.

La experiencia obtenida se trasladó al funcionamiento de un vehículo Peugeot "408" con el combustible [GNC +H_2 (20%)]. Sus primeros ensayos resultaron satisfactorios.

Los resultados positivos logrados en disminuir las emisiones y el consumo de combustible, se consideran como parte de una transición progresiva hacia el uso del hidrógeno en vehículo, permitiendo a la comunidad adquirir confianza en el nuevo combustible.

Palabras Claves: combustibles alternativos, combustible híbrido (GNC + H_2), mezcla pobre, emisiones contaminantes, motor original.

Área Temática: Energía y Medio Ambiente.

1. INTRODUCCIÓN

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

El panorama energético mundial está en permanente cambio por: la disminución de las reservas de yacimientos fósiles, el incremento de su consumo generado principalmente por una mayor utilización de automóviles, y la exigente normativa internacional que, para reducir las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna (CI), han potenciado la utilización de los denominados "combustibles alternativos".

Tabla 1: Combustibles alternativos

MOTORES	COMBUSTIBLES		
	TRADICIONALES	ALTERNATIVOS	
	Líquidos	Líquidos	Gaseosos
OTTO	Nafta	Alcohol *	GNC
			GLP
			H_2 *
DIESEL	Gasoil	Biodiesel *	-----

* Renovables

GNC: Gas Natural Comprimido / GLP: Gas Licuado de Petróleo

Se considera el H_2 como el combustible del futuro por su posibilidad de obtenerlo de recursos renovables y por sus excelentes propiedades físico-químicas (ver Tabla 2). Sin embargo, para lograr su uso masivo en los motores vehiculares, se deberán superar:
- El mayor costo de producción;

- Las dificultades que permitan facilitar su distribución y almacenamiento.

Por las posibilidades y ventajas de la mezcla de GNC con H_2, para constituir el nuevo combustible híbrido (GNC + H_2), describiremos las características fundamentales de ambos:

1.1. Gas Natural

Sus ventajas son:
- Menor precio de venta que los combustibles líquidos
- El bajo costo de la conversión de los motores ciclo Otto para funcionar con GNC
- La posibilidad de los motores de trabajar con relaciones de compresión del orden 13:1, debido a su elevado número de octano
- Por tener 1C, el CH_4 resulta menos contaminante en CO y HC, que el componente básico de la nafta Isooctano, con 8C.

Sus desventajas son:
- La menor velocidad de propagación de la llama respecto de la nafta, requiere que el

ISBN: 978-987-1676-63-7

encendido de la mezcla se produzca con bastante anticipación del PMS (punto muerto superior)

- Al ser la temperatura del proceso de combustión más elevada que al utilizar nafta, se origina mayor emisión de NOx
- Por su menor densidad, el gas ocupa más volumen en el cilindro del motor que la nafta, ocasionando por la menor carga de aire una pérdida de potencia de alrededor de un 15%.

1.2. Hidrógeno

Es considerado como el combustible más promisorio por:

- Su obtención a partir de recursos renovables;
- Elevado poder calorífico (120 Mj/kg);
- Velocidad de llama cinco veces mayor que la nafta; aproxima al proceso teórico de combustión a volumen constante mejorando la eficiencia térmica;
- Mínimo valor de energía para su ignición;
- Amplio rango de inflamación, lo que permite que los motores de CI funcionen con mezcla pobre, disminuyendo el consumo de combustible y las emisiones contaminantes;
- Por la composición del H_2, durante su combustión se genera vapor de agua.
- Debido al menor poder calorífico inferior volumétrico, genera menor potencia que los combustibles nafta y GNC.

La posibilidad de que el H_2 pueda ser utilizado masivamente en los vehículos dependerá que su fabricación, distribución y almacenaje en el vehículo se pueda efectuar con un costo aceptable y en el que habrá que incluir la ponderación económica de la “mejora ambiental”.

Tabla 2 : Propiedades de Hidrógeno, Metano y Nafta *****

Propiedades	**Unidad**	**Hidrógeno**	**Metano**	**Nafta**
Densidad (líquido)	kg/dm^3	0,07	0,423	0,73 - 0,74
Densidad (gas 25°C; 1 atm)	kg/ m^3	0,083	0,651	---
Densidad (gas 25°C; 200 bar)	kg/ m^3	15	130	---
Aire/Comb. Estequiométrico (vol.)	v/v	2,37	4,75	49,2
Aire/Comb. Estequiométrico (masa)	m/m	34,3	17,4	14,7
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	120	50	43,5
Límites de inflamabilidad	% vol	4 - 75	5,3 - 15	1 - 7,6
Energía mínima de encendido	mJ	0,02	0,29	0,24
Velocidad de llama laminar (NPT)	cm/seg	170	20	37 - 43
Número Octano Research	RON	60	120	97

***** BOSCH, Manual de la Técnica del Automóvil

ISBN: 978-987-1676-63-7

1.3. Mezclas Gas Natural (Metano) + Hidrógeno

El uso de estas mezclas híbridas gaseosas, comercialmente denominadas “Hythane” (Hy-drogen, Me-thane), facilita su utilización en los motores actuales y tiene como objetivo aprovechar las ventajas complementarias de ambos combustibles. Éstas son:

- Para obtener buenos resultados en cuanto a emisiones y potencia, se agregan cantidades reducidas de hidrógeno (la experiencia internacional indica del 20 al 30%).
- Como consecuencia, no incrementa el costo del combustible en forma apreciable.
- Al aumentar el H_2, la velocidad de llama reduce las emisiones de HC, de CO y CO_2.
- Por el gran rango de inflamabilidad del H_2, el motor puede funcionar con mezclas pobres, emitiendo menor NO_x y disminuyendo el consumo de combustible (Ver “2. Emisiones contaminantes”).
- De la Tabla 2, se observa que, por el menor PCI volumétrico del H_2 respecto del Metano, al incrementar el porcentaje de H_2, se reduce la potencia del motor. Por lo tanto, el contenido de H_2 debe adecuarse al uso del motor.
- Utiliza el mismo equipamiento del GNC instalado en el vehículo.
- Puede considerarse como una transición hacia el uso masivo del hidrógeno en vehículos de transporte.

2. EMISIONES CONTAMINANTES

Por ser los motores de CI una de las causas fundamentales de contaminación ambiental (CO, HC, NOx, CO_2), se ha generado una normativa cada vez más restrictiva sobre las emisiones (ej.: Euro 2, 3, 4, 5, 6).

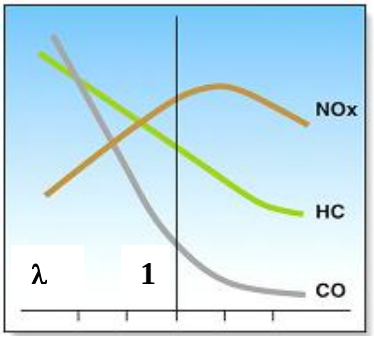
Una variable muy importante para determinar la emisión en los motores Otto es el valor denominado “Lambda”, que es la relación entre la cantidad real instantánea de aire-combustible y la cantidad estequiométrica.

Tabla 3: Relación Lambda

Lambda	**= 1**	**> 1**	**< 1**
Mezcla	Estequiométrica	Pobre (exceso de aire)	Rica (exceso de combustible)

En la práctica, por variación de la cantidad de combustible, los motores Otto trabajan entre Lambda 0,9 y 1,10, pudiendo alcanzar otros valores según la exigencia del funcionamiento, lo que produce diversas emisiones contaminantes (HC, CO, NO_x) (ver Figura 1).

ISBN: 978-987-1676-63-7



HC	Hidrocarburos de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
NO_x	Óxidos de Nitrógeno

Figura 1: Variación del CO, HC y NO_x en función de Lambda

En la figura 1, se observa la importancia que tiene lograr que el motor trabaje con mezclas pobres para disminuir las emisiones.

3. PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN

El Grupo de Investigación de la FRBA planificó el ensayo en dinamómetro de un motor actual de producción, Volkswagen modelo Gol, con todos los combustibles existentes en nuestro ámbito, con el que se efectuaron pruebas comparativas para obtener potencia, par motor, consumo específico y emisiones contaminantes.

Tabla 4: Especificaciones del motor ensayado

Datos Generales	**MOTOR**
Marca / Modelo	Volkswagen / Audi-Gol
Tiempos / Cant. cilindros	4 / 4
Cilindrada total (cm^3)	1600
Relación Compresión	10:01
Sistema de refrigeración	agua
Sistema de combustible	Nafta => Inyección “Marelli”
	GNC-GLP => Aspiración
	GNC-GLP – GNC + H_2 => Inyección "PVR" (5ª generación)
Sistema de encendido / APMS	“Bosch” / 9°
Sistema de escape	Silenciador y catalizador original
Sistema de gestión optimizado	GNC + H_2 => “PVR” + “MoteC”

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1. Consideraciones y programas de ensayo

- Los ensayos en dinamómetro (plena carga) se efectuaron según la Norma CETIA 3-1 (Comisión Estudios Técnicos Industria Automotriz Argentina).
- La medición de las emisiones contaminantes y de la temperatura de los gases de escape se realizó antes del catalizador para obtener una lectura real.
- Los ensayos del combustible líquido fueron efectuados con la calibración de fábrica del motor.
- Para los combustibles gaseosos, se utilizaron los sistemas de alimentación de combustible por depresión e inyección gaseosa.

4. ENSAYOS EN DINAMÓMETRO

A continuación, se presentan los resultados energéticos y ambientales de algunos de los combustibles ensayados:

4.1. Comparación Curvas de Potencia de Nafta, GLP y GNC (Sistema por Depresión λ = 1)

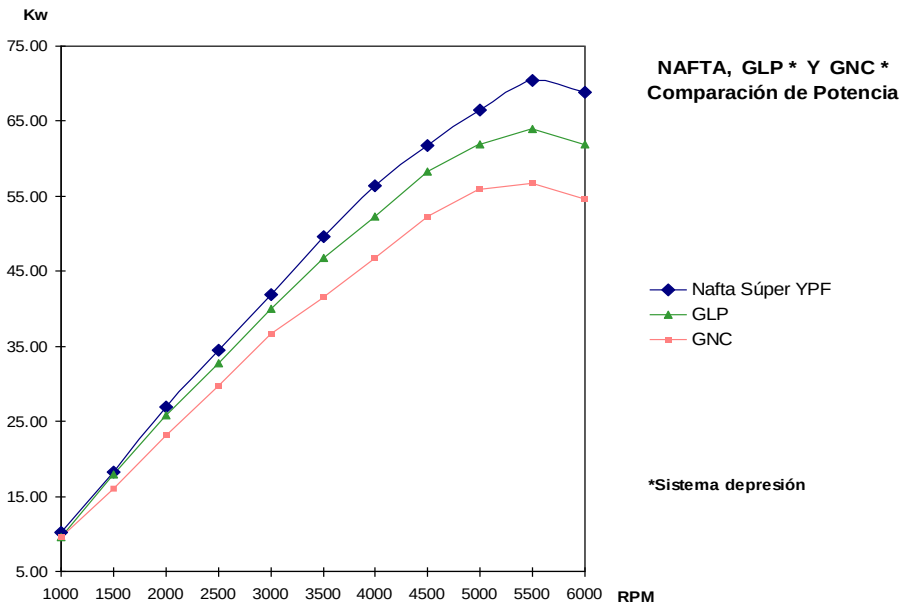


Figura 2: Comparación curvas de potencia - Nafta “Súper”, GLP y GNC

Los combustibles gaseosos GNC y GLP fueron ensayados con el sistema por depresión (o aspiración) por lazo cerrado, para el cual se mantiene (λ) = 1, y con su APMS optimizado.

4.2. Sistema de inyección de combustibles gaseosos

Es el sistema más moderno utilizado en la actualidad, por el cual la cantidad de combustible está determinada por una central electrónica, independiente de la original del motor. Así, y mediante un inyector de combustible gaseoso por cilindro, se logra un mejor llenado de los mismos y un control continuo de la mezcla aire-gas para disminuir las emisiones.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con este sistema de inyección, se efectuó el siguiente programa de ensayos:
Gas Natural Comprimido (GNC) - Metano (CH_4) - [Metano + Hidrógeno (5%) (V/v)]; [Metano + Hidrógeno (20%) (V/v)].
En las mezclas gaseosas con hidrogeno, el proveedor "Air Liquide" utilizó metano (CH_4).

Para cada uno de estos combustibles, se determinó la mejor curva de potencia a través de la modificación del avance inicial al encendido (APMS) y de los tiempos de inyección.

4.2.1. Curvas características GNC – CH_4 - [CH_4 + H_2 (5%)]

Calibración original del motor: Inyección y Encendido (λ = 0,85)

- En el GNC varían los porcentajes de sus componentes según el yacimiento del que proviene (mezclas de Metano ~90%, Etano, Propano, Butano). Por ello, y dado que en la mezcla del combustible híbrido se utilizaba Gas Metano, se ensayó el motor con este combustible, para utilizarlo como referencia respecto de los ensayos con mezclas de [CH_4 + H_2], y el GNC.

- Con el fin de adquirir confianza en el manejo de un gas de alta reactividad, como el H_2, se ensayaron mezclas al 5% en volumen, por lo cual las propiedades de la mezcla son, principalmente, las del CH_4.

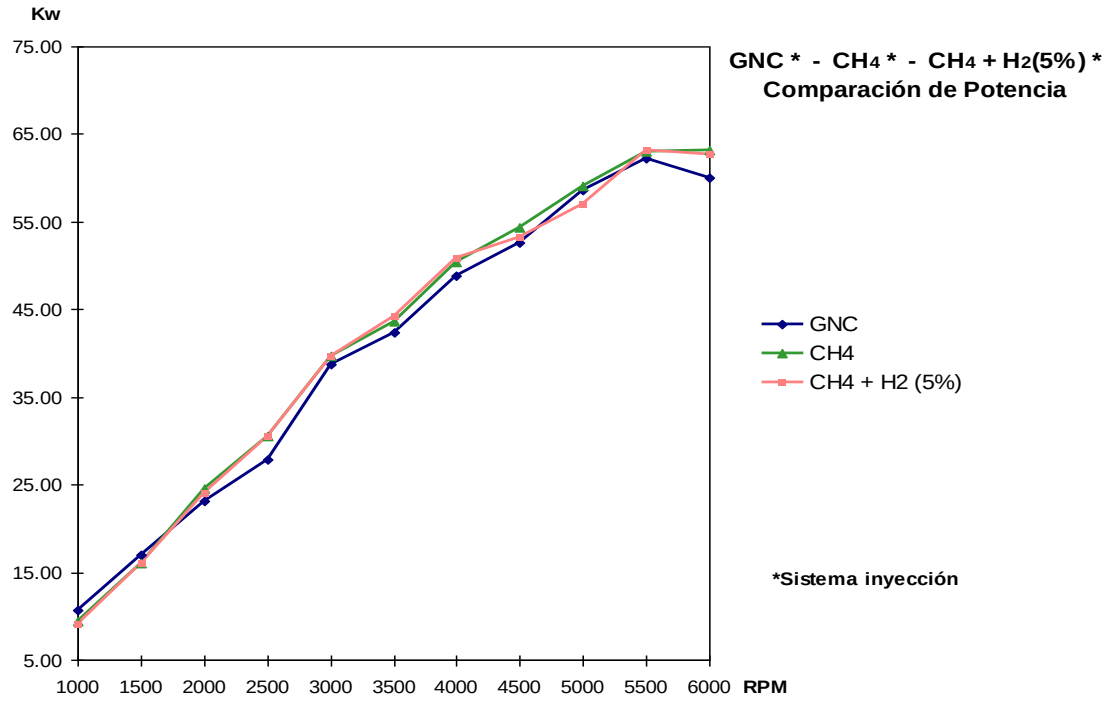


Figura 3: Comparación potencias GNC – CH_4 – [CH_4 + H_2 (5%)]

Se observa que no existen diferencias apreciables entre el CH_4 y el combustible híbrido, ya que el 5% de H_2 no influye. Con el GNC, se verifica menor valor en la potencia y en el Consumo específico (Ce).

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. INVESTIGACIÓN PARA UTILIZAR EL COMBUSTIBLE HÍBRIDO GNC + H_2 (20%) OPTIMIZANDO EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

La información internacional indica que las mezclas de GNC con H_2 entre 20 al 30% v/v permiten lograr resultados convenientes en cuanto a emisiones y consumo.

Para poder verificarlo en nuestro motor VW y a efectos de aprovechar las propiedades del H_2, se le instaló el siguiente equipamiento para optimizar su funcionamiento:

- Sistema para control del motor “MOTEC”, que permite programar las variables encendido y alimentación de combustible mediante una ECU (Engine Control Unit), independiente de la original del motor.
- Sistema de control electrónico de inyección de combustibles gaseosos "PVR",(de 5º generación) que posibilita dosificar la cantidad en función del estado de carga del motor.
- Medidor de riqueza de mezcla (señal Lambda), constituido por un instrumento y una sonda Lambda lineal "BERTA INNOVATE".

Para lograr que este instrumental pudiera ser utilizado en los trabajos de investigación, fue necesario obtener los programas de calibración de encendido y alimentación de combustible (Nafta) incorporados en la ECU “Marelli” original del motor. El cual, al ser un “sistema cerrado”, no permite acceder a la información de la fábrica (VW). Por ello, debimos efectuar numerosas pruebas de funcionamiento con el motor para ir determinando los parámetros originales e incorporarlas al equipo MOTEC. Esto permitió investigar los nuevos parámetros de avance al encendido y tiempos de inyección para diferentes Lambda con que se ensayó el combustible híbrido.

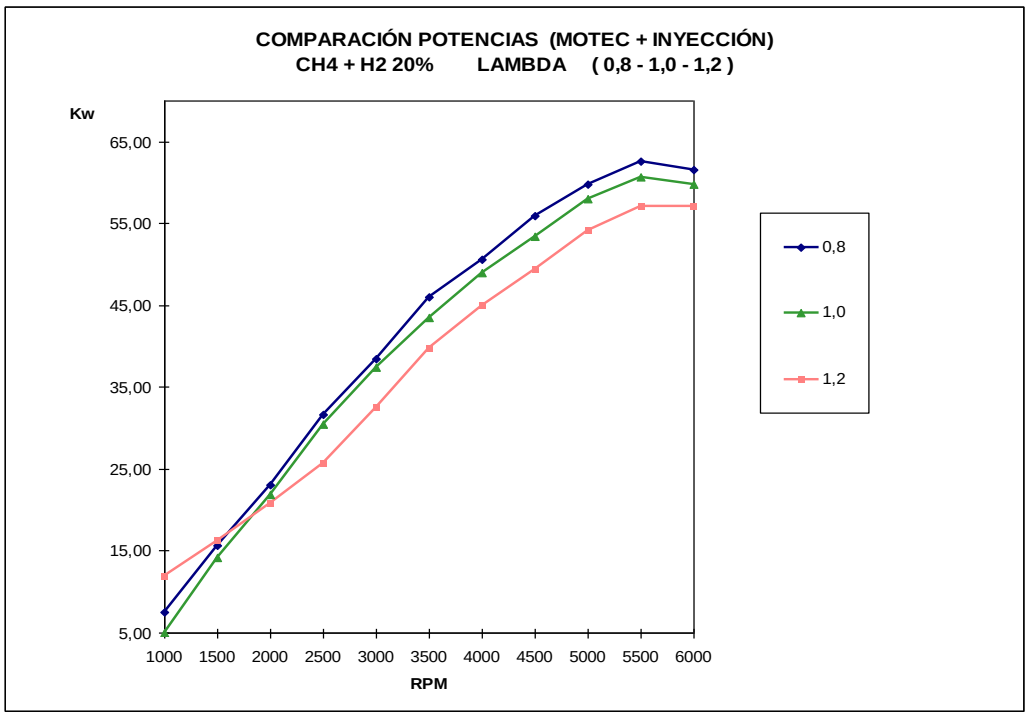


Figura 4: Comparación potencias MOTEC y [CH_4 + H_2 (20%)] para λ = 0,8 – 1 – 1,2

Tabla 5: Valores comparativos para diferentes Lambda

Combustible	**λ**	**RPM**	**Potencia** (kw)	**Temp. Escape** (ºC)	**Consumo específico (Ce)** (gr/kwh)	**CO** (%vol)	**HC** (ppm)	**NOx** (%vol)	**CO_2** (%vol)
Nafta super	0,8	3000	45,5	662	258,5	2,32	104	1580	13,6
CH_4+H_2 (20%)	1,2	3000	34,1	536	168,1	0,17	50	1517	8,6

En la tabla 5 se observa:

- Al aumentar la relación Lambda (empobrecer la mezcla), disminuye la temperatura de escape, con la consecuente disminución de los NOx.
- Se observa que este motor, para λ = 1,2 y el encendido optimizado a pesar de la disminución de potencia mejora tanto el consumo como las emisiones (se reducen)

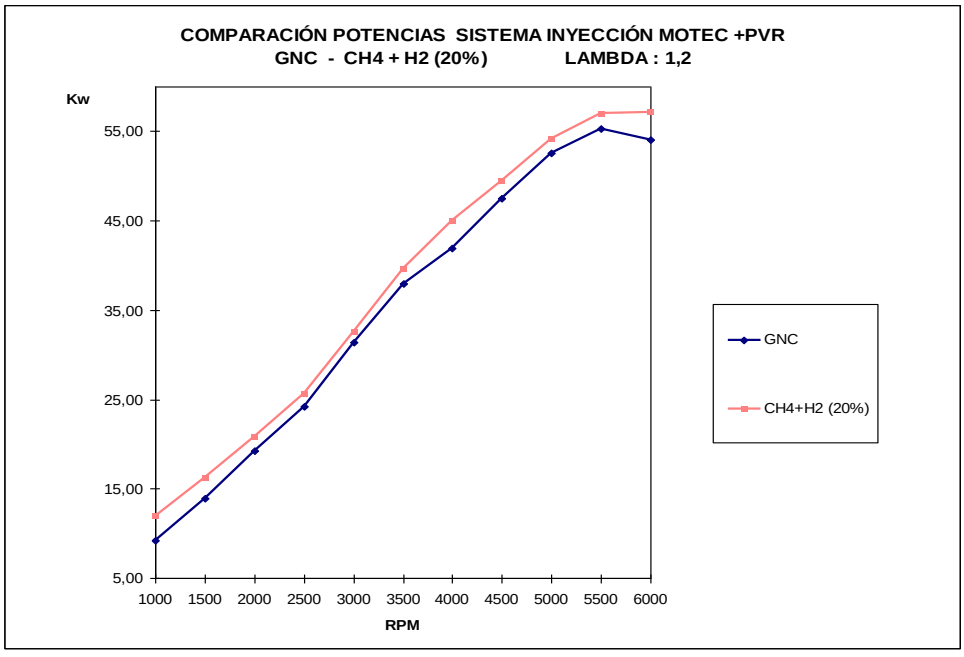


Figura 5: Comparación potencias MOTEC con GNC y [CH_4 + H_2 (20%)] para λ = 1,2

En la figura se observa como resultado de una mejor combustión con el combustible híbrido, se logra una mayor potencia que con el GNC para igual Lambda.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. UTILIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE HÍBRIDO [CH_4 + H_2 (20%)] EN VEHÍCULOS ACTUALES EQUIPADOS CON SISTEMAS DE INYECCIÓN DE 5ª GENERACIÓN

Dada la perspectiva de que este combustible híbrido se utilice en los vehículos mencionados, el Grupo de Investigación está efectuando ensayos preliminares de acuerdo a las siguientes condiciones:

6.1 En Dinamómetro

- Motor VW con su ECU original ("Marelli")
- Sistema de inyección de combustibles gaseosos ("PVR" – 5ª generación)
- Curva de avance de encendido a determinar (MoteC)
- Lambda pobre (a determinar, objetivo: 1,2)

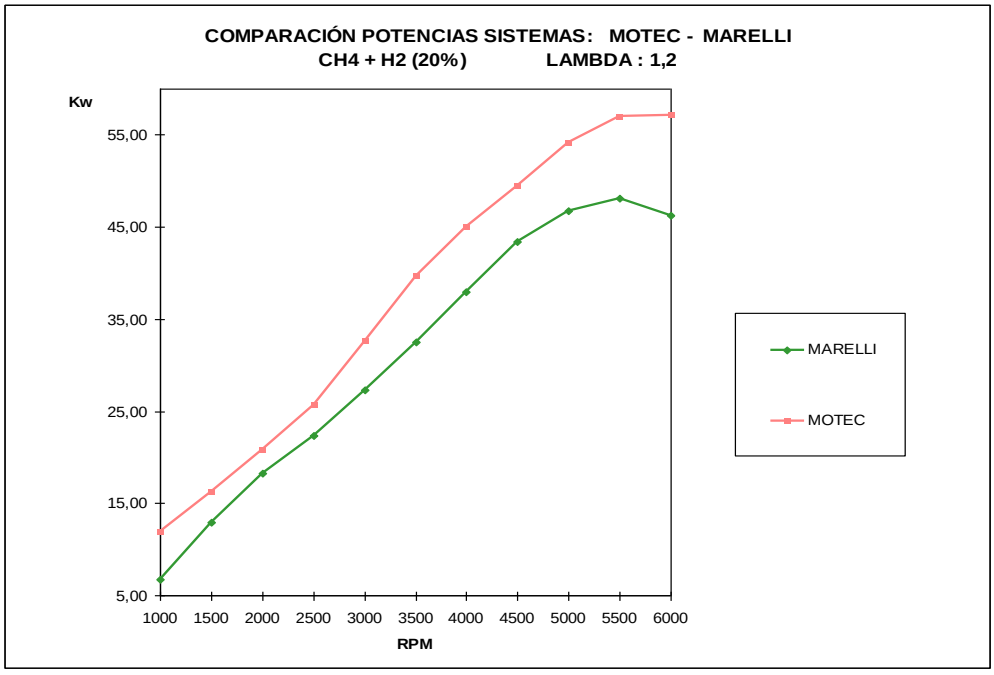


Figura 6: Comparación potencias sistemas MOTEC y MARELLI con [CH_4 + H_2 (20%)] para λ = 1,2

Al comparar las curvas de potencia del mismo combustible híbrido, trabajando con λ = 1,2 para los sistemas optimizado (MOTEC) y standard (MARELLI), se aprecia la magnitud del trabajo a efectuar para lograr un mejor aprovechamiento del combustible con el equipamiento standard del motor y el sistema de inyección de gases de 5ª generación.

6.2 Ensayos en vehículo

El grupo de investigación adaptó el motor de un vehículo Peugeot "408" para que funcione con los combustibles: líquido, nafta (original) y gaseosos, GNC y [GNC + H_2 (20% v/v)].

Para ello se equipó e instrumentó de manera similar a lo efectuado con el motor en dinamómetro. Se comprobó al ensayarlo en la pista de pruebas de la empresa Peugeot que el

ISBN: 978-987-1676-63-7

vehículo funciona correctamente, sin presentar anomalías durante las pruebas de manejo y la aceleración.

7. CONCLUSIONES

Por los mejores resultados obtenidos en las curvas de performance con el combustible híbrido (alternativas 5% y 20%) respecto al GNC, se comprueba la importancia que presenta, para nuestro país, lograr su correcta implementación. También habrá que investigar cuál es el Lambda más conveniente de acuerdo con el porcentaje de hidrógeno a utilizar en su mezcla con GNC y su adecuación á los diferentes motores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Dr. Daniel Pasquevich y a la Dra. Cristina Fernández de Giorgi, de la CNEA, a los docentes del Laboratorio de Máquinas Térmicas (Ing. Francisco Hubana, Ing. Martín Rodríguez, Ing. Oscar Varela, Sr. Néstor Frangi. Alumnos: Ignacio Corro, Javier González), a los integrantes de los departamentos de Mecánica y de Ciencia y Técnica de la FRBA/UTN, a las empresas Air Liquide, PSA Peugeot-Citroen que han participado con nosotros en la realización del trabajo de investigación.

REFERENCIAS

[1] Estévez, Esteban, y Otros. (2003). Effects of hydrogen supplementation in the combustión of natural gas fuelled engines, Hydrogen Research Institute, Universite du Quebec, Canadá.

[2] Kindelan, Jesús. (2009). El hidrógeno, combustible en motores, Politécnica de Valencia, España.

[3] Sierens, Roger. (2007). Hydrogen fuelled internal combustion engines, Universiteit Gent, Holanda.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

AHORRO ENERGÉTICO RESIDUAL POR APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE AGUAS SERVIDAS.

E. Marcelo Turchetti [1], Adela R. Hutin [2] Juan Montesano[3] María C. Zarrabeitía[4] Fontal Ana Lía[5], Lopez Gisela [6].

[1 ,2, 3, 4 ,5 ,6] Grupo de Bioenergía de la Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería
Universidad Católica Argentina
Av. Alicia Moreau de Justo 1500, C1107AAZ, Buenos Aires, Argentina.
correo-e: adelahutin@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto, el diseño de un dispositivo sencillo de ingeniería, para recuperar una fracción del calor perdido, en el agua de descarga de la bañera.
Consiste en el diseño de un intercambiador de calor a contracorriente, de dimensiones acordes al posible espacio, en el cual se calienta el agua de alimentación a la caldera, a expensas de la energía del agua descargada por la bañera.

La metodología empleada, consistió primeramente en explorar la situación energética actual, recabando información y estadísticas del consumo de energía y de agua. Según el relevamiento realizado por Aysa cada porteño gasta en la ducha diaria alrededor de 10 litros por minuto o sea que en una ducha breve de 10 minutos se consumen 100 litros de agua por persona.

Se hizo una evaluación inicial de las características energéticas residenciales, elaborando un perfil de temperaturas, en base a la observación de la conducta de los usuarios mediante encuestas y en diversas mediciones realizadas.

Los primeros resultados obtenidos implican un ahorro energético del 50 %; ello significa menor consumo de combustible y por ende menor contaminación ambiental. Además al ser aprovechada la exergía del agua de descarga [2], se mejora la eficiencia del proceso. Cuando el sistema de calefacción es eléctrico el beneficio económico es mayor.

El sistema propuesto es especialmente conveniente en nuevas viviendas .En las ya construidas el costo de inversión será mayor aunque amortizable a corto plazo. Es factible de instalar en la pileta de cocina con similares características.

Como conclusión este dispositivo implica una mejora en la eficiencia energética y un ahorro energético considerable en el ámbito residencial, aplicable a todo tipo de vivienda y sistema de calefacción.

Palabras Claves: *Ahorro. Aguas servidas. Intercambiador. Aprovechamiento térmico.*

Área Temática: Sistemas Térmicos e Hidráulicos

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía, y las dificultades que hoy día se tiene para satisfacer su creciente demanda, dan cuenta de un escenario de crisis energética no sólo en argentina sino global, lo que ha motivado la búsqueda de nuevas fuentes de energía y además se ha aumentado el interés por implementar procesos que estén orientados al ahorro energético.

Uno de los ejes hacia donde se dirige la investigación, desarrollo e innovación es el de mejorar la eficiencia energética de los procesos. El ahorro y la eficiencia energética son "otra fuente de energía y como tal debe ocupar un lugar en la matriz energética del país".

El tema energético, como así también la problemática de la contaminación del medio ambiente y el cambio climático que ello conlleva, constituye actualmente el punto de partida de cualquier proyecto, diseño o desarrollo.
La metodología empleada en este trabajo, consistió primeramente en explorar la situación energética actual, recabando información y estadísticas del consumo de energía y de agua. Se hizo una evaluación inicial de las características energéticas residenciales, elaborando un perfil de temperaturas, en base a la observación de la conducta de los usuarios mediante encuestas y en diversas mediciones realizadas.
Se implementó un sistema de encuestas dirigida a un grupo de 100 jóvenes estudiantes universitarios, a quienes luego de explicarles el procedimiento a seguir para la obtención de resultados precisos en las medicines, se les preguntó la temperatura a la que se bañan, el tiempo que tardan en hacerlo y el caudal que consumen. El resultados de las encuestas, conjuntamente con otras mediciones realizadas, se compararon con el relevamiento realizado por Aysa, la empresa que provee de agua potable a 10,5 millones de usuarios de Capital y 17 partidos del conurbano, quien asegura que cada porteño gasta 600 litros de agua por día.

Si nos centramos en la ducha diaria se gastan alrededor de 10 litros por minuto o sea que una ducha breve de 10 minutos consumimos 100 litros de agua por persona, en una familia tipo estaríamos gastando 400 litros por día.

Si a ello le sumamos el consumo energético que implica el calentamiento del agua desde una temperatura ambiente que en invierno podría ser de 10° hasta unos 36°C estamos frente a una oportunidad de ahorro energético importante.

Este trabajo tiene por objeto, el diseño de un dispositivo sencillo de ingeniería, para recuperar una fracción del calor perdido, en el agua de descarga de la bañera[3]. Consiste en el diseño de un

ISBN: 978-987-1676-63-7

intercambiador de calor a contracorriente, de dimensiones acordes al posible espacio, en el cual se calienta el agua de alimentación a la caldera, a expensas de la energía y exergía del agua descargada por la bañera.

Actualmente, el agua servida de la ducha se envía directamente al desagüe, perdiendo su energía calórica, dada por la temperatura, que es levemente inferior a la de la ducha, y con un contenido energético similar.

La propuesta de este trabajo es recuperar parte de ese calor, en un intercambiador de superficie, precalentando el agua de ingreso a la caldera que finalmente lleva el agua a la ducha.

Los primeros resultados obtenidos implica un ahorro energético de alrededor de un 50 %; ello significa menor consumo de combustible o de energía eléctrica. El sistema propuesto es factible de instalar en la pileta de cocina con similares características.

Como conclusión este dispositivo implica una mejora en la eficiencia energética y un ahorro energético considerable en el ámbito residencial aplicable a todo tipo de vivienda y sistema de calefacción.

2. DESARROLLO

Para implementar la propuesta de recuperar el calor del agua de descarga de la ducha, se pensó en un intercambiador de tubos concéntricos a contracorriente [1], para ser instalado debajo de la bañera, aunque esto último no es limitante.

En la figura 1 se representa en forma esquemática la instalación, con la indicación de las temperaturas y caudales considerados en los cálculos correspondientes.

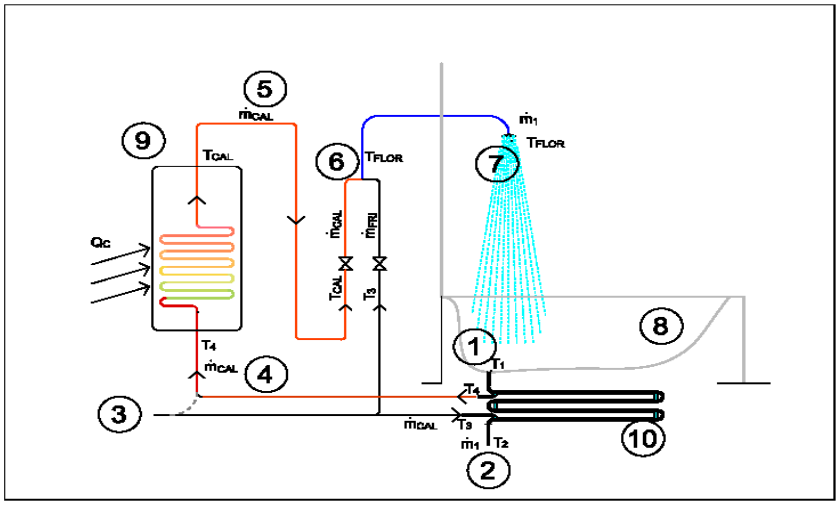


Figura 1: Esquema de la instalación 1 - Agua servida a T_1. 2 - A desagüe. 3 - Entrada de agua fría a T_3. 4 - Agua precalentada a T_4. 5 - Agua caliente de caldera a T_{CAL}. 6 - Mezclador de agua caliente y fría. 7 – Flor. 8 – Bañera. 9 – Caldera. 10 – Intercambiador.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Figura 1: Esquema de la instalación

Para el conjunto de valores elegidos, se calculó el ahorro energético dado por el recuperador respecto del sistema convencional

El intercambiador de calor se diseñó con dos tubos concéntricos de acero inoxidable, de dimensiones disponibles en la oferta comercial, con un largo efectivo de 7 metros, calculado en función de los parámetros disponibles.

El flujo de agua a calentar para ingresar a la caldera , circula en el tubo exterior y el agua servida en el interior. Los parámetros de diseño son:

Tabla 1. Parámetros de diseño

Parámetros de diseño				
Tubo interno	Diámetro interno	14,8	mm	AISI 316
	Pared	0,5	mm	
Tubo externo	Diámetro interno	23,4	mm	
Temperatura del agua en la flor	T_{FLOR}	36	℃	
Temperatura del agua a la salida de la bañera	T_1	34	℃	
Temperatura del agua fría de la red de distribución.	T_3	10	℃	
Caudal de agua en la ducha	$\dot{m}_1$	10	litros / minuto = kg / minuto	
Cauda de agua caliente(de caldera)	$\dot{m}_{CAL}$	10	litros / minuto = kg / minuto	
Temperatura del agua de caldera	T_{CAL}	= T_{FLOR} = 36	℃	(sin mezclar con agua fría)

Con estas condiciones, se calcularon las temperaturas de salida del intercambiador y las caídas de presión de ambos flujos dentro del mismo. El cálculo de la transferencia de calor entre ambos flujos de agua es el convencional, mostrado en la bibliografía [1]

$$Nu = 0{,}22 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.6} \quad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$\alpha = \frac{Nu \cdot k}{D} \tag{2}$$

$$\alpha_t = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{e}{k} + \frac{1}{\alpha_e} \tag{3}$$

$$Q_{INT} = \alpha_t \cdot A \cdot \Delta t_m \tag{4}$$

Nu número de Nusselt

Re número de Reynolds

Pr número de Prandtl

α, α_i, α_e, α_t Coeficientes de convección, interno, externo y total

k conductividad térmica

e espesor de pared

Q_{INT} Calor intercambiado

A área de intercambio

Δt_m Diferencia de temperatura media en el intercambio

Debido al precalentamiento del agua a la entrada de la caldera se obtiene una nueva temperatura T_4 con la que se determinó la energía necesaria, la ahorrada y el porcentaje correspondiente.

$$Q_{AHO} = Q_{SP} - Q_{CP} = \dot{m}_{CAL} \cdot c \cdot \left((T_{CAL} - T_3) - [(T]_{CAL} - T_4)\right) = \dot{m}_{CAL} \cdot c \cdot (T_4 - T_3) \tag{5}$$

$$a = \frac{Q_{AHO}}{Q_{SP}} \cdot 100\% \tag{6}$$

C calor específico del agua

Tabla 2. Valores calculados

Valores calculados			
Temperatura de agua servida	T_2	21,43	℃
Temperatura de agua precalentada	T_4	22,57	
Calor de caldera sin precalentamiento	Q_{SP}	18,16	kW
Calor de caldera con precalentamiento	Q_{CP}	9,38	

ISBN: 978-987-1676-63-7

Calor ahorrado	Q_{AHO}	8,78	
Ahorro porcentual	a	48,3	%
Caída exterior de presión (a. precalentada)	ΔP_{EXT}	0,618	metros de columna de agua
Caída interior de presión (agua servida)	ΔP_{INT}	0,603	

3. RESULTADOS

Estos resultados muestran que se trata de un ahorro del 48% de la energía utilizada para calentamiento de agua domiciliaria para la ducha, con gran potencial, dado que representa una fracción importante del consumo energético urbano.

También se observa que las caídas de presiones no son despreciables. Para el agua precalentada, 0,62 m no afecta al normal funcionamiento del sistema, ya que normalmente representa una fracción de la altura disponible, dado que el tanque de agua se encuentra a varios metros de altura.

La caída de presión para el agua servida, 0,6 m, es grande y el sistema así propuesto no lo admite, por lo que hay que interponer una bomba entre la bañera y el intercambiador. En algún caso podrá instalarse en un piso inferior y evitar el uso de la bomba.

Otro problema no planteado aún, es que la suciedad del agua servida pueda obstruir parcial o totalmente el tubo interior. A fin de evitarlo, será necesario instalar un filtro adecuado en la salida de la bañera, fácil de retirar para su limpieza periódica.

En caso de utilizar una bomba eléctrica, dado el bajo caudal (10 l/min) y la baja diferencia de presión a compensar (0,6 mca) la potencia necesaria resultante es muy baja, 1,1 W y aún con bajo rendimiento, sigue siendo de muy bajo valor.

Una alternativa interesante al uso de la bomba eléctrica, es utilizar la exergía del flujo [3] del agua limpia, para impulsar el otro, utilizando un conjunto turbina bomba acopladas mecánicamente, especialmente diseñado. De este modo se aumenta la caída de presión del agua limpia, generalmente disponible, para compensar la caída del agua servida en el intercambiador. Con esta solución, no es necesaria una instalación eléctrica adicional.

3.1 Análisis de variaciones de parámetros

3.1.1. *Influencia del largo del intercambiador en el ahorro energético*

ISBN: 978-987-1676-63-7

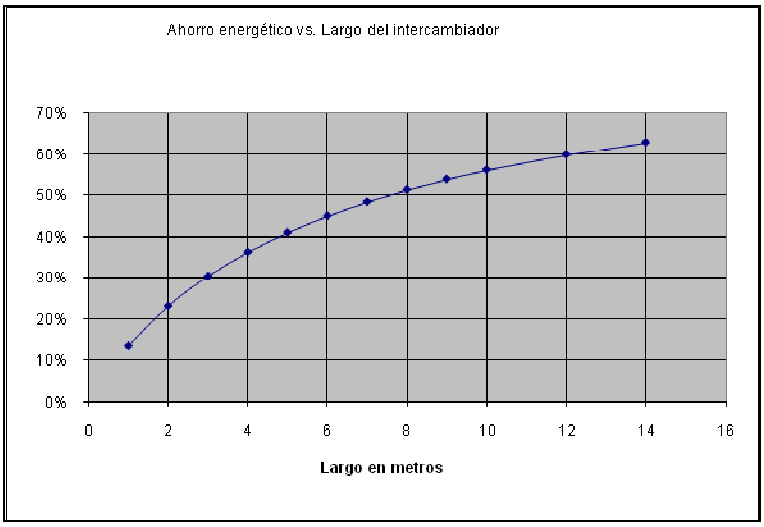


Figura 2: Ahorro energético vs longitud del intercambiador

Se observa que con longitudes muy inferiores a los 7 metros, originalmente propuesto, por ejemplo 3 metros, se supera el 30% de ahorro. Al mismo tiempo se reducen las caídas de presiones a 0,26 m.

En cambio si se duplica la longitud, se puede obtener un ahorro de 63%, aunque las caídas de presión se duplican (1,24 m).

3.1.2. *Influencia de la temperatura de la caldera*

Se evalúa el ahorro en función de la temperatura de caldera, sin mezcla con agua fría, $T_{CAL} = T_{FLOR}$

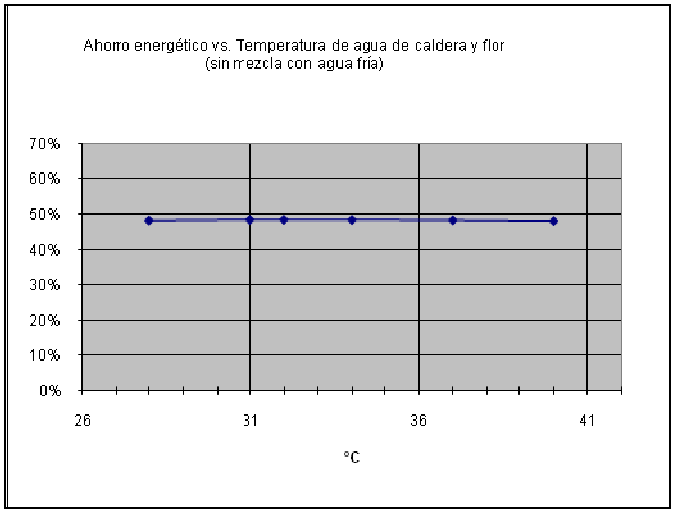


Figura 3: Ahorro energético versus Temperaturas del agua

ISBN: 978-987-1676-63-7

El ahorro porcentual es casi invariable con la temperatura de flor y caldera.Manteniendo la temperatura del agua de la flor en T_{FLOR} = 36°, mediante la mezcla del agua de caldera con agua fría, se obtiene la siguiente curva de variación:

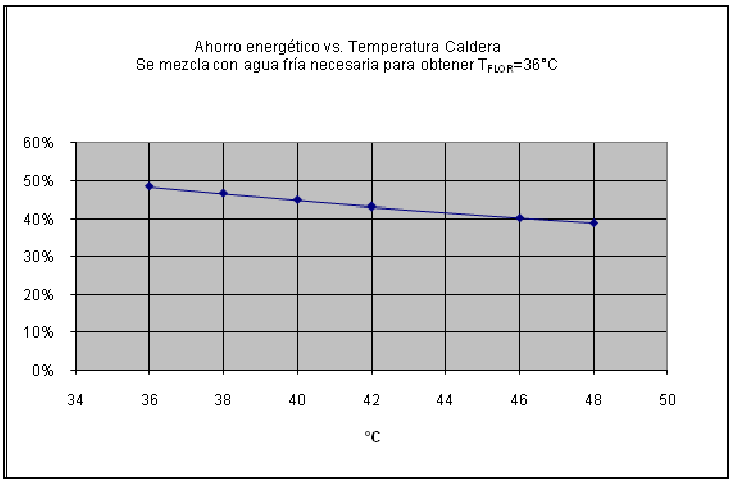


Figura 4: Ahorro energético vs. Temperatura de caldera

En estas condiciones, manteniendo el caudal de agua en la ducha, a medida que aumenta la temperatura del agua de la caldera, disminuye su caudal, mezclándolo con agua fría.

3.1.3. *Influencia de la temperatura del agua fría*

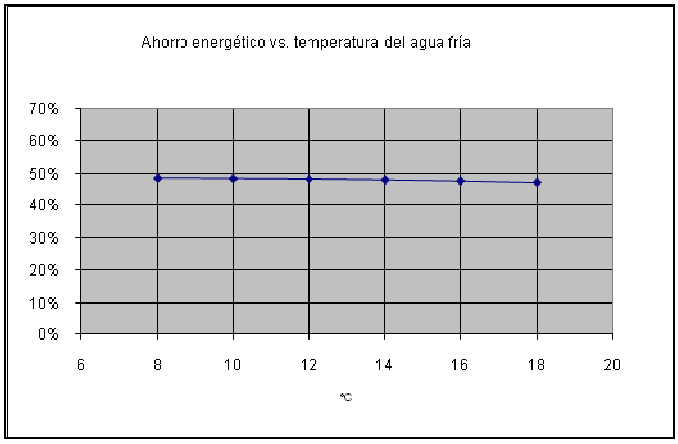


Figura 5: Ahorro energético vs. Temperatura del agua fría

No se observan variaciones significativas del ahorro al cambiar la temperatura del agua fría.

3.1.4. *Influencia del caudal de agua de la ducha*

ISBN: 978-987-1676-63-7

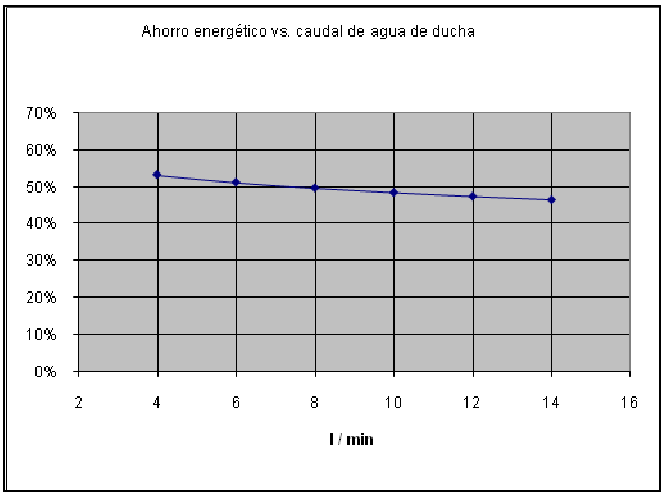


Figura 6: Ahorro energético vs. Caudal de agua de ducha

El ahorro porcentual del recuperador de calor es poco dependiente del caudal de agua utilizado. Las caídas de presiones varían de 0,12 m a 4 l/min hasta 1,1 m en 14 l/min.

3.1.5 *Influencia del tamaño de la sección del intercambiador*

Ambos diámetros variando proporcionalmente

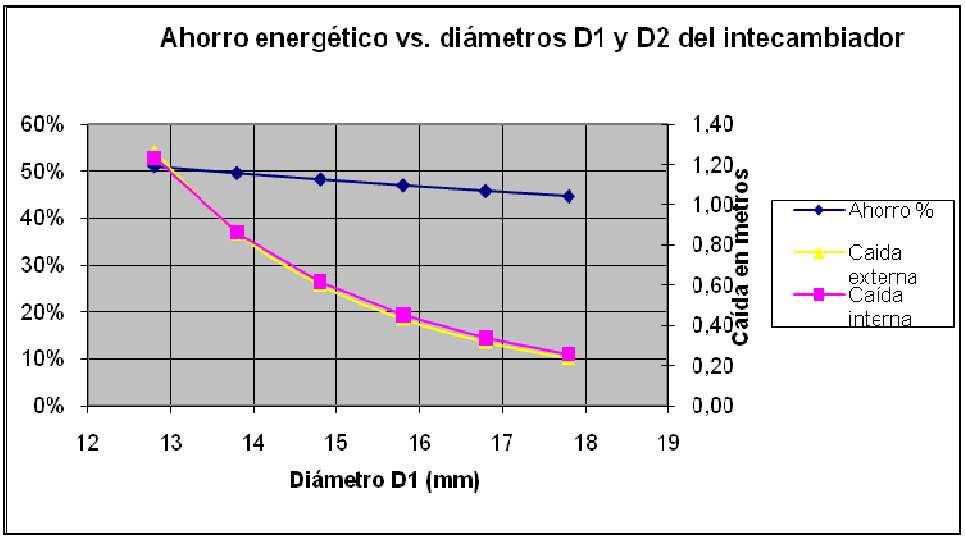


Figura 7: Ahorro energético vs. Diámetros de cañerías.

A medida que se reducen las secciones, aumenta levemente el ahorro, en cambio aumentan mucho las pérdidas de carga. Para mantener el grado de ahorro, disminuyendo las caídas de presio-

ISBN: 978-987-1676-63-7

nes, habría que aumentar las secciones y el largo del intercambiador, con el consecuente aumento de tamaño y costo de inversión.

3.2 Aspectos exergéticos de la transferencia y recuperación de calor [2]

En virtud de su temperatura, un flujo de agua, asumiendo que la presión es constante, tiene una exergía (Ex) dada por [2,3]

$$Ex = m \cdot c \cdot (T - T_0) - T_0 \cdot c \cdot \ln\,(T / T_0) \qquad (7)$$

m masa de agua en circulación

c calor específico de agua

T_0 temperatura del estado muerto $T_0=T_3+273=283K$

Así, para el agua de descarga de la bañera, Ex_1 = 0,673 kW, para la salida del agua servida del intercambiador, Ex_2 = 0,157 kW, y para el agua precalentada, Ex_3 = 0,189 kW. Obsérvese qué bajos son los valores comparados con los calores puestos en juego. Esto es así debido a que las temperaturas del agua son cercanas a la del medio ambiente. En la caldera, si el calentamiento fuera eléctrico, el rendimiento exergético [3] sería apenas de η_{EX} = 3,7%, y si fuera a gas combustible se obtendría casi el mismo valor.

Sin tener en cuenta la gran pérdida exergética de la caldera, en el intercambiador el rendimiento exergético es

$$\eta_{EX} = \frac{Ex_4}{Ex_1 - Ex_2} = 37\% \qquad (8)$$

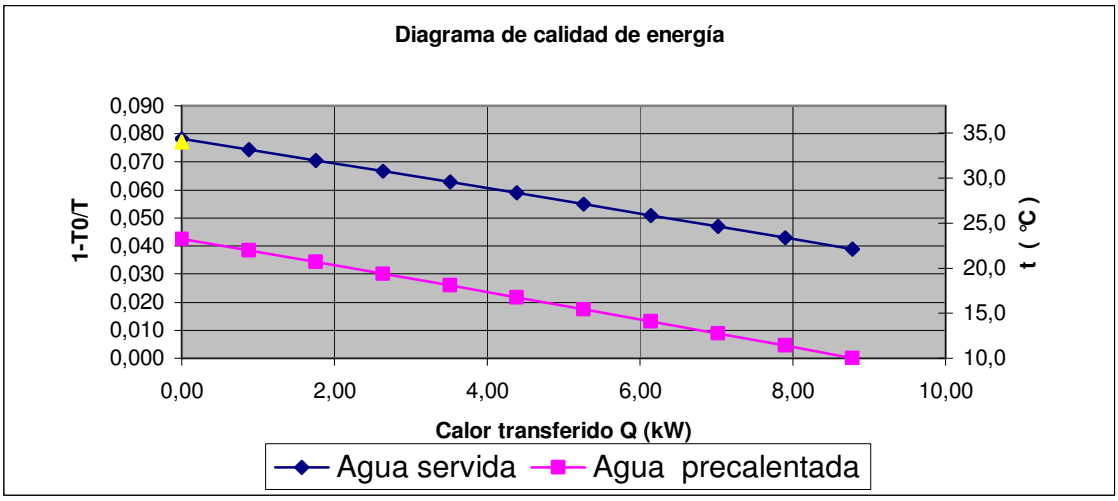


Figura 8: Diagrama de Calidad de Energía o de exergías en la transferencia de calor.

En las curvas de la figura **8**, el área debajo de ellas representa las exergías. El área debajo de la curva superior (agua servida caliente) representa la exergía perdida por ella en la transmisión de calor. El área debajo de la curva inferior (agua limpia precalentada) es la exergía ganada de esta corriente.

4. CONCLUSIONES

Los primeros resultados obtenidos implica un ahorro energético de alrededor de un 50 %; ello significa menor consumo de combustible (o de energía eléctrica). El agua de descarga, al ser aprovechada su exergía, mejora la eficiencia del proceso.

Se observa que el ahorro no es lineal con la longitud del intercambiador, de modo que aún con pequeñas longitudes se obtienen ahorros considerables, disminuyendo aproximadamente en forma proporcional la caída de presión.

Se evalúa el ahorro en función de la temperatura de caldera, sin mezcla con agua fría, siendo el ahorro porcentual casi invariable con la temperatura de flor y caldera.

Manteniendo la temperatura del agua de la flor mediante la mezcla del agua de caldera con agua fría, se observa que a medida que aumenta la temperatura del agua de la caldera, debe disminuir su caudal, para mantener el caudal constante en la ducha.

Otro aspecto interesante no se observan variaciones significativas del ahorro porcentual al cambiar la temperatura del agua fría.

El ahorro porcentual del recuperador de calor es poco dependiente del caudal de agua utilizado.

A medida que se reducen las secciones, aumenta levemente el ahorro, en cambio aumentan mucho las pérdidas de carga.

Como conclusión este dispositivo implica una mejora en la eficiencia energética y un ahorro energético considerable en el ámbito residencial aplicable a todo tipo de vivienda y sistema de calefacción

El sistema también puede instalarse en la pileta de cocina, con las mismas funciones y beneficios. También puede recuperarse el calor de desagües de varias bañeras y piletas simultáneamente, con el agregado de un sistema de automatización que habilite uno u otro intercambiador, de la manera más conveniente, con sensores de temperaturas en cañerías y electroválvulas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Es sistema y tipo de intercambiador elegido, debe tomarse como un ejemplo y no como modelo a seguir. Lo importante es el ahorro de energía que puede lograrse con un sistema de intercambio de calor entre el agua servida y el agua a calentar. El sistema mostrado en el presente trabajo permitió establecer dimensiones, analizar variables, y cuantificar el posible ahorro energético.

5. REFERENCIAS

[1] Kern Donald Q., *Procesos de Transferencia de Calor,* CECSA, Mexico, 1986.

[2] Cengel Yonus A., Cimbala Johon M., *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y aplicaciones*, Mc Graw Gill Interamericana, Mexico, 2006.

[3] Moran Michael J, Shapiro Howard N., *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, Editorial Reverté, Barcelona, España, segunda edición (correspondiente a la 4ta del Original).

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EFEITOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO REFRIGERANTE EM REATORES NUCLEARES REFRIGERADOS A ÁGUA LEVE

Isabela Carolina dos Reis, Amir Zacarias Mesquita, Roberto Pellacani G. Monteiro e Alexandre Melo de Oliveira, Rose Mary Gomes do Prado Souza, Sincler Meireles Peixoto.

Serviço de Tecnologia de Reatores – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN)
Campus da UFMG - Pampulha, Belo Horizonte, Brasil
isacarolreis@yahoo.com.br; amir@cdtn.br

RESUMO

O monitoramento radioquímico e físico-químico dos reatores à água leve, tanto nos reatores de potência como nos reatores de pesquisa é uma das tarefas mais importantes na operação segura do sistema. Nos últimos anos tem aumentado o interesse no estudo da química do refrigerante para otimizar o processo, reduzir as doses de exposição à radiação, assegurar a integridade dos materiais do sistema primário e garantir a integridade do combustível. Assim, é de fundamental importância o conhecimento dos parâmetros de controle da água do refrigerante primário de reatores nucleares.

O objetivo, principal, deste trabalho é a realização de um estudo dos componentes da água do circuito de refrigeração dos reatores à água leve, com destaque aos reatores a água pressurizada (PWR). Será enfocado, principalmente, o estágio atual do controle de qualidade da água. Uma importante contribuição do trabalho será o conhecimento e reprodução com maior fidelidade do refrigerante dos reatores PWR em circuitos experimentais, como os existentes no Laboratório de Termohidráulica do Serviço de Tecnologia de Reatores, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), uma instituição de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN/Brasil).

Neste trabalho propõe-se também conduzir uma série de experimentos de medida da variação da reatividade (neutrônica) do núcleo de reatores, através da inserção de amostras com concentrações diferentes de ácido bórico, no tubo central do reator nuclear de pesquisa TRIGA IPR-R1. Reator este localizado no CDTN, em Belo Horizonte. Assim, será levantada uma correlação entre este importante absorvedor de nêutrons na reatividade do reator.

Palavras Chaves: *Reatores nucleares, termo-hidráulica, refrigerante, ácido bórico, química da água.*

1. INTRODUÇÃO

Mais de 95% dos reatores nucleares são refrigerados a água. Nos reatores PWRs a água é utilizada nos circuitos primários, nos circuitos secundários e nos sistemas auxiliares. A água pode ser um meio agressivo em especial em temperaturas e pressões elevadas, quando em contato com materiais estruturais. Isto significa que a confiabilidade dos muitos sistemas das usinas nucleares (combustível, geradores de vapor, etc.) é dependente da química da água durante as operações normais, partidas, desligamentos e operações anormais. Especificações avançadas da química da água têm sido desenvolvidas para os atuais reatores refrigerados a água. No entanto, ainda há algum espaço para melhorias. A experiência adquirida nos reatores em uso mostra que, mesmo em condições normais de operação, alguns efeitos indesejáveis podem ocorrer como: corrosão, erosão ou deposição de produtos de corrosão nas superfícies de transferência de calor [1].

O revestimento dos combustíveis é a primeira barreira contra a liberação dos produtos de fissão e todas as medidas necessárias devem ser tomadas para manter sua integridade. O pH da água é o mais importante fator no controle de impurezas no primário dos reatores a água pressurizada. Ocorre o aumento do nível de radiação devido a ativação neutrônica das impurezas existentes. Conforme pesquisa realizada por Lima (2011) [2] evidenciou-se que o conteúdo de hidrogênio dissolvido, adicionado à água de reatores PWR para prevenir a radiólise das moléculas de água, pode influenciar na suscetibilidade à corrosão sob tensão.

A otimização química dos sistemas primários de reatores PWR recentemente tem sido complicada pela demanda de ciclos combustíveis mais longos (no qual geralmente requerem altas concentrações iniciais de boro), imposto sobre o combustível aumentado (mais ebulição subresfriada) e interesse na corrosão do material/combustível. As preocupações atuais focam em minimizar os custos sem sacrificar a segurança ou integridade dos materiais [3].

O propósito deste trabalho é fornecer orientação sobre o controle químico do refrigerante primário para continuar a potencializar à longo prazo a disponibilidade das plantas PWR. A indústria de energia nuclear tem compilado um excelente histórico de desempenho em manter a integridade dos componentes do sistema primário de reatores PWR. Além disso, o controle químico da água do primário pode e tem sido efetivamente usado para controlar o acúmulo do campo de radiação nas superfícies fora do núcleo [3]. Deste modo, o conhecimento dos componentes da água do primário dará condições de se reproduzir com mais fidelidade o refrigerante em circuitos de experimentação, para futuras demandas de testes a serem realizados em circuitos experimentais de simulação da água de refrigeração de reatores.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. FUNÇÕES DA QUÍMICA DO REFRIGERANTE

As funções de maior importância da água de refrigeração de reatores PWR são como meio de transporte de calor do reator para o gerador de vapor e moderação de nêutrons rápidos produzidos pela fissão nuclear. A fim de executar essas funções de forma eficiente, o controle químico da água se faz necessário, com os principais propósitos: minimizar o número de movimentos das barras de controle através da inserção de boro no refrigerante para controlar a reatividade, garantir a integridade do sistema refrigerante do reator e do combustível e minimizar o acúmulo do campo de radiação na planta [4]. Cada um desses propósitos será mostrado a seguir.

3. CONTROLE DA REATIVIDADE DO NÚCLEO

Em reatores PWR, mudanças lentas na reatividade são controladas usando ácido bórico dissolvido no refrigerante do circuito primário. O ajuste da concentração de boro no refrigerante fornece uma compensação para a reatividade do reator e controle da geração de energia. Isto assegura a segurança do reator durante a inicialização, mudanças de potência, desligamento, bem como operações de reabastecimento e manutenção. O isótopo ^{10}B do boro tem uma grande seção de choque (5 barn) e captura nêutrons que de outro modo contribui para a reação de fissão nuclear. O boro natural contêm 19,8% de ^{10}B com o restante na forma de ^{11}B . O isótopo de ^{11}B é quase ineficaz como um absorvedor de nêutrons [1]

O ácido bórico possui um número de vantagens importantes comparado a outros absorvedores de nêutrons solúveis em água; é facilmente dissolvido pela água e sua solubilidade aumenta com o aumento da temperatura. Ele não se deposita e nem forma compostos capaz de depositar em superfícies interiores dos componentes de construção de um reator. Contudo, o uso de ácido bórico tem certas desvantagens que requerem ajuste químico da água. A presença de ácido bórico no circuito primário reduz o pH, causando corrosão e deposição de produtos de corrosão nos elementos combustíveis. Além disso, o ácido bórico complica a remoção de certas impurezas do refrigerante do reator bem como o tratamento dos resíduos líquidos radioativos das plantas nucleares.

4. INTEGRIDADE DOS MATERIAIS DO SISTEMA REFRIGERANTE DO REATOR

A química da água impacta tanto na corrosão generalizada como na corrosão sob tensão dos materiais do sistema refrigerante do reator. A corrosão generalizada é um processo de oxidação que ocorre relativamente uniformemente sobre uma superfície material. Se o ambiente é corretamente controlado, o filme de óxido formado irá conduzir a uma redução na dose de corrosão até que uma condição de estado estacionário seja atingida entre a espessura do filme de óxido e a taxa de corrosão generalizada [3].

No lado primário do gerador de vapor, a corrosão sob tensão pode levar à fratura dos tubos. Os defeitos são estabelecidos no fim das zonas expandidas dos tubos ou na vizinhança das placas

ISBN: 978-987-1676-63-7

suporte de tubos quando ocorre amassamento (“denting”), ou também na parte superior na região de dobramento dos tubos (U-bend). Estes defeitos são atribuídos à corrosão sob tensão intergranular a qual pode ocorrer quando o material está sob alto nível de tensão mesmo em água pura à alta temperatura e livre de oxigênio.

5. INTEGRIDADE DO COMBUSTÍVEL

O revestimento da barra de combustível de liga de zircônio forma a primeira barreira contra a liberação de produtos de fissão produzidos durante a operação à potência. Manter a integridade do revestimento é, portanto, o principal objetivo para segurança operacional da unidade. As ligas de zircônio podem ser afetadas por corrosão, por desenvolvimento de depósito de produtos de corrosão, e por fragilização por hidrogênio. Todos os três processos são influenciados pela química da água.

A redução da espessura do revestimento causado pela formação de uma camada de ZrO_2 e a fragilização do revestimento devido à absorção de hidrogênio pela liga de zircônio são os dois principais processos causadores do efeito da corrosão na integridade do revestimento combustível. Os fatores que afetam a reação química incluem temperatura, a microestrutura do revestimento do material, ebulição local e a química do refrigerante. Uma vez que o revestimento transfere o calor para o refrigerante, sua temperatura durante a operação à potência é sempre maior do que aquela do refrigerante. A taxa da reação de corrosão acima é dependente da temperatura na interface metal/óxido metálico (Zr/ZrO_2)). À medida que a espessura do óxido cresce, a temperatura na interface aumenta que por sua vez aumenta a taxa de corrosão. A formação de uma camada de óxido espessa pode causar uma perda da integridade do revestimento atribuída às propriedades de isolamento térmico do ZrO_2 ou outros depósitos. Além da temperatura, o material do revestimento desempenha um importante papel no processo de corrosão e no processo de fabricação [3].

Com a química da água dentro do especificado, sem impurezas agressivas, a corrosão generalizada e a oxidação do zircaloy ou ligas de Zr/Nb do revestimento não são consideradas um risco para a integridade do revestimento do combustível. A taxa de corrosão está relacionada em alguma extensão às características metalúrgicas do revestimento e também à temperatura local. Assim, o comportamento de oxidação pode variar consideravelmente em diferentes regiões do núcleo do reator [5].

Deposição “Crud”

A deposição de produtos sobre a superfície de revestimento (deposição “crud”) é um processo bem conhecido na operação de reatores tipo PWR. Os produtos de corrosão estão presentes na forma dissolvida ou em suspensão e podem se depositar sobre a superfície do revestimento. Em geral, estes depósitos são relativamente inofensivos para a integridade do combustível, mas serão

ISBN: 978-987-1676-63-7

dependentes de suas formas físicas e a influência que podem ter na transferência de calor [5]. A precipitação desses depósitos no núcleo deve ser evitada tanto quanto possível uma vez que conduz a incrustação do combustível, perda de eficiência de transferência de calor, levando potencialmente a falhas no combustível e campos de radiação aumentados [1]. Tais depósitos têm sido identificados como ferritas de níquel não estequiométricos, onde $0,4 < x < 0,8$ [3]. Observou-se também que valores abaixo do normal de pH e hidrogênio conduzem a um depósito sobre o revestimento de produtos de corrosão mais denso que o esperado aumentando a temperatura do revestimento e consequentemente sua taxa de corrosão. O mesmo ocorre quando há a precipitação de algumas espécies como compostos tipo zeólitos presentes no refrigerante [3], [5].

AOA

A anomalia na deformação do fluxo térmico ao longo da vareta combustível, denominada AOA do inglês: “Axial Offset Anomaly” é definida como um significativo deslocamento axial negativo do valor do projeto nuclear previsto [6]. A causa raiz da AOA é a deposição de produto de corrosão na parte superior dos elementos combustíveis como um resultado da ebulição nucleada subresfriada [3]. Esta anomalia pode causar: uma troca inesperada de distribuição de potência do núcleo; uma anormalidade axial gerada pela concentração de boro que reage com os óxidos depositados; o ataque de corrosão localizada gerando furos micrométricos; desigualdade no aquecimento da vareta e oxidação irregular [7].

6. CONTROLE DO CAMPO DE RADIAÇÃO

A radioatividade no sistema refrigerante primário provém principalmente de produtos de fissão da contaminação externa ou vazamentos através de defeitos ou falhas no revestimento do combustível e também da ativação com nêutrons de impurezas no sistema refrigerante do reator. Essas impurezas resultam principalmente de erosão ou corrosão dos componentes do sistema primário [1]. Sob condições de operação normal com pouca ou nenhuma falha no combustível, os produtos de corrosão ativados são responsáveis por mais de 90% dos campos de radiação fora do núcleo [5].

A fonte primária em longo prazo dos campos de radiação em reatores PWR é o cobalto-60, como um resultado da absorção de nêutron pelo cobalto-59, e o cobalto-58 pelo bombardeamento de nêutron o níquel-58. A maior fonte de níquel no refrigerante do reator é proveniente da corrosão da liga 600 dos tubos dos geradores de vapor, enquanto cobalto é encontrado como uma impureza nestes materiais [3]. Outras origens passíveis de cobalto vêm da corrosão e desgaste de ligas com alto conteúdo de cobalto (usadas em bombas e válvula do sistema primário e no mecanismo de acionamento das barras de controle) e desprendimento por corrosão da tubulação do primário e da parede do vaso do reator. O cobalto 60 é a principal origem de campos de radiação, exceto no início da vida de reatores tipo PWR, quando o cobalto-58 vindo de produtos de corrosão de tubos

ISBN: 978-987-1676-63-7

de geradores de vapor predomina. Para controlar a produção de campo de radiação é importante minimizar a entrada de cobalto dentro do sistema do reator. Isto pode ser feito especificando-se o grau máximo de impurezas de cobalto no material usado para troca do combustível, componentes do núcleo e para a troca de válvulas recobertas com ligas de metal duro contendo cobalto. É também importante um cuidado especial na remoção de resíduos oriundos de reparo de componentes e manutenção de válvulas. Embora muitos fatores influenciem os campos de radiação, a estimativa de dados de unidades de reatores tipo PWR indica que um bom controle da química da água pode reduzir campos de radiação para pelo menos 30%. O grau de benefício do controle da química da água varia com o tipo de reator e projeto do sistema [5].

7. QUÍMICA DA ÁGUA DO PRIMÁRIO DE REATORES PWR

7.1 Insumos químicos

Com o objetivo de melhorar o desempenho das usinas nucleares, minimizar os campos de radiação e diminuir problemas de danos às estruturas do reator e do combustível, alguns insumos químicos são adicionados na água de refrigeração dos reatores PWR. Atualmente, os principais insumos químicos adicionados ao refrigerante dos reatores são ácido bórico, hidróxido de lítio, hidrogênio e zinco.

Ácido Bórico

A água do primário de um PWR contém boro como ácido bórico para controlar a reatividade do núcleo através da absorção neutrônica do ^{10}B. A concentração de ^{10}B é imposta pelas características e design do núcleo e pela queima de combustível. Boro natural contém apenas cerca de 20% de ^{10}B , o isótopo útil em absorção neutrônica. Isso significa que o conteúdo de boro total requerido no início de um ciclo encontra-se geralmente na faixa de 1000-2000 ppm de B e progressivamente diminui através do ciclo combustível com a queima de combustível. No fim do ciclo combustível a concentração de boro alcança poucos ppm ou está próximo de zero [1]. Embora o ácido bórico seja fracamente dissociado, particularmente em altas temperaturas, um ambiente ácido é inaceitável, pois aumenta a corrosão dos materiais com sua presença, como consequência a alta ativação e transporte de produtos de corrosão no sistema. Por este motivo, hidróxido de lítio é adicionado na água a fim de obter um ambiente ligeiramente alcalino.

Hidróxido de Lítio

Uma vez que o ácido bórico causa um decréscimo no pH da água, um reagente alcalino (hidróxido de lítio) é adicionado na água em pequenas quantidades para alcançar um pH ligeiramente alcalino à temperatura de operação o que minimiza a corrosão e a geração/transporte de produtos de corrosão [1].

ISBN: 978-987-1676-63-7

O Li natural não é usado já que contém uma proporção muito alta de ^{6}Li (cerca de 7,42%), o qual é ativado em indesejável trítio. Ao invés disso, é usado lítio enriquecido acima de 99% de ^{7}Li. O hidróxido de lítio enriquecido em lítio-7 tem sido escolhido como agente alcalino porque apresenta como vantagens uma pequena seção de choque de absorção de nêutrons, não produz isótopos radioativos como sódio e potássio, nem produtos de decomposição como a amônia, seu efeito é menor sobre o revestimento do elemento combustível de zircaloy-4 e está disponível a um preço moderado, sendo que seu uso torna desnecessário outros agentes alcalinos adicionais.

Além disso, tal deposição sobre o combustível aumentará as condições de ebulição nucleada que não deveria existir em um sistema primário de um PWR, como é em um BWR. Finalmente, há o risco adicional de permitir outros compostos precipitarem nesses depósitos com consequências na corrosão, transferência térmica e radioativação. Consequentemente, em muitos casos, a concentração de lítio tem que ser limitada a 2,2 mg/kg principalmente para evitar corrosão no revestimento do combustível, com base nas restrições do fornecedor do combustível, levando ao baixo pH_T e controle não otimizado de ativação e transporte de produtos de corrosão perto do início do ciclo combustível.

Hidrogênio

O gás hidrogênio é adicionado ao circuito primário de refrigeração para suprimir o oxigênio formado pela radiólise da água. O baixo conteúdo de hidrogênio aumenta o nível de oxigênio. A radiólise é a interação da radiação com a água. Durante a operação, quando a água de refrigeração passa através da região do núcleo de um reator em operação, ela é exposta a intensa radiação. Os principais componentes do campo de radiação são nêutrons, prótons, raios gama e elétrons de alta energia (partículas beta).

Zinco

O zinco está sendo atualmente adicionado no refrigerante de reatores PWR com o propósito de reduzir a geração e transporte de produtos de corrosão para o núcleo e diminuição da susceptibilidade a corrosão sob tensão das ligas de níquel. O zinco é adicionado no circuito primário como acetato de zinco $Zn(CH_3COO)_2 2H_2O$ pela sua alta solubilidade (430 g/l a 25°C) e sua alta pureza [3].

A injeção de zinco atinge os benefícios observados através do mecanismo a nível molecular. Como o zinco é incorporado nos filmes de óxido das superfícies molhadas de um PWR em operação, isso muda a morfologia e a composição dos filmes de óxido, mudando assim suas características de corrosão. Além disso, acredita-se que o zinco desloca o ferro, o níquel e o cobalto para locais da rede cristalina na camada de óxido interna nos materiais da superfície do sistema. Com o tempo de exposição, esse processo faz as camadas mais finas de óxido, mais estáveis e mais protetivas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Oxigênio

O ingresso do oxigênio no sistema refrigerante do reator ocorre via água de reposição. Em concentrações muito baixas de hidrogênio (< 5 cm^3/kg), as concentrações de oxigênio irão aumentar devido à radiólise da água. Dentro do intervalo dos níveis de oxigênio encontrados em PWRs, o efeito do oxigênio na corrosão do zircaloy é mínimo, e o maior interesse é a formação dos produtos de corrosão do sistema e transporte dessas espécies para o núcleo onde depositam nas superfícies do combustível [3].

Cloreto e Fluoreto

Os limites para o cloreto e fluoreto são baseados no risco de Corrosão Sob Tensão dos aços inoxidáveis a alta temperatura. Limites de cloreto e fluoreto têm sido estabelecidos muito tempo atrás e têm sidos modificados, não há nem dificuldade para mantê-los em qualquer tempo nem qualquer problema de corrosão associado com os valores limites. Com o circuito primário sobre pressão, há quase nenhuma possibilidade para contaminação, exceto sobre transientes ou através de resinas. O controle do fluoreto é feito com o objetivo de minimizar a corrosão dos materiais dos circuitos do refrigerante, e devido ao fato de que o zircaloy sobre corrosão acelerada quando a concentração de íons fluoreto está acima de 2 ppm [1].

Sulfato

Íons sulfato promovem ataque intergranular dos tubos de Inconel 600 nas condições de operação dos geradores de vapor. Este tipo de corrosão pode ocorrer tanto em meios ácidos como em básicos. Os íons sulfatos estão também ligados a ataque por pite de ligas 600 e irão agravar a corrosão de materiais ferrosos. Sob condições de transferência de calor estes íons irão manter-se mascarados e têm solubilidade limite na temperatura de operação. Assim é necessário mantê-los numa concentração baixa [5].

Sódio

É um eficiente indicador de muitas formas de entrada de contaminantes e deve ser usado como tal. Quando a concentração de sódio excede o nível de purga para ações de nível 2, aumenta a possibilidade de corrosão sob tensão de inconel 600. Tal fato é baseado em experiência operacional e teste de laboratório em concentrações mais altas.

Alumínio, Cálcio, Magnésio e Sílica

Essas impurezas podem ser observadas intermitentemente no refrigerante do reator como um resultado da água de reposição, água de reabastecimento ou contaminantes do ácido bórico. Nenhum desses elementos tem um efeito direto na corrosão do zircaloy. Contudo, muitos óxidos e silicatos do alumínio, cálcio e magnésio tem coeficiente de temperatura negativo de solubilidade, isto é, eles irão depositar preferencialmente nas varetas combustíveis. Tais depósitos podem

ISBN: 978-987-1676-63-7

tornar as camadas sobre o núcleo mais densas e possivelmente agravar a corrosão do zircaloy-4. Por esta razão, o monitoramento periódico de concentrações de espécies referenciadas na água de reposição deve ser realizado [3].

7.2 Outros Parâmetros

Sólidos em Suspensão

A taxa de desenvolvimento de depósitos no núcleo está relacionada com a concentração de sólidos em suspensão no refrigerante. Por este motivo, é prudente limitar a concentração dos mesmos. A presença de altas concentrações de sólidos em suspensão durante o estágio anterior de operação à potência pode resultar da formação incompleta de um filme óxido protetor sobre às superfícies do sistema. Isto pode ser minimizado aumentando-se a duração dos testes funcionais a quente, e por operação com altas concentrações de lítio, embora essas concentrações como outras espécies que elevam o pH, podem acelerar a taxa de corrosão do zircaloy. Operação com concentrações de hidrogênio baixas pode também conduzir a concentrações elevadas de sólidos em suspensão [5].

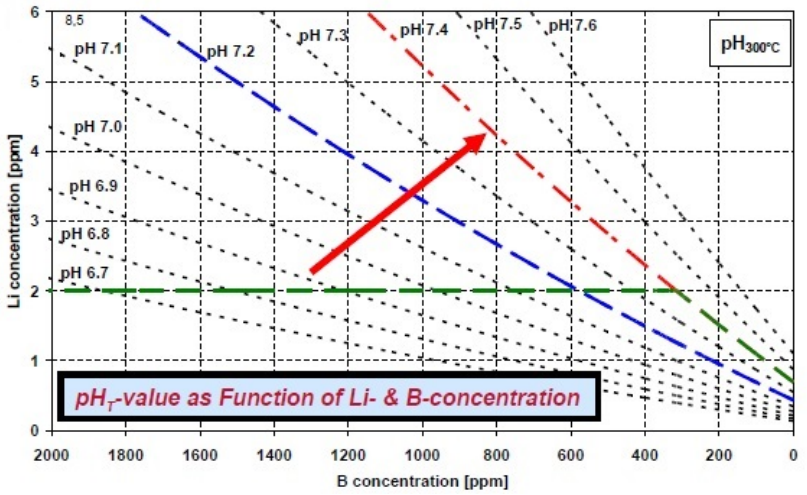
pH

Com a adição de ácido bórico na água do circuito primário do reator, cria-se um ambiente ácido no sistema, o que é inaceitável, visto que ocorre um aumento da corrosão geral dos materiais, como consequência alta ativação e transporte de produtos de corrosão no sistema. Logo, o hidróxido de lítio, um reagente alcalino, é adicionado na água em pequenas quantidades para alcançar um pH levemente alcalino a temperatura de operação, minimizando assim problemas com corrosão e transporte de produtos de corrosão ativados. A avaliação do efeito do pH na corrosão sob tensão pela água do circuito primário é complicada pela correlação entre o pH e a temperatura o que torna difícil comparar os estudos em diferentes temperaturas. Logo, além das concentrações de ácido bórico e hidróxido de lítio, a temperatura influencia fortemente no pH da água de refrigeração de reatores PWR A Figura 1 mostra a influência da concentração desses produtos no pH do refrigerante e na Fig. 2 têm-se a influência desses três parâmetros no valor do pH.

Dentro do intervalo de 6,9 a 7,4, o pH, por si só, não tem efeito sobre a corrosão do combustível. Contudo, o pH tem um maior efeito nos depósitos “crud” no combustível, que pode afetar a corrosão do revestimento. Também um pH maior é associado a altas concentrações de lítio (EPRI, 1999). Com o propósito de reduzir a concentração de ácido bórico e hidróxido de lítio no refrigerante e consequentemente reduzir o risco de deposição “crud”, algumas plantas nucleares do tipo PWR, fazem uso do ácido bórico enriquecido (EBA) com uma maior proporção de ^{10}B . Se apenas 40% do ^{10}B ao invés de 20% como em um boro natural ser usado, a concentração total de boro é reduzida pela metade e a concentração de 2,2 mg/kg de lítio torna-se satisfatória para um

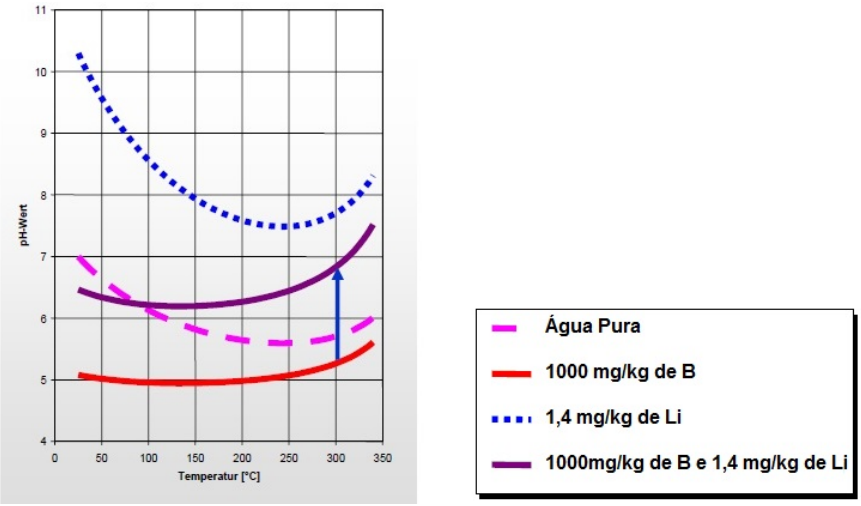
ISBN: 978-987-1676-63-7

controle de pH. Logo o uso de tal ácido bórico enriquecido é benéfico para obtenção de um pH_T ótimo a qualquer momento, com taxas de doses minimizadas de produtos de corrosão ativados.



Fonte: AREVA (2008) [8].

Figura 1: Valor do pH em função da concentração de Li e B



Fonte: Adaptado de AREVA (2008) [8]

Figura 2: Influência da temperatura no valor no pH

Condutividade específica

É um indicador que revela facilmente a concentração total de impurezas iônicas. O aumento do nível de muitas impurezas iônicas influencia adversamente o comportamento da corrosão sob tensão de materiais do Sistema de Refrigeração, na taxa de desenvolvimento de campos de radiação, e pode também afetar o desempenho do combustível. Por isso, o nível de condutividade na água do reator deverá ser mantido o mais baixo possível.

ISBN: 978-987-1676-63-7

8. CONCLUSÃO

Um estudo teórico dos parâmetros físico-químicos do refrigerante de reatores nucleares é importante para que haja entendimento de que um bom controle da química da água reduz problemas de corrosão em materiais estruturais e combustíveis. Como resultado deste controle, a segurança operacional é aumentada uma vez que a integridade das barreiras de segurança é preservada sob condições de operação normal e transiente, e os campos de radiação são minimizados. Além disso, um estudo experimental dos efeitos do ácido bórico neste controle químico também é de grande relevância, pois será possível estudar os vários aspectos de efeitos de reatividade no núcleo através da inserção de boro no sistema, não apenas do ponto de vista teórico, mas também prático. Além disto, a partir do método que será desenvolvido neste trabalho, outras medidas poderão ser realizadas contribuindo com resultados importantes para todo o campo nuclear.

REFERÊNCIAS

[1] IAEA. Optimization of Water Chemistry to Ensure Reliable Water Reactor Fuel Performance at High Burnup and in Ageing Plant (FUWAC). International Atomic Energy Agengy. Vienna. 2011

[2] LIMA, L. I. L. Influência da Concentração de Hidrogênio na Suscetibilidade à Corrosão Sob Tensão de Junta Soldada com Metais Dissimilares em Ambiente do Circuito Primário de Reator Nuclear. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

[3] EPRI. Pressurized Water Reactor Primary Water Chemistry Guidelines. Eletric Power Research Institute. Palo Alto. 2007. (Volume 2, Revision 6).

[4] LIN, C. C. Radiochemistry in Nuclear Power Reactors. Vallecitos Nuclear Center. Washington. 1996.

[5] OLIVEIRA, M. F. Relação da química da água com a segurança. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Rio de Janeiro. 1991.

[6] HAWKES, M. The Simulation and Study of Conditions Leading to Axial Offset Anomaly in Pressurized Water Reactors. Georgia Institute of Technology. Georgia. 2004.

[7] GOMES, D. S. Simulação com Programas Computacionais de Desempenho do Combustível em Regimes Permanente e Transiente de Varetas Combustíveis de Aço Inoxidável Austenítico. IPEN. São Paulo. 2014.

[8] AREVA. Primary Coolant Chemistry: Fundamental Aspects & Improvements/Optimizations. Areva. [S.l.]. 2008.

Agradecimentos

Os autores destacam o agradecimento as seguintes instituições brasileiras: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e Instituto Nacional para Reatores Nucleares Inovadores (INCTRNI).

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE SECUNDARIO EN LA COMBUSTIÓN EN UNA CALDERA TIPO VU50

Horacio S. Mendez, Marcos A. Golato, Manuel E. Budeguer y Guillermo M. Díaz Romero
[1] Departamento de Mecánica – Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán
Av. Independencia 1800, Tucumán, Argentina
mendez_horacio_06@hotmail.com
mgolato@herrera.unt.edu.ar
mdeguer@yahoo.com.ar
gmdromero@gmail.com

RESUMEN

Por combustión se genera el 90% de la energía térmica presente en la matriz energética mundial. Debido a su importancia, los esfuerzos se han orientado a plantear un modelo matemático que permita representar el fenómeno a fin de optimizar las variables de influencia y lograr el máximo aprovechamiento en la generación de energía térmica [1]. Los ingenios azucareros usan el bagazo como principal combustible en las calderas para generación de vapor, con el fin de mejorar la eficiencia de los equipos se realizaron diversos estudios sobre los fenómenos básicos que ocurren en ellos [2]. La calidad de la combustión es función de diversas variables, las cuáles definen el aprovechamiento energético del combustible en la generación de vapor, y el impacto ambiental generado por los productos (materiales particulados) emitidos a la atmósfera [3]. La idea de este trabajo es efectuar la simulación de la combustión en una cámara perteneciente a una caldera VU50, empleando el programa Fire Dynamics Simulators (FDS 6.3.0) y Smokeview (SMV 6.3.0), con el objeto de analizar la influencia de la temperatura del aire secundario en el proceso de combustión, como así también establecer la ubicación más adecuada de las boquillas de inyección de aire para definir los valores apropiados que favorezcan al proceso pero que no afecten al sistema. Como no es posible lograr un estudio basado en ensayos para la determinación de la composición de los gases, los campos de presiones y temperaturas en los distintos niveles de la cámara, a fin de validar el modelo, se considerará una comparativa de éstas variables, obtenidas mediante métodos experimentales en la salida de la cámara de combustión, con estudios teóricos aplicando balances de materia y energía, y los resultados arrojados por el software empleado para la simulación.

Palabras Claves: *Simulación de combustión, caldera, bagazo, aire secundario.*

1. INTRODUCCIÓN

El bagazo de la caña de azúcar es el principal combustible que se utiliza en las calderas de vapor de los ingenios azucareros, el mismo se obtiene del procesamiento de la caña, luego de la extracción de jugo en los trapiches. No obstante, para atender las variaciones de presión en las líneas de vapor de proceso, resulta necesario incorporar un combustible adicional, por lo general gas natural y/o fuel oil.

A lo largo de las últimas décadas, se buscó la manera de optimizar el proceso de combustión y elevar el rendimiento general de los generadores de vapor, tratando de disminuir al mínimo las pérdidas por calor sensible al ambiente, por medio de la colocación de precalentadores de aire y economizadores; y que consecuentemente reducen las pérdidas de calor latente debido a elementos incombustos presentes en los gases de escape y en las parrillas o grillas de las calderas.

Con el inconveniente del incremento en el precio de los combustibles, falta de disponibilidad de los mismos, restricciones de uso y necesidad de efectuar un mayor control en las emisiones de material particulado efluentes por chimeneas, resulta necesario la búsqueda de nuevas alternativas que mejoren el proceso de combustión.

Los ensayos en hornos a escala real no resultan adecuados para un análisis detallado del proceso de combustión, debido al inconveniente de no poder trabajar en un régimen que permita obtener mediciones repetibles con condiciones estables del combustible, el bagazo presenta contenidos variables de humedad y cenizas a lo largo de la zafra. Además, debido a la variación de la radiación de partículas (sobrecarga por radiación) y del tiro balanceado, que regula la presión del hogar de la caldera y que no se pueden controlar de manera independiente, se genera inestabilidad en el proceso de combustión. Todo esto se ve incrementado con la formación y colapso de montículos de combustible acumulados sobre la parrilla y por la formación de clinker [4].

La idea de introducir aire secundario es generar turbulencia en el interior del hogar y lograr la combustión completa de los volátiles desprendidos durante el proceso de desvolatilización del combustible. La cantidad de aire introducida representa aproximadamente entre el 5 al 15 [%] del aire total. El hecho de sobrepasar estos valores empíricos no representa ninguna ventaja puesto que si la combustión en el horno es favorable (baja formación de CO), podría producir un enfriamiento del hogar y consecuentemente pérdidas de calor sensible, lo que resultaría un agregado inútil y en algunos casos presentar influencias negativas [5].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Diversos estudios analizaron diferentes modelos numéricos de combustión en calderas de vapor, en las que se observaron, por ejemplo, los campos de temperaturas alcanzadas y la influencia de los ángulos de inyección del aire secundario en el hogar de la misma [2]; o bien al no existir un modelo numérico característico para la combustión de bagazo, se trabajaron con modelos computacionales para carbón pulverizado, adaptados a partículas fibrosas húmedas [6]. No obstante, estos estudios no resultan representativos para las condiciones operativas de los generadores de vapor y para las características del bagazo de nuestra región.

El objetivo del presente trabajo fue simular la combustión del bagazo en el interior del hogar de una caldera de vapor del tipo VU50, empleando un modelo computacional conveniente a través del software FDS 6.3.0, con el fin de analizar la influencia de la temperatura del aire secundario en el proceso de combustión. Además, se estableció la ubicación más adecuada de la inyección de aire secundario (overfire) en el hogar de la caldera; y se efectuó la validación del método mediante ensayos experimentales y por medio de estudios teóricos de balances de materia y energía.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelado

El software empleado en la simulación se basa en la dinámica de fluidos computacional (CFD) y se denomina “Fire Dynamics Simulator” (FDS), versión 6.3.0, el cuál fue concebido para reproducir el fenómeno del fuego dentro de recintos cerrados. Este software resuelve numéricamente ecuaciones de Navier- Stoke apropiadas para un bajo número de Mach (Ma<0.3), haciendo énfasis en el transporte de calor y humos derivados del fuego [7]. Además, este software incluye un programa de visualización independiente denominado “Smokeview”, que se utiliza para mostrar los resultados de la simulación FDS. El algoritmo principal del software tiene un esquema predictivo-corrector explicito de segundo orden de exactitud en el espacio y en el tiempo. La turbulencia se modela a través de LES (Large Eddy Simulation), que se encuentra predeterminado por defecto en el FDS [8]. Para poder correr la simulación se trabajó con un procesador Intel Core i5 de 2,5 GHz.

2.2 Modelado del horno

El horno a modelar pertenece a una caldera acuotubular de dos domos con circulación natural, marca Mellor Goodwin, modelo VU50, típica de las instaladas en la industria azucarera de Argentina, que emplea como combustible bagazo. Las condiciones nominales de operación de la misma fueron: 40 [tn/h] de producción de vapor (Gv), 18 [kg/cm^2] de presión de vapor (Pv) y una temperatura de vapor sobrecalentado (Tv) de 330 [°C]. La caldera disponía de parrilla volcable para la eliminación de las cenizas residuales e inyección de aire secundario, a través de 16

ISBN: 978-987-1676-63-7

boquillas inyectoras ubicadas en la pared posterior del horno, empleando un ventilador de tiro forzado (VTF).

En la Figura N°1 puede observarse la caldera considerada en este estudio. La cámara de combustión de la misma, tenía una altura de 11 [m], ancho de 5,5 [m] y una profundidad de 4,1 [m]. La superficie efectiva de calefacción era de 1940 [m^2] y disponía de un precalentador de aire (ICQ), con una superficie de intercambio de 850 [m^2]. La caldera evaluada no presentaba economizador de vapor.



Figura 1: Caldera de vapor VU50 propuesta para la simulación

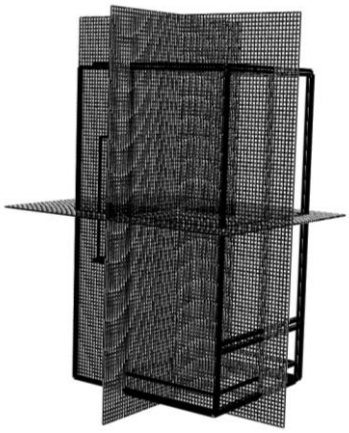


Figura 2: Mallado propuesto para la cámara de combustión

En la Figura 2 puede observarse la rejilla adoptada en el modelo computacional, la misma se construyó con 810000 celdas. Para el caso del aire secundario, se consideró su inyección en el dominio mediante superficies de 5,5 [m] x 0,11 [m], ubicadas una altura de 600 [mm] desde la parrilla. El objeto de esto, fue evitar la necesidad de tener que realizar un mallado más fino que incremente el costo computacional [8].

Para la simulación de la combustión del bagazo, se trabajó con un modelo relacionado con la química simple (infinitamente rápida), mediante especies agrupadas, incluido en el FDS. Para este caso se predefinieron los rendimientos de hollín y CO generados; y se analizaron las distribuciones de los campos de temperaturas para las distintas disposiciones de inyección de aire secundario considerando las condiciones nominales de la caldera.

A partir de la metodología planteada en [9] y [10], se construyó una hoja de cálculo para la determinación del rendimiento del horno; y las temperaturas teórica de llama y de los gases de combustión a salida del mismo. En la Figura 3 se observa el esquema básico considerado para el cálculo de los balances de masa y energía.

ISBN: 978-987-1676-63-7

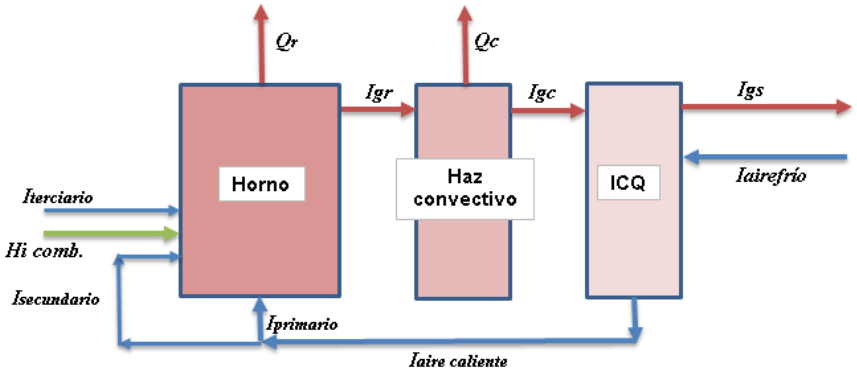


Figura 3: Esquema básico empleado en el balance térmico. Donde: Qr = calor útil en el horno, Qc = calor útil en el haz conventivo, $I_{terciario}$ = entalpía del aire terciario, $I_{secundario}$ = entalpía del aire secundario, $I_{primario}$ = entalpía del aire primario, $I_{aire\ caliente}$ = entalpía del aire caliente total, $I_{aire\ frío}$ = entalpia del aire frío, Igr = entalpía de los gases a la salida del horno, Igc = entalpía de los gases en la entrada del ICQ e Igs = entalpía de los gases a la salida de la caldera.

A partir de los datos de placa de la caldera y con el uso de ábacos [10], se determinó la carga térmica requerida por el horno para la condición nominal de trabajo. Asimismo, para la resolución de los balances de masa y energía, se realizaron 7 (siete) ensayos en el generador de vapor, midiendo las variables características de operación indicadas en Tabla 1.

Variables medidas	
Gv [tn/h]	Producción de vapor
Pv [kg/cm^2]	*Presión de vapor*
Tv [°C]	*Temperatura de vapor*
Tag. [°C]	*Temperatura del agua de alimentación*
λ	*Factor de dilución*
CO2 [%]	*Concentración de dióxido de carbono*
02 [%]	*Concentración de oxígeno*
CO [%]	*Concentración de monóxido de carbono*
Tgc [°C]	*Temperatura de gases calientes en la entrada del ICQ.*
Taire 1º [°C]	*Temperatura del aire primario de combustión.*
T aire 2º [°C]	*Temperatura del aire secundario*
Humedad [%]	*Contenido de humedad del bagazo*
Cenizas [%]	*Contenido de ceniza del bagazo*
Hi comb. [Kcal/kg]	*Poder calorífico inferior del combustible*

Tabla 1. Variables medidas durante los ensayos realizados

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los resultados obtenidos del balance de masa y energía, se incorporaron al modelo de la cámara de combustión desarrollado con FDS y se analizaron los campos de temperaturas con Smokeview.

Para el análisis de la influencia de la temperatura del aire secundario sobre el rendimiento térmico del generador, se consideraron los datos de diseño del hogar, los valores promedio de las variables medidas durante los ensayos realizados y se determinó, mediante la hoja de cálculo propuesta, los valores de temperatura teórica de llama y la de los gases de combustión a la salida del hogar. Además, se consideró que la temperatura del aire secundario varió desde la temperatura ambiente hasta la máxima alcanzada por el aire primario antes de ingresar al horno. Asimismo, se adoptó como invariable a la temperatura de los gases a la entrada del precalentador de aire (ICQ).

Con respecto a la ubicación de las boquillas inyectoras de aire secundario, se tuvieron en cuenta dos casos: el primero consideró una inyección frontal; y en el segundo, una inyección empleando toberas tangenciales ubicadas en la parte posterior y frontal del hogar de la caldera de vapor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las variables medidas durante los ensayos realizados en la caldera de vapor, se encuentran indicados en Tabla 2. Cabe destacar que durante la ejecución de los ensayos no se alcanzaron las condiciones nominales de trabajo del generador de vapor.

Datos	***Nominal***	***Nº 1***	***Nº 2***	***Nº 3***	***Nº4***	***Nº 5***	***Nº6***	***Nº7***
Gv [tn/h]	40	31,0	34,4	30,9	32,4	30,7	26,0	29,7
Tv [°C]	330	346,2	314,0	340,1	313,0	325,6	349,0	329,2
Pv [kg/cm2]	18	15,1	14,9	15,5	14,5	16,5	15,4	15,5
tag. [°C]	120	97,6	116,0	103,3	115,0	120,2	120,0	118,4
λ	1,3	2,8	1,7	2,5	1,9	1,5	2,3	1,9
CO2 [%]	15	6,4	11,3	8,0	9,9	12,9	7,6	10,1
02 [%]	6	13,9	8,7	12,2	10,2	7,0	12,2	9,8
CO [%]	0	0,05	0,02	0,06	0,03	0,11	0,04	0,06
tgc [°C]	350	215,8	279,3	229,4	272,4	270,1	298,6	280,4
Taire 1º [°C]	225	103,5	105,2	102,5	104,7	97,7	108,3	103,6
T aire 2º[°C]	-	32,5	29,2	20,1	28,1	15,8	33,5	25,8
Humedad [%]	50,0%	53,84%	54,00%	56,50%	55,10%	57,50%	55,00%	55,87%
Cenizas [%]	6,0	5,4	5,0	4,9	6,1	4,7	5,4	5,4
Hi comb. [Kcal/kg]	1825	1550,4	1549,5	1435,8	1481,4	1383,3	1497,0	1455,8

Tabla 2. Resultados de las variables medidas durante los ensayos

ISBN: 978-987-1676-63-7

La Tabla 3 muestra los resultados de los rendimientos térmicos obtenidos por cálculo de balance de masa y energía, para las diferentes partes de la caldera de vapor ensayada. Se observa que para las condiciones de trabajo promedio del generador de vapor, se alcanzó un rendimiento en la caldera de 59,69%, un rendimiento en el haz convectivo de 85,47% y un rendimiento del horno de 93,12%. Además, se determinó que la temperatura adiabática de la combustión según [11], fue de 818,14ºC y la temperatura de los gases a la salida del horno fue de 567,35ºC.

Rendimiento caldera:	59,69%	[%]			
Tgc:	263,71	[°C]			
Qr total:	9564317	[kcal/h]			
Qs total:	2449561	[kcal/h]			
Qc total:	7312621	[kcal/h]			
Bagazo:	21845,08	[kg/h]			
Hi:	1480,72	[kcal/kg comb.]			
Aire primario:					
Ta:	0	[°C]			
Tc:	103,64	[°C]			
	4,68	[kg aire 1°/kg comb.]			
	6,20	[kg gases/kg comb.]			
Aire secundario:					
Ta:	0	[°C]			
Tc:	26,4	[°C]			
	0,52	[kg aire 2°/kg comb.]			
Fción objetivo:					
1° 0,00%	Tgh:	818,14	[°C]	818,14	Temperatura teórica adiabatica de combustión [°C]
3° 0,00%	Tgr:	567,35	[°C]	567,35	Temperatura de salida del horno [°C]
2° 0,00%		93,12%		93,12%	Rendimiento del horno [%]
				85,47%	Rendimiento del haz convectivo [%]
	Igh:	1618,93	[kcal/kg comb.]	75,00%	Rendimiento del ICQ [%]
	Igr:	1069,74	[kcal/kg comb.]	59,69%	Rendimiento de la caldera [%]

Determinación de los rendimientos de las distintas partes de la caldera

Tabla 3. Rendimientos térmicos obtenidos para la caldera VU-50 mediante hoja de cálculo propuesta

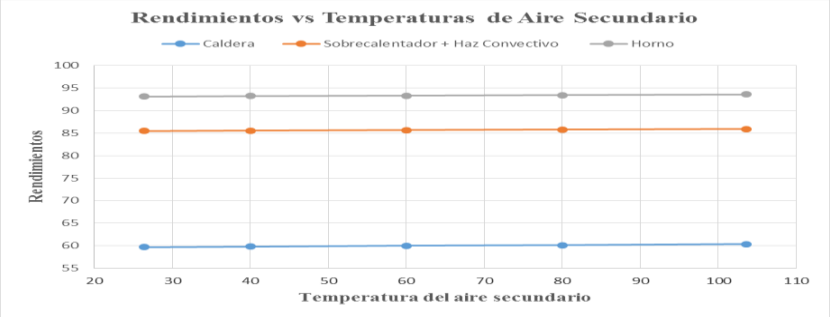


Figura 4: Variación del rendimiento de las partes componentes de la caldera en función de la temperatura del aire secundario

La Figura 4 muestra el aumento del rendimiento de la caldera con el aumento de la temperatura del aire secundario desde 26,4 [ºC] hasta los 103,6 [ºC], cumpliendose lo indicado por [12] respecto a la influencia del calentamiento del aire secundario sobre el rendimiento de la caldera. Para las condiciones de ensayo de nuestro caso, el incremento en el rendimiento de la caldera fue de 1,03 [%] y para el horno el aumento fue de 0,53 [%], mientras que para el caso del conjunto

sobrecalentador-haz convectivo el incremento fue de 0,51 [%]. A primera vista estos incrementos en el rendimientos debido al calentamiento del aire secundario resultarían bajos, no obstante representaron un ahorro de bagazo de 224 [kg/h].

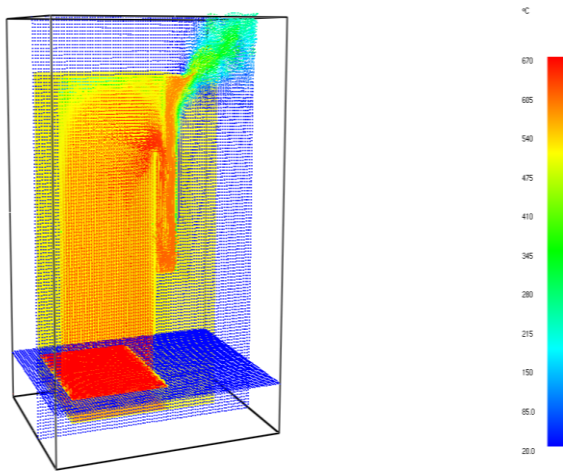


Figura 5: Modelado de la combustión del bagazo en la caldera VU50 ensayada

La Figura 5 muestra el resultado de la simulación de la combustión del bagazo en la caldera de vapor VU50 realizado con FDS. En la misma se observó que el valor promedio de temperatura a la salida de la cámara fue de 540 [°C] (despreciando las zonas de estratificación de los gases), mientras que dicha temperatura, obtenida de los balances de masa y energía, fue de 567,35 [°C]. Esto reflejó un error de 4,82 [%], resultando un valor aceptable para este parámetro.

Con respecto a las velocidades de los gases en la cámara de combustión, se observaron valores superiores a 180 [m/s], los que resultan elevados para este tipo de proceso. Según [11] se aceptan velocidades entre 5-6 [m/s] para el caso de quema de bagazo en parrilla.

Al analizar la influencia de la ubicación de las boquillas del aire secundario se consideraron los datos nominales de la caldera, determinando mediante la hoja de cálculo (indicada en tabla 3) los valores de la temperatura teórica de llama (1195 [°C]) y la temperatura de salida de la cámara de combustión (862 [°C]).

En la Figura 6 se representa la simulación de la combustión del bagazo en el interior del hogar de la caldera, por medio de la inyección frontal de aire secundario frío. Puede observarse una concentración excesiva de calor en la parte posterior del horno y un enfriamiento significativo en la parte frontal, esto coincide con el modelo propuesto y analizado por [6].

ISBN: 978-987-1676-63-7

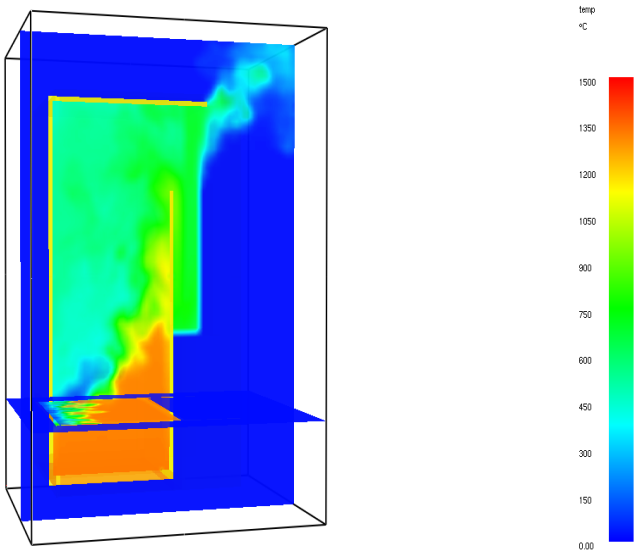


Figura 6: Inyección de aire secundario a través de boquillas ubicadas en el frente del hogar

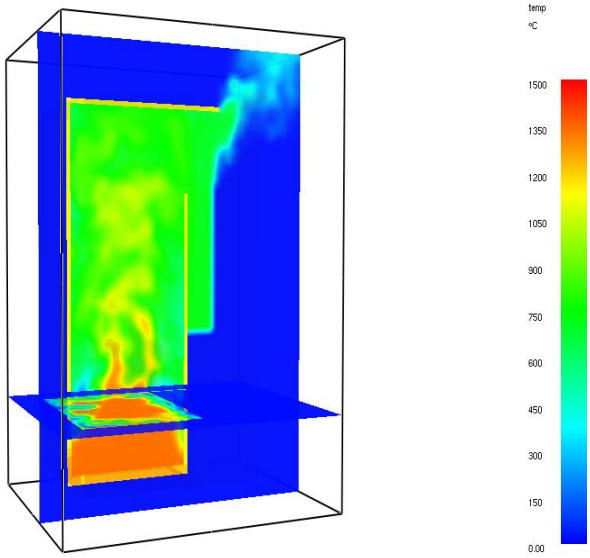


Figura 7: Inyección de aire secundario a través de boquillas tangenciales ubicadas en el frente y en la zona posterior del hogar.

En la Figura 7, se observa la simulación correspondiente a la inyección de aire secundario a través de toberas tangenciales ubicadas en la zona frontal y posterior del hogar. En este caso se obtuvo una distribución más homogénea de la temperatura en el volumen del horno, que se debería al

ISBN: 978-987-1676-63-7

incremento de la turbulencia por la disposición de las toberas y que provocaría una mayor mezcla del combustible con su comburente. Este resultado coincide con lo indicado por [12].

En este último caso, la temperatura adiabática del horno (máxima teórica), se presentó en la zona de parrilla, alcanzando los 1250 [°C]; mientras que en la salida del hogar la temperatura de los gases fue de aproximadamente 900 [°C]. El error observado entre las temperaturas calculadas mediante balances de masa y energía, respecto a las obtenidas por simulación fue de 4,4 [%] para la temperatura adiabática; y 4,2 [%] para la temperatura de los gases a la salida del hogar.

4. CONCLUSIONES

A partir de ensayos realizados en la caldera de vapor VU50, se determinó mediante balances de masa y energía, un rendimiento térmico promedio del generador de 59,69%; un rendimiento en el haz convectivo de 85,47% y un rendimiento del horno de 93,12%. Además, se determinó una temperatura adiabática de combustión de 818,14ºC y una temperatura de los gases a la salida del horno de 567,35ºC. Con respecto a la influencia de la temperatura del aire secundario, se observó un incremento en el rendimiento de la caldera de 1,03 [%] y un ahorro de bagazo de 224 [kg/h] para un aumento de la temperatura de 77,2 [°C] (de 26,4 [ºC] a 103,6 [ºC]).

A partir de un modelo propuesto en CFD se logró simular la combustión de bagazo con FDS, donde se obtuvo un error de 4,82[%] en la temperatura de los gases de salida del horno respecto a la determinada por cálculos de balances de masa y energía para las condiciones promedio del ensayo.

La mejor distribución de temperaturas en el interior del horno, se logró con una inyección tangencial del aire secundario a través de boquillas ubicadas en la zona frontal y posterior del mismo. Para este caso, se determinó una temperatura adiabática de 1250 [°C] y una temperatura de los gases a la salida del hogar de aproximadamente 900 [°C]. Los errores observados entre las temperaturas calculadas mediante balances de masa y energía, respecto a las obtenidas por simulación fueron de 4,4 [%] para la temperatura adiabática; y 4,2 [%] para la temperatura de los gases a la salida del hogar. Estos valores resultaron aceptables, por lo que el modelo propuesto satisface las hipótesis planteadas. No obstante, el modelo arrojó valores elevados de las velocidades ascensionales de los gases en la cámara de combustión.

5. REFERENCIAS

[1] Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation.* Springer. Berlín, 1996.

[2] Mut Benítez R., Beatón Soler P., Marín Antuña J., Sánchez Oliver E., Alvarez Amargós P. *Simulación numérica del campo de temperaturas de una caldera para el quemado de biomasa*. Revista Cubana de Física, Vol.16, Nº2, pp. 69-73, 1999.

[3] Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles Jr T.R., Miles T.R. *Combustion properties of biomass*. Fuel Processing Technology, pp 17-46, 1998.

[4] Lamp B.W. *Investigation into the fundamentals of bagasse combustion in step-grate furnaces*. Factory Engineering, pp. 1951-1962, 1980.

[5] Hugot E. *Manual para ingenieros azucareros*.1° Edición. CECSA. México.1964.

[6] Mingchun Luo, Stanmore B.R., Dixon T.F. *A thermal survey of a bagasse-fired boiler.* Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists, pp. 108-118, 1993.

[7] McGrattan K., Hostikka S., McDemott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.. *Fire dinamics simulators. User´s guide*. NIST especial publication 1019. 6° Edición.2015

[8] Capote J.A., Alvear D., Abreu O.V., Lázaro M. y Espina P. *Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios.* Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño de ingeniería, Vol. Nº24, pp 327-245, 2008.

[9] Golato M.A., Franck Colombres F.J., Aso G., Correa C.A. y Paz D. *Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor*. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, Tomo N°85, N°2, pp.17-31,2008.

[10] Torreguitar R.F., Weiss A.G. *Combustión y generación de vapor*. 2º Edición. Editorial Prisma Pub. S.R.L. Buenos Aires.1975.

[11] Alderetes C.O. *Calderas a bagazo. Proyecto, operación y mantenimiento*. 1° Edición. Argentina.2016.

[12] Golato M.A., Aso G., Paz D., Cardenas G.J. *Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor bagaceras y su influencia en el rendimiento térmico*. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, Tomo N°82, N°2, pp.17-25,2005.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A ELEVADAS TEMPERATURAS DE DEPÓSITOS DE SOLDADURA 9Cr CON DIFERENTES NIVELES DE BORO

Ariel Burgos[1], Hernán Svoboda[2], Estela Surian[3]

[1]Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería, Camino de Cintura y Juan XXIII, Lomas de Zamora (1832), Buenos Aires, Argentina. arielburgo@gmail.com
[2]GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214 CABA (1427), Argentina. CONICET, Av. Rivadavia 1917, C.A.B.A, Argentina.
[3]Consultor independiente. Blanco Encalada 4580, 12A, C.A.B.A. (1431), Argentina.

RESUMEN

La industria de generación termoeléctrica persigue incrementar el rendimiento de sus equipos desarrollando nuevas aleaciones para sus componentes y uniones soldadas. Para aumentar la resistencia al creep, se ha modificado el contenido de algunos microaleantes. En este sentido la optimización de los niveles de boro en aleaciones 9Cr busca estabilizar la martensita formando precipitados que mejoren la vida a creep [1]. Las propiedades mecánicas de estos aceros y sus soldaduras son alcanzadas luego de aplicar un tratamiento térmico de post soldadura. El ensayo de tracción en caliente puede ser considerado como una alternativa al ensayo de creep aprovechando la ventaja de obtener resultados en cortos períodos. Muchos estudios han propuesto equivalencias entre los datos de tracción en caliente y de rotura al creep en base a las relaciones de Norton y de Monkman-Grant, extrapolando sus resultados a tiempos más prologados por métodos paramétricos como el de Larson-Miller [2-3]. En concepto, esta relación sostiene que el comportamiento durante la deformación plástica es similar en ambos ensayos siempre que la microestructura no sufra cambios significativos durante los períodos considerados. En este trabajo se evaluaron las propiedades mecánicas a elevadas temperaturas de depósitos de metal de soldadura utilizado para soldar aceros de aleación 9Cr a través de una matriz de ensayos de tracción en caliente. Se soldaron cupones de metal de aporte puro según norma ANSI/AWS A5.29/A5.29M:2010 [4] empleando alambres flux-cored experimentales mediante el proceso de soldadura semiautomático bajo protección de Ar-20%CO_2, obteniéndose depósitos con niveles de 20 y 60 ppm de boro en su composición química. Muestras de ambas composiciones fueron tratadas térmicamente a 760°C durante 2 horas. De ellas se mecanizaron probetas planas para ensayos de tracción en caliente realizados a velocidades de desplazamiento de 5; 1; 0,1 y 0,02 mm/min y a temperaturas de 625 y 650°C. Se analizaron los resultados mediante las relaciones de Norton y de Monkmant-Grant y se convirtieron datos de tracción en caliente a vida a creep utilizando la parametrización de Larson-Miller. Se encontró que el mayor contenido de boro mejoró las propiedades del metal de soldadura a elevadas temperaturas dado que para una misma tensión y temperatura de trabajo durante los períodos considerados en el ensayo de tracción en caliente se requirieron de tiempos más prolongados para alcanzar la rotura de acuerdo a la parametrización empleada.

Palabras Claves: *acero 9Cr, FCAW, contenido de B, tracción en caliente, Larson-Miller.*

1. INTRODUCCIÓN

El desafío de las nuevas plantas de generación termoeléctrica es elevar las temperaturas y las presiones del vapor dentro de su ciclo termodinámico para poder incrementar el rendimiento de las máquinas utilizadas, reduciendo por consiguiente el costo asociado al combustible y las emisiones de CO_2 al medioambiente. Para un rango de funcionamiento a temperaturas de entre los 625-650ºC y presiones que rondan los 30-35 MPa o más, se requiere la utilización de aceros de mayor resistencia al creep. Variaciones en la composición química de los aceros 9Cr lograron mejorar su resistencia al creep mediante el agregado de W a expensas de una reducción en el contenido de Mo y pequeñas adiciones de B [5], disminuyendo con esto la tasa de pérdida de propiedades y prolongando la vida útil de los equipos.

Dado que se trata de construcciones soldadas, la soldabilidad de estos materiales es relevante y el desarrollo de metal de aporte para la unión soldada persigue los mismos desafíos que el metal base, no solamente en lo referente a su composición química sino también a su tratamiento térmico post soldadura (PWHT) ya que las propiedades requeridas se obtienen luego de su aplicación.

La necesidad de obtener las propiedades de resistencia al creep en tiempos cortos, ha generado la búsqueda de alternativas a este ensayo, siendo el de tracción en caliente (HTT) una buena opción. Basados en la premisa de que las deformaciones plásticas características son similares en ambos ensayos (HTT y Creep a la rotura), existen trabajos que correlacionan los resultados de ambos siendo éstos una aproximación satisfactoria con cierto grado de precisión [2-3, 6-8].

Actualmente, son pocos los consumibles de soldadura que ajustan la composición química del metal depositado, a la de los nuevos aceros de aleación 9Cr; la gran mayoría se encuentran en plena etapa de desarrollo. En la literatura no se reportan trabajos sistemáticos que analicen el efecto del contenido de B en el metal de soladura. En este trabajo se estudió el efecto del contenido de B sobre las propiedades mecánicas a elevadas temperaturas de depósitos de metal de aporte puro 9Cr obtenidos mediante FCAW-G utilizando una matriz de ensayos de tracción en caliente como metodología de evaluación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Soldaduras

Se soldaron dos cupones de metal de aporte puro sin dilución con el metal base (MAP) empleando dos alambres tubulares que depositan aceros 9Cr con contenidos de 20 y 60 ppm de B en su composición química, según norma ANSI/AWS A5.29/A5.29M:2010 [4]. Se depositaron cinco

ISBN: 978-987-1676-63-7

capas con una secuencia de 2, 2, 2, 2 y 3 cordones en cada capa, respectivamente. Para su confección se utilizaron chapas de acero al carbono biseladas de 19 mm de espesor, 475 mm de largo y 150 mm de ancho. Como respaldo se utilizó una planchuela de acero al carbono de 6x38x475 mm (ver Figura 1).

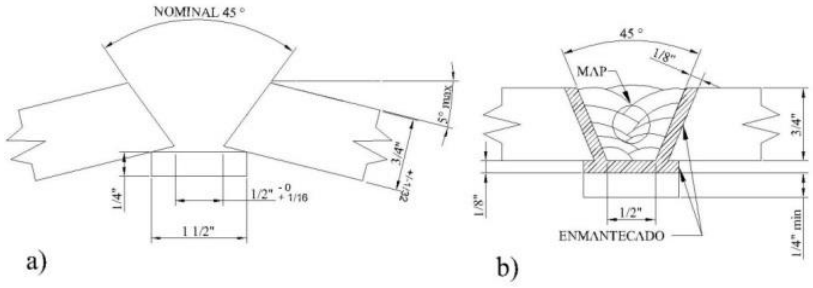


Figura 1. Plano del cupón de MAP según ANSI/AWS A5.29/A5.29M:2010: a) Ensamble previo a la carga del metal de soldadura – b) Junta soldada terminada.

Se soldó en la posición 1G (bajo mano), con protección gaseosa de Ar-20%CO_2, con un caudal de 20 l/min y una longitud libre de alambre de 12 a 15 mm, con corriente continua polo positivo al electrodo (DCEP). En la tabla 1 se muestran los parámetros de soldadura empleados.

Tabla 1. Parámetros de soldadura empleados.

Id	N° Capas	N° Pasadas	Temp. precalentamiento entrepasadas	Int.	DDP	Long.	Vel. de avance	Calor Aportado	
			[ºC]	[A]	[V]	[mm]	[mm/s]	[kJ/mm]	Desv. STD
20	5	11	250	218	31,0	475	5,6	1,2	0,10
60	5	11	250	200	31,5	475	5,7	1,0	0,10

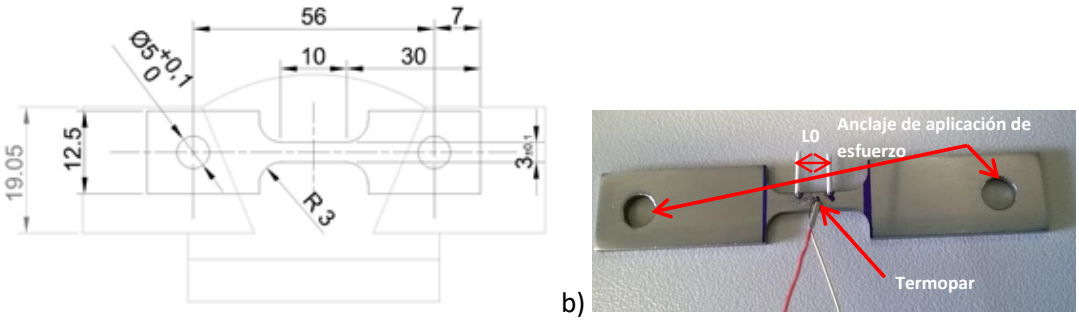
Las probetas de MAP fueron radiografiadas para evaluar la calidad de los depósitos. Se determinó la composición química de los depósitos por espectrometría de emisión óptica por plasma (OES) con un equipo Spectromaxx®.

Se aplicó a las soldaduras un tratamiento térmico de aplicación convencional a aceros del tipo ASTM A-213-T92 y A-335-P92 [9-10], consistente en un revenido simple a una temperatura 20°C por debajo de AC1 (760°C durante 2 horas).

2.3. Tracción en caliente (HTT)

A fin de evaluar el comportamiento mecánico del material a alta temperatura se realizaron ensayos de HTT y se parametrizaron sus resultados de corta duración a valores de rotura a creep (CRT). Se mecanizaron probetas en la dirección transversal al cordón de soldadura según la norma ASTM E

8M-01 [11] escalando su geometría de acuerdo con requerimientos específicos del equipo utilizado. Ver localización de las probetas y plano de dimensionamiento en la Figura 2a. Dichas probetas se ensayaron a 600 y 625 ºC y a velocidades de deformación inicial de 1.39E-02, 2.78E-03, 2.78E-04, 5.56E-05 1/s. Los ensayos se llevaron a cabo en un equipo Gleeble® 3800. La medición de la temperatura se llevó a cabo a través de termocuplas soldadas en la zona calibrada de la probeta y la deformación se registró en base al desplazamiento de marcas en la longitud calibrada (extensómetro laser) o por la dilatación de la zona de mayor deformación (dilatómetro laser); ver Figura 2a.



a) b)

Figura 2. a) Plano de dimensiones y esquema de la posición de extracción de la probeta plana para ensayos de tracción en caliente. b) Probeta de ensayo HTT instrumentada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Soldaduras

En la Figura 5 se puede observar una macrografía de un corte transversal de una de las probetas soldadas. Se registró un bajo nivel de defectos macroscópicos (poros, inclusiones de escoria, fisuras, etc.) lo que se corroboró en la radiografía del cordón completo.



Figura 5. Macrografía del depósito multipasadas.

3.2. Composición química

En la Tabla 2 se muestran los resultados del análisis químico obtenido sobre la superficie de la última capa depositada (capa N° 5). La composición química registrada posee la base de un metal de soldadura tipo T/P92 comercial con modificaciones controladas en el contenido de boro. Las diferencias se encuentran en el Ti, que ingresa a la composición como residual producto del rutilo (óxido de titanio) utilizado para la formación de escoria de protección de la pileta líquida durante el proceso de soldadura FCAW y el Co que es agregado para mejorar las propiedades de impacto a temperatura ambiente. En cuanto a los requisitos máximos del contenido de Mn+Ni están estrechamente relacionados con la aplicación de tratamientos térmicos pos soldadura (PWHT) sub-críticos (por debajo de A_{C1}) que prevengan la formación de martensita fresca.

Tabla 3. Composición química del metal depositado (% en peso).

Id.	Fe	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Co
20	85,6	0,12	0,9	0,36	0,007	0,017	9,33	0,49	0,51	0,86
60	85,4	0,12	0,9	0,36	0,007	0,016	9,24	0,46	0,53	0,85

Id.	Nb	Cu	W	V	N	B	Al	Ti	Mn+Ni
20	0,05	0,08	1,89	0,21	0,052	0,002	0,001	0,03	1,39
60	0,05	0,08	1,83	0,21	0,059	0,006	0,001	0,03	1,36

3.3. Propiedades mecánicas

Con el objetivo de obtener una aproximación a parámetros de creep que caractericen el comportamiento de este material en servicio, se utilizó la teoría de correlación de HTT-Creep existente en la bibliografía [2-3, 6-8]. En ella se destaca que al igual que ocurre en la etapa secundaria de creep donde se registra una compensación de fenómenos de endurecimiento y recuperación que provocan una velocidad de deformación constante, en un ensayo de HTT fenómenos similares se verifican cuando se alcanza la tensión máxima en el material. En este punto la tensión, la velocidad de deformación y la temperatura son constantes (antes de comenzar la estricción).

Las hipótesis sobre las que se basa este planteo son las siguientes:

a) La velocidad de deformación impuesta en el ensayo de HTT se correlaciona con la velocidad mínima de creep alcanzada en un ensayo convencional de creep (CRT) a la misma temperatura y tensión aplicada. b) La tensión máxima alcanzada en el ensayo de HTT se correlaciona con la tensión aplicada en un ensayo de CRT a la misma temperatura. c) El tiempo en que se alcanza la tensión máxima en HTT se correlaciona con el tiempo necesario para provocar la rotura de la muestra en un ensayo de CRT a igual tensión y temperatura.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A partir de estos conceptos se convirtieron los resultados de HHT en datos de fluencia lenta a alta temperatura validándolos con distintas relaciones como las de Monkman-Grant (Ecuación (1)) y Norton (Ecuación (2)).

$$\varepsilon_s \bullet (t_r)^m = C_{MG} \qquad (1)$$

$$\varepsilon_s = k \bullet \sigma^n \qquad (2)$$

donde ε_s es la velocidad de creep en el secundario [1/h], t_r es el tiempo de rotura [h], C_{MG} la constante de Monkman-Grant y m un exponente que determina la factibilidad de extrapolar resultados mediante esta relación. k es una constante, σ es la tensión de ensayo [MPa] y n es el exponente de la tensión (este exponente permite identificar los posibles mecanismos de creep involucrados) [12]. Posteriormente, se aplicó una parametrización de Larson–Miller para llevar a escenarios de creep los resultados de HTT validados empleando la Ecuación (3).

$$P_{LM} = T \bullet (C + \log t) \bullet 10^{-3} \qquad (3)$$

donde P_{LM} es el parámetro de Larson-Miller, T es la temperatura [K], t es el tiempo [h] y C es una constante característica del material que se obtiene a partir de curvas de isotensión en ensayos de creep [13].

La Tabla 4 muestra los resultados de los ensayos de HTT y el tratamiento de los datos para la parametrización.

Tabla 4. Propiedades mecánicas a temperaturas elevadas de ambas composiciones químicas (HTT y parametrización)

ID	Temperatura	Velocidad de desplazamiento	Velocidad de deformación inicial	Tiempo de ruptura (Rm_{max})	Tensión max.	Parámetro de Larson-Miller C=30
			ξ	t	Rm	
	[°C]	[mm/min]	[1/s]	[s]	[Mpa]	
20-5-625	625	5	1,39E-02	2,6	428	24,1
20-1-625	625	1	2,78E-03	12,6	398	24,7
20-0,1-625	625	0,1	2,78E-04	90,6	331	25,5
20-0,02-625	625	0,02	5,56E-05	540,4	292	26,2
20-5-650	650	5	1,39E-02	2,7	377	24,8
20-5-650	650	5	1,39E-02	3,6	379	24,9
20-1-650	650	1	2,78E-03	12,2	346	25,4
20-0,1-650	650	0,1	2,78E-04	85,5	268	26,2
20-0,02-650	650	0,02	5,56E-05	492,2	244	26,9
60-5-625	625	5	1,39E-02	3,2	419	24,2
60-1-625	625	1	2,78E-03	11,0	389	24,7
60-0,1-625	625	0,1	2,78E-04	109,7	354	25,6
60-0,02-625	625	0,02	5,56E-05	643,5	309	26,3
60-0,02-625	625	0,02	5,56E-05	576,3	304	26,2
60-5-650	650	5	1,39E-02	2,9	386	24,8
60-1-650	650	1	2,78E-03	10,4	347	25,3
60-0,1-650	650	0,1	2,78E-04	107,0	286	26,3
60-0,1-650	650	0,1	2,78E-04	127,4	285	26,4
60-0,02-650	650	0,02	5,56E-05	595,5	251	27,0

ISBN: 978-987-1676-63-7

La Figura 6 presenta valores de velocidad de creep en el secundario en función de los tiempos de ruptura en escala logarítmica (ambos valores obtenidos de los datos de HTT convertidos a partir de la teoría de correlación de HTT-Creep). A su vez, esos valores fueron ajustados, obteniendo la relación de Monkman-Grant (Ecuación 1). La validez de esta relación para este material pudo ser comprobada dado el buen ajuste que presentaron los datos obtenidos. Esta relación es válida cuando el deslizamiento de bordes de grano no tiene una contribución significativa en la deformación total siendo la velocidad de deformación controlada por la deformación de la matriz [8]. El parámetro de Monkman–Grant ($\mathbf{C_{MG}}$) para el caso, depende de los precipitados presentes en los contornos de grano que controlan la variación de la ductilidad mencionada [14-15]. El valor del exponente **m** del tiempo de rotura estuvo cercano a **1**, marcando la posibilidad de simplificación del análisis de los resultados y permitiendo extrapolar los datos a partir de esta expresión. El efecto del B sobre los tiempos de ruptura a igual velocidad de deformación es poco significativo y solo comienzan a observase pequeñas diferencias a velocidades de deformación muy bajas. Mismos valores de $\mathbf{C_{MG}}$ fueron hallados para ensayos de CRT sobre metal base 9Cr (ASME grado 92) [16].

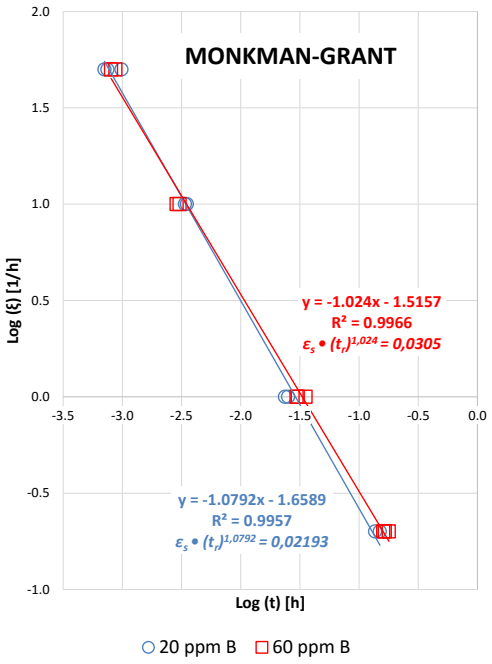


Figura 6. Relación de Mokman-Grant para los dos contenidos de boro analizados.

En la Figura 7 se representa la velocidad de creep en el secundario en función de la tensión de ensayo a escala logarítmica (ambos valores obtenidos a partir de los datos experimentales convertidos empleando la teoría de correlación de HTT-Creep). Del ajuste de los puntos se obtiene la relación de Norton (Ecuación 2).

ISBN: 978-987-1676-63-7

Los datos de interés se focalizan en la etapa de creep secundario; la representación de los parámetros a partir de la relación de Norton permite determinar qué mecanismos pudieron presentarse a lo largo de la deformación. Sobre esta base, cuando se usan leyes potenciales para describir el comportamiento a creep es razonable esperar que los valores obtenidos para el exponente **n** de la tensión estén cercanos a los observados en materiales con matriz monofásica (n~5); mecanismos de deslizamiento de dislocaciones controlado por trepado [12]. En cambio cuando el creep se rige por otros procesos (interacción dislocaciones-precipitados, formación de redes de dislocaciones, subestructuras de dislocaciones) se encuentran patrones de comportamiento muy complejos como los observados en aleaciones endurecidas por partículas (dispersión fina de carburos). La literatura describe que se puede producir una transición en el valor de **n** hacia valores mayores cuando la tensión aumenta [16].

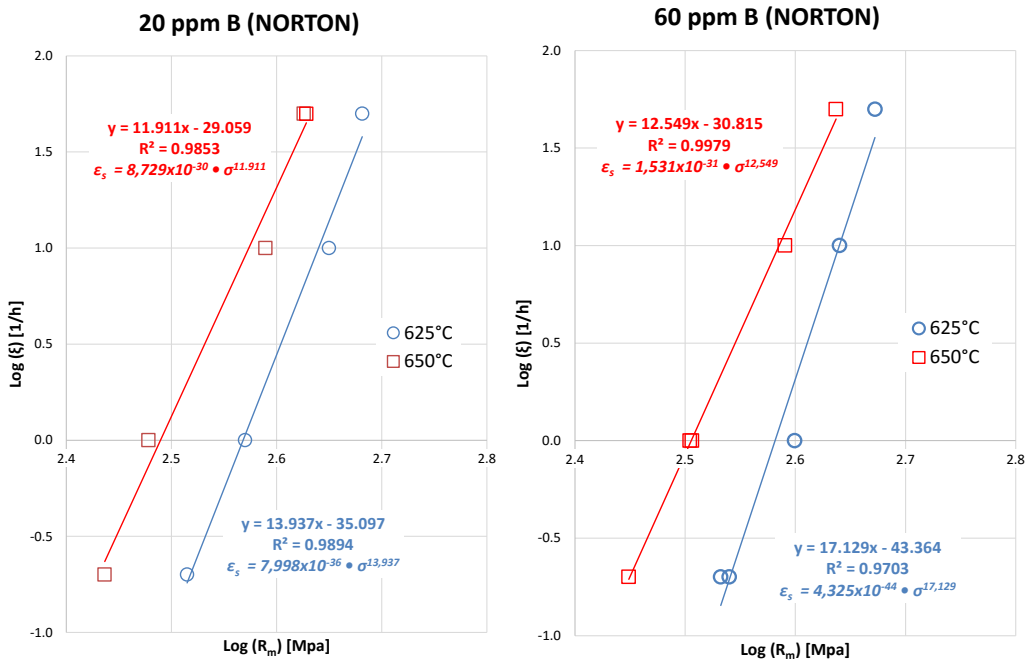


Figura 7. Relación de Norton para ambas temperaturas y contenidos de boro

En estos casos los valores de **n** estuvieron entre 13 y 18, descartando de esta manera la posibilidad de un proceso de movimiento de vacancias (ley potencial de creep) y asistiendo a un posible mecanismo de interacción entre dislocaciones y precipitados. Se puede observar para ambas composiciones la diminución de la tensión aplicada con el aumento la temperatura de ensayo para lograr misma velocidad de deformación y para una temperatura determinada la caída de la velocidad de deformación como consecuencia de la disminución de la tensión aplicada. Para la composición con mayor contenido de B este efecto es menos apreciable cuando se pretende alcanzar altas velocidades de deformación. Para una misma tensión y temperatura aplicada se

evidencia, según pendiente de recta de ajuste de los puntos experimentales, una menor velocidad de deformación para muestras con mayor contenido de B.

Para la realización de la parametrización Larson-Miller se utilizó el valor de la constante **C** mayormente aplicado en la bibliografía para metal de aporte puro de soldaduras P92, de similar composición a la aquí utilizada [13]. Existe una dependencia lineal del valor **C** con el tiempo de duración que se quiere estimar. Un valor de **C=30** fue utilizado en esta parametrización de valores de resistencia HTT a tensiones aplicadas en el ensayo de creep (CRT), valor normalmente empleado para duraciones de 10^5 h, logrando representar de esta forma las curvas de comportamiento mecánico a elevada temperatura de las dos composiciones. Las curvas son similares a las obtenidas en la literatura para ensayos de CRT de metal de soldadura P92 [13], en donde se observa para una tensión de aproximadamente 250 MPa un P_{LM} = 27 igual al aquí registrado. Considerando el P_{LM} a temperatura constante un indicador de los tiempos de rotura, para una dada tensión en las muestras con 60 ppm de B se alcanzan mayores tiempos de duración, en especial para tensiones menores a 380 MPa. Esto pone de manifiesto una mayor resistencia al creep para este material.

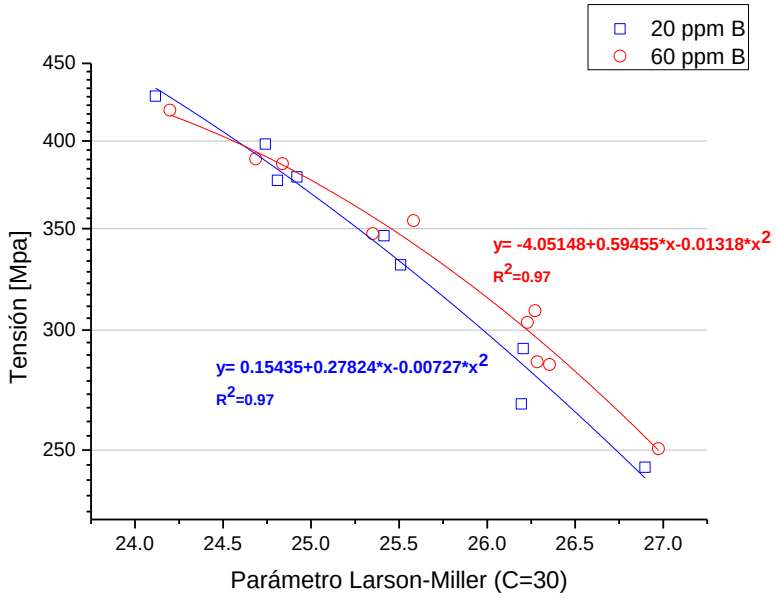


Figura 8. Parametrización de Larson-Miller para los dos contenidos de boro analizados

Esta situación estaría indicando que un aumento del contenido de B mejoró la resistencia al creep del metal de soldadura, lo que se traduce en una disminución de la velocidad mínima de creep y un aumento en los tiempos de rotura, conclusiones a las que se arriba en los tres análisis empleados. La literatura reporta que el aumento del contenido de B en la composición química de metal base 9Cr (ASME grado 92) estabiliza los carburos $M_{23}C_6$ bajando su velocidad de engrosamiento

durante el ensayo de CRT dado que disminuye la difusividad de W y el Mo presentes en la matriz martensítica y retardando por consiguiente su pérdida de propiedades de la aleación prologando de esta forma los tiempos de rotura [17-19].

4 . Conclusiones

En este trabajo se encontró que el aumento del contenido de boro en la composición química del metal de soldadura de aceros 9Cr mejoró las propiedades mecánicas a elevadas temperaturas cuando se aplica un PWHT convencional a aceros del tipo ASTM A-213-T92 y A-335-P92.

- Se registró que para las condiciones analizadas (aplicación de un PWHT convencional para ambas composiciones), la velocidad de deformación fue controlada por la resistencia de la matriz. El parámetro de Monkman–Grant (C_{MG}) calculado se encontró dentro de un rango que avala la variación de ductilidad por esta causa. El efecto del B sobre los tiempos de ruptura comienzan a observase a velocidades de deformación muy bajas
- El exponente de la tensión de la relación de Norton calculado para las condiciones analizadas (aplicación de un PWHT convencional para ambas composiciones) indicaría que posiblemente se está en presencia de un mecanismo de deformación con una fuerte interacción entre dislocaciones y precipitados. Para situaciones de misma tensión y temperatura aplicada se evidencia una menor velocidad de deformación para muestras con mayor contenido de B.
- La utilización de ensayos de HTT junto a metodologías de parametrización de creep se muestra como una matriz de ensayo robusta para aproximar en tiempos cortos datos de fluencia lenta.

REFERENCIAS

[1] ABE, F. et al. *Stabilization of martensitic microstructure in advanced 9Cr steel during creep at high temperature.* Materials Science and Engineering, A378, 299–303, 2004.

[2] BUENO, L. O. et al. *Correlation Between Creep and Hot Tensile Behaviour for 2.25Cr-1Mo Steel from 500ºC to 700ºC. Part 2: An Assessment According to Different Parameterization Methodologies.* Revista Matéria, V.10, N°3, 463–471, 2005.

[3] SREENIVASAN, P. R. et al. *Hot Tensile data and creep properties derived there form for 316l (N) stainless steel with various nitrogen contents*. Procedia Engineering, V.55, 82–87, 2013.

[4] ANSI/AWS A5.29/A5.29M:2010. Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Core Arc Welding. American Welding Society, 2010.

[5] VISWANATHAN, R. et al. *U.S. Program on Materials Technology for Ultra-Supercritical Coal Power Plants.* JMEPEG, V.14, 281-292, 2005.

[6] BUENO, L. O. et al. *Correlation between creep and hot tensile behaviour for 2.25Cr 1Mo steel from 500ºC to 700ºC Part 1: An Assessment According to usual Relations Involving stress, temperature, strain rate and Rupture Time*, Revista Matéria, V.7, N°3, 1098-1108, 2012.

[7] BUENO, L. O. et al. *Equivalência entre dados de tração a quente e fluência para o cobre comercial puro. Parte 2: análise por diferentes metodologias de parametrização*. Tecnol. Metal. Mater. Miner., V.8, N°2, 80-85, 2011.

[8] MORETO, J. A. et al. *Correlação de dados de tração a quente e fluência para a liga Kanthal A1*. Metallurgy and Materials. V.64, N°2, 181-186, 2011.

[9] ASTM A213 / A213M-15c. Standard specification for seamless ferritic and austenitic alloy-steel boiler, superheater, and heat-exchanger tubes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[10] ASTM A335 / A335M-15a. Standard specification for seamless ferritic alloy-steel pipe for high-temperature service, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[11] ASTM E8 / E8M-15a. Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[12] SAKTHIVEL, T. et al. *An assessment of creep deformation and rupture behaviour of 9Cr–1.8W–0.5Mo–VNb (ASME grade 92) steel*. Materials Science & Engineering A. 640, 61-71, 2015.

[13] ZHANG, Z. et al. *Properties of T/P92 steel weld metals for ultra supercritical (USC) power plant*. Metrode Products Limited.

[14] DUNAND, D. C. et al. *Monkman-Grant analysis of creep fracture in dispersion-strengthened and perticulate-reinforced aluminium*. Metallurgical and Materials Transactions A, V.20A, 829-838, 1999.

[15] EVANS, M. *A generalised Monkman-Grant relation for creep life prediction: An application to 1CrMoV rotor steel*, J MATER SCI, V.41, 3907–3915, 2006.

[16] Sekthivel et al. *An assessment of creep deformation and rupture behavior of 9Cr–1.8W–0.5Mo–VNb (ASME grade 92) steel*. Materials Science & Engineering A, V. 640, 61–71, 2015.

[17] ABE, F. et al. *Stabilization of martensitic microstructure in advanced 9Cr steel during creep at high temperature*. Materials Science & Engineering, A 378, 299–303, 2004.

[18] HÄTTESTRAND, M. et al. *Boron distribution in 9 – 12% chromium steels.* Materials Science & Engineering, A 270, 33–37, 1999.

[19] HORIUCHI, M. et al. *Improved Utilization of Added B in 9Cr Heat-Resistant Steels Containing W.* ISIJ International, V. 42, S67-S71, 2002.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a METRODE PRODUCTS LTD – UK, por el diseño, la fabricación y la provisión de los consumibles utilizados, a AIR LIQUIDE Argentina por la donación de los gases de soldadura, a CONARCO-ESAB Argentina por la realización de los análisis químicos y a los laboratorios de procesamiento y caracterización de metales del LABORATORIO NACIONAL DE NANOTECNOLOGÍA (LNnano) integrante del CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA Y MATERIALES (CNPEM) de Brasil por la determinación de la composición química y la realización de los ensayos de tracción en caliente (HTT). Reconocen además a la ANPCyT por el soporte financiero, al programa BecAr 2013 “Estadías cortas en el exterior para Doctorandos en Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva” de la PRESIDENCIA DE LA NACIÓN ARGENTINA por la beca otorgada para la realización de los estudios en Brasil y a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA por el financiamiento de los mecanizados de las probetas.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

RESISTENCIA A LA FRACTURA FRÁGIL EN MATERIALES DE TUBERÍAS

Collazo Patricio[1]

[1] Techint Ingeniería y Construcción
Bouchad 557, Piso 12, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (C1106ABG), Argentina
correo-e: pacollazo@techint.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objeto facilitar la interpretación y lectura de las normas utilizadas para la selección de materiales de tuberías en la etapa de diseño, se incluyen los códigos ASME B31.1, B31.3, B31.4 y B31.8, que abarcan a las industrias de generación de energía, procesos y transporte de hidrocarburos en estado líquido y gaseoso.

La aptitud de un sistema de tuberías frente a la posibilidad de una fractura frágil está en función de diversas variables: temperatura, material, cargas de diseño, procedimientos de fabricación.

Se indican los requisitos para evaluar la aptitud de los materiales utilizados en sistemas que pueden estar sometidos a una fractura frágil. La definición de “servicio a baja temperatura” tal como es usado en este trabajo, varía ampliamente a través de las muchas aplicaciones para los que los sistemas de tuberías son utilizados. Sin embargo, los principios utilizados para evaluar la aptitud de un sistema a una temperatura dada considerando la tenacidad del material, pueden aplicarse a través de un amplio rango de temperaturas, y este trabajo ha sido elaborado para proveer un criterio uniforme sobre el tema.

Se da un enfoque simple para evaluar si es necesaria una consideración adicional para definir la aptitud para servicios en los que existe la posibilidad de fractura frágil. Se incluyen flujogramas y ejemplos de aplicación para cada código extraídos de los proyectos desarrollados por Techint Ingeniería y Construcción.

Palabras Claves: *Gasoductos, Tuberías, Tenacidad, Frágil, Dúctil.*

1 INTRODUCCIÓN [1,4]

Usualmente se considera servicio a baja temperatura cuando el material está por debajo de la temperatura ambiente. Pero para ciertas combinaciones de materiales, espesores y niveles de tensión, la fractura frágil puede ocurrir a temperaturas por encima de la ambiente. La definición de "servicio a baja temperatura" tal como es usado en este trabajo, varía ampliamente a través de las muchas aplicaciones para los que los sistemas de tuberías son utilizados. Para un servicio de aire, una baja temperatura podría ser 0°C, mientras que para un sistema de tuberías criogénico fácilmente podría ser de -185°C.

Los tres principales factores que generalmente controlan la susceptibilidad a la fractura frágil, son: tenacidad del material, tamaño de la grieta y nivel de tensión.

Las estructuras Cúbicas de Cuerpo Centrado (BCC, como las aleaciones ferríticas), exhiben una importante transición cuando se hacen pruebas de impacto en un rango de temperaturas. A temperaturas por encima de la de transición, las probetas impactadas fracturan de modo dúctil, absorbiendo cantidades relativamente elevadas de energía. A temperaturas más bajas, las fracturas son de modo frágil absorbiendo apreciablemente menos energía. Dentro del rango de transición, la fractura generalmente será una mezcla de áreas de fractura dúctil y frágil. En los aceros con estructura Cúbica de Cara Centrada (FCC, como los inoxidables austeníticos), esta transición es despreciable.

Existe una amplia variedad de servicios donde la aptitud para bajas temperaturas no es considerada, sin embargo se necesita un criterio de selección para justificar esta decisión.

2 LIMITACIONES EN MATERIALES DE TUBERÍAS

2.1 ASME B31.1 - 2014 Power Piping [2]

124.1.2 Límites a bajas temperaturas.

A) El diseñador debe tener en cuenta la posibilidad de fractura frágil en servicios a baja temperatura.

B) Deben cumplirse los requisitos de ASME B31T.

2.2 ASME B31.T – 2010 Standard Toughness Requirements for Piping [4]

Para mantener el número de requisitos en un mínimo, se han establecido grupos de materiales, y ha sido provisto un único conjunto de requisitos para cada grupo. A estos grupos para simplificar la referencia se les han asignado "números T" (T – Numbers).

En la Figura A-1 de esta norma se incluye un flujograma que facilita su interpretación.

Este código define niveles de tensión, dando un margen en el diseño que se considera adecuado para prevenir un modo de fractura frágil. La relación de tensiones es definida en el párrafo 3.6.2 como la máxima de lo siguiente:

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.6.2 Relación de Tensiones (Stress Ratio)

a) Tensión a la presión nominal (calculado con el espesor mínimo del tubo menos las tolerancias) dividido por la tensión admisible a la temperatura mínima de diseño.

b) Para accesorios de tuberías con "Rating" de presión, la presión bajo consideración dividida por el "Rating" de presión a la temperatura mínima de diseño.

c) Combinación de la tensión longitudinal debida a la presión, peso muerto y tensiones por deformación (intensificadores de tensión no son incluidos en este cálculo) dividido por la tensión admisible a la temperatura mínima de diseño. En el cálculo de las tensiones longitudinales, las fuerzas y los momentos en el sistema de tuberías deben ser calculados usando dimensiones nominales y las tensiones deben ser calculadas usando las propiedades de la sección según las dimensiones nominales menos la corrosión, erosión y tolerancias.

2.3 ASME B31.3 – 2014 Process Piping [3]

En la Figura 1 se esquematizan los pasos a seguir para cumplir con los requisitos de este código. Presenta un procedimiento similar al indicado en ASME B31T, también el criterio está basado en el mismo concepto de "relación de tensiones" (Stress Ratio) para prevenir la fractura frágil y se lo define de la misma forma en las notas de la Figura 323.2.2B.

2.4 ASME B31.4 – 2012 Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries [5]

En este código el enfoque es muy distinto al de los precedentes. A continuación se transcriben los párrafos que enumeran los requisitos para evaluar servicios a baja temperatura:

400.1.2 Este código no fue desarrollado para aplicarse a:

c) Tuberías con una temperatura de diseño por debajo de -30°C o por encima de 120°C.

401.2.3.7 Efectos de la Temperatura

La temperatura de diseño es la temperatura del metal esperada durante la operación normal. No es necesario variar la tensión de diseño para temperaturas entre -30°C y 120°C.

Deben considerarse posibles condiciones que puedan causar bajas temperaturas en ductos que transportan líquidos que se evaporen a/o cerca de condiciones atmosféricas.

2.5 ASME B31.8 – 2014 Gas Transmission and Distribution Piping Systems [6]

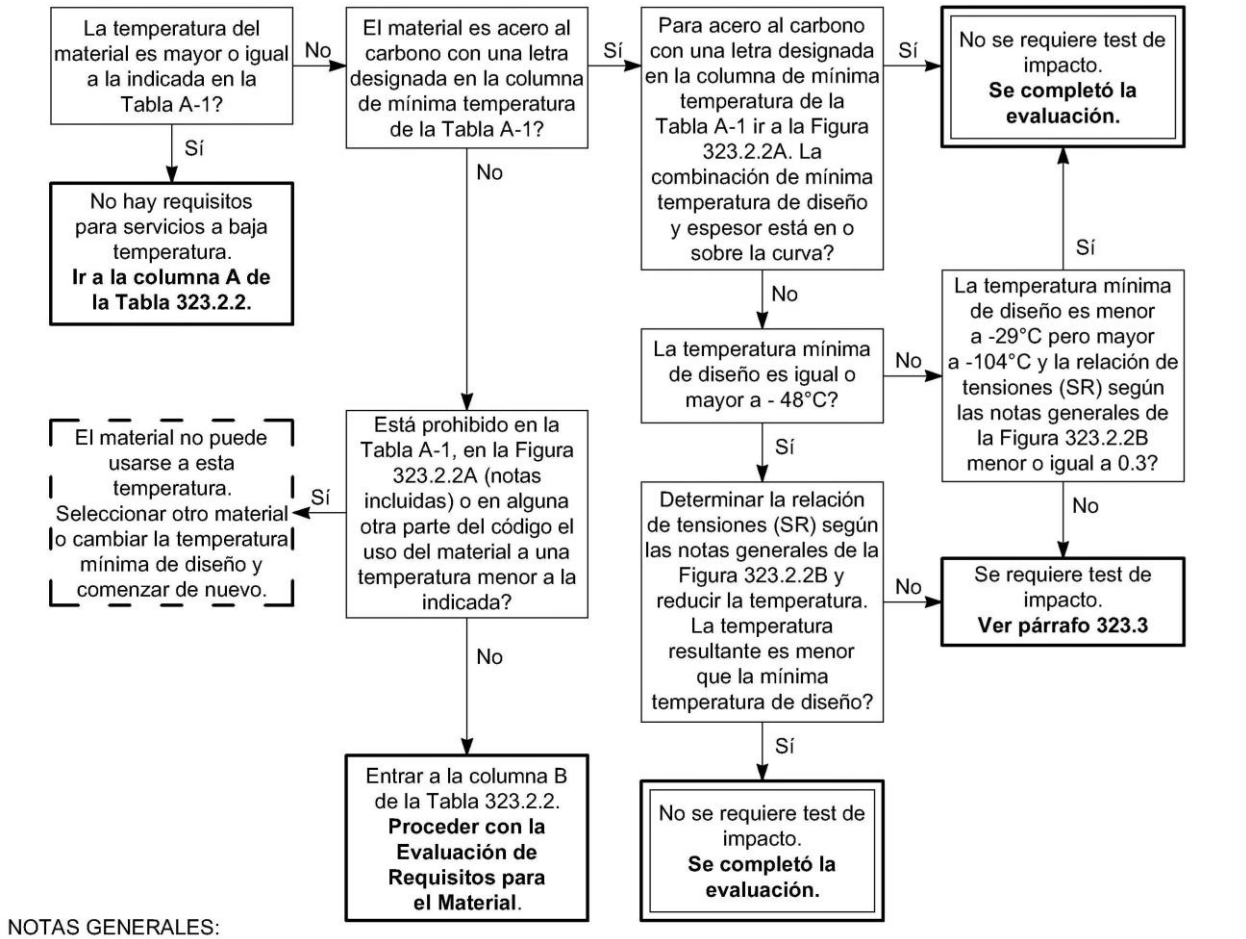
A continuación se transcriben los párrafos que enumeran los requisitos para evaluar servicios a baja temperatura:

812 Materiales para Aplicaciones de Baja Temperatura

Algunos de los materiales que están de acuerdo con las especificaciones de este código pueden no tener la aptitud para operar a bajas temperaturas. Los usuarios de este código están advertidos a considerar los efectos de las bajas temperaturas y la potencial posibilidad de fracturas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Cuando la temperatura mínima de diseño es menor a -29°C, debe establecerse un programa de control de fracturas.



NOTAS GENERALES:
(a) La doble línea indica un paso que completa la evaluación.
(b) La línea en negrita indica un paso que completa la fase de la evaluación.
(c) La línea interrumpida indica que la evaluación resulta en una condición inaceptable y necesita realizarse con nuevos parámetros.

Figura 1 Flujograma – Resumen del párrafo 323.2.2 del Código ASME B31.3.

3 CONTROL DE FRACTURAS EN DUCTOS [7-9]

En este punto se indican los criterios para el control de fracturas en ductos enunciados en los códigos ASME B31.4 y ASME B31.8.

El diseño para el control de fracturas en ductos requiere que bajo las condiciones más adversas:

1. La tubería tenga suficiente tenacidad para tolerar pequeños defectos sin fracturarse.
2. Si por alguna causa el ducto se fractura, sea de modo dúctil.
3. El acero tenga la capacidad de absorber energía suficiente para detener la fractura dúctil, si no es posible, se montan supresores de fractura.

Un problema que solo se presenta en ductos es la longitud potencial de la falla. Debido a que el gas comprimido contiene una cantidad enorme de energía almacenada y a que la tasa de

ISBN: 978-987-1676-63-7

liberación de energía en caso de ruptura suele ser lenta en relación con la velocidad de propagación de fractura, esta puede propagarse a lo largo del eje longitudinal del ducto a considerables distancias. La fractura más larga registrada fue frágil y se propagó por una distancia de 13.3 Km. Por lo tanto, los ductos son de las pocas estructuras en las que la extensión de la propagación es una preocupación. Ver Figura 2.

El origen de la fractura es un punto en el cual hay generalmente solo una fisura, esta contiene un defecto que, combinándose con la tensión aplicada al acero del ducto, es responsable de la falla.

El tipo de fractura es función de la temperatura del ducto en relación con la temperatura de transición del acero.



Figura 2 Fractura de un gasoducto.

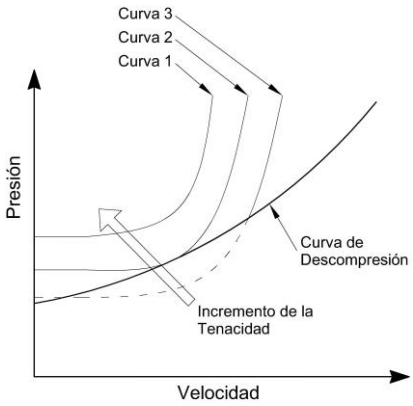


Figura 3 Curvas de Battelle.

3.1 Método de las dos curvas de Battelle - BTCM [8]

Este método consiste en la superposición de dos curvas independientemente determinadas, la curva característica de la velocidad de onda de descompresión del gas y la curva característica de la velocidad de propagación de la fractura, cada una como función de la presión local del gas. La Figura 3 muestra esquemáticamente una curva de velocidad de onda de descompresión de gas y tres curvas de velocidad de fractura que representan tres tipos de tuberías con diferente tenacidad. A medida que la tenacidad aumenta, la curva de fractura se mueve hacia arriba. Inicialmente, a altas presiones, la velocidad de la onda de descompresión excede la velocidad de propagación de fractura. Al avanzar la descompresión del gas, ambas velocidades, la de descompresión y la de propagación de fractura disminuyen. La Curva 1 no intersecta a la de descompresión del gas en ningún punto. Esto indica que la velocidad de propagación de fractura es siempre menor que la velocidad de la onda de descompresión del gas, esto conduce a la eliminación de la propagación de fractura.

La Curva 3 intersecta a la de descompresión en dos puntos. Solo el punto superior de intersección (a la presión mayor) es considerado relevante en el BTCM. Por encima de esta presión, la velocidad de fractura es menor que la velocidad de descompresión. La velocidad de propagación

ISBN: 978-987-1676-63-7

de fractura continua cayendo hasta la presión correspondiente al punto de intersección, se supone en el BTCM que en el punto de intersección la fractura y la onda de descompresión del gas se propagan a la misma velocidad. Esto significa que la presión del gas en el extremo de la fractura ya no disminuye y que ambos, fractura y onda de descompresión continúan moviéndose a la misma velocidad, lo que resulta en una propagación de fractura de gran longitud.

El límite entre la detención y la propagación del avance de una fractura está representado por la tangencia entre la curva de descompresión del gas y la curva de fractura (Curva 2). La tenacidad mínima requerida para detener el avance de una fractura se define como "tenacidad supresora".

El BTCM da buenas predicciones para una tenacidad menor a 100 J, pero no lo hace para tenacidades mayores.

La curva de velocidad de onda de descompresión del gas y la curva característica de la velocidad de propagación de la fractura están dadas por las Ecuaciones (1) y (2):

$$P_d = P_i \left(\frac{V_d}{6V_a} + \frac{5}{6} \right)^7 \quad (1)$$

$$v_f = K \frac{\sigma_f}{\sqrt{CVN/A}} \left(\frac{P_d}{P_a} - 1 \right)^{1/6} \quad (2)$$

Dónde:

v_f = velocidad de propagación dúctil de la grieta pasante, en m/s.

K = factor de relleno.

σ_f = tensión de flujo, en MPa.

CVN = energía absorbida en el Charpy V-notch Test, en J.

A = área de la sección de fractura en el CVN (0,8 cm2 para el "full-size").

P_d = presión manométrica en el extremo de la grieta, en MPa.

P_a = presión manométrica de arresto, o sea la que anula la velocidad de propagación, en MPa.

P_i = presión inicial, en MPa.

V_d = velocidad de propagación de la onda de descompresión, en m/s.

V_a = velocidad del sonido en el gas en condiciones iniciales, en m/s.

4 EJEMPLOS DE CÁLCULO

4.1 Ejemplo de Cálculo según ASME B31.1 – B31T

Evaluar la aptitud del material seleccionado para las tuberías de un sistema de venteo.
Diámetro (Do) 10" = 273 mm. Espesor (Tn): 14.27 mm. Material: A 106 Gr.B. Presión de Operación (Po): 7500 KPa. Temperatura Mínima de Operación: -60°C. Rating: #600. Corrosión (C): 1.6 mm. Tolerancia de fabricación (F): 12.5 %. Tensión Admisible (SA): 117898 KPa.

Resolución:

1) Numero T según Tabla 3.2-1: CS B
2) Límite de mínima temperatura de servicio de Tabla 3.1-1 Col. 4: -18°C.
3) Determinación de la Relación de Tensiones (Stress Ratio) según 3.6.2:
   a) Tensión circunferencial (Sn) calculada con el espesor nominal menos corrosión y tolerancias de fabricación según ecuaciones (3) y (4):

$$Sn = (Po \times Do) / Td \times 2 - (0.4 \times Po) \quad (3)$$

$$Td = Tn \times F - C \quad (4)$$

   Relación de Tensiones = Sn / SA = 88274 KPa / 117898 KPa = 0.75

   b) De ASME B16.5 Tabla 2-1.1:
   Presión por clase: 102.1 bar = 10210 KPa
   Relación de Tensiones = Presión / Presión por Clase = 7500 KPa / 10210 KPa = 0.74

   c) Cálculo realizado con CAESAR II:
   OPE Stress: 145983.7 Allowable: 117898
   Relación de Tensiones = 145983.7 KPa / 117898 KPa = 1.23

Conclusión: La máxima relación de tensiones supera a la unidad en el punto c), el material no es apto para operar a las condiciones de presión y temperatura especificadas. La sobretensión se debe a la contracción térmica. Se requiere seleccionar otro material y rehacer los cálculos.

Cálculos con el nuevo material:

Material: A 312 TP 304.
Tensión Admisible SA: 137892 KPa.

Resolución:

1) Numero T según Tabla 3.2-1: SS-425.
2) Límite de mínima temperatura de servicio de Tabla 3.1-1 Col. 4: -101°C.

Conclusión: La temperatura indicada en la columna 4 de la Tabla 3.1-1 (-101°C), es menor que la temperatura mínima de diseño (-60°C), por consiguiente no se requiere cumplir con los requisitos de servicios para bajas temperaturas, se completó la evaluación. **El material es apto** y no requiere

ISBN: 978-987-1676-63-7

test de impacto, proceder con la evaluación de requisitos para la fabricación. El nuevo material tiene una estructura FCC con un rango de transición dúctil-frágil despreciable.

4.2 Ejemplo de Cálculo según ASME B31.3

Verificar el material del colector de un sistema de venteo según los siguientes datos:

Diámetro (Do): 24". Espesor (Tn): 9.52 mm. Material: A106 Gr. B. Serie #300. Presión de Operación (Po): 3200 KPa. Temperatura Mínima de Operación: -40°C. Corrosión (C): 1.27 mm. Tolerancia de fabricación (F): 12.5 %. Tensión Admisible (SA): 137892 KPa.

Se modeló el sistema en el software para cálculo de tensiones en tuberías CAESAR II sin considerar intensificadores de tensión en accesorios (no se modelaron codos y derivaciones, ver Figura 4).

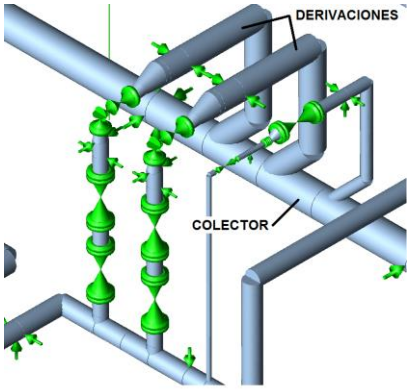


Figura 4 Configuración del Sistema de Venteo.

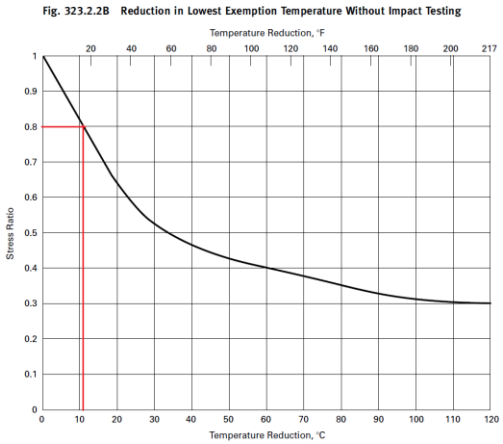


Figura 5 ASME B31.3, Figura 323.2.2B.

De Tabla A-1 y de la figura 323.2.2A encontramos que la mínima temperatura admisible es -29°C y a tensión admisible 137 MPa. La temperatura de operación está por encima de -48°C (ver Flujograma de la Figura 1), por lo tanto es posible utilizar la Figura 323.2.2B.

La temperatura debe bajarse de -29°C que es el límite inferior establecido por el código a -40°C que es lo requerido por el proceso, entonces es necesario reducir la temperatura en 11°C, ver Figura 5. Con esta reducción, intersectando en línea vertical con la curva, se tiene una relación de tensiones (Stress Ratio) de 0.8, es decir que la tensión en la tubería no debe exceder un 80% de la tensión admisible 137 MPa (109 MPa).

Resolución:

Determinación de la Relación de Tensiones (Stress Ratio) según Notas de la Figura 323.2.2B:

1) Tensión circunferencial (Sn) calculada con el espesor nominal menos corrosión y tolerancias de fabricación según ecuaciones (3) y (4):

$$Sn = (Po \times Do) / Td \times 2 - (0.4 \times Po) \quad (3)$$

$$Td = Tn \times F - C \quad (4)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Relación de Tensiones = Sn / SA = 136760 KPa / 137892 KPa = 0.99

2) De ASME B16.5 Tabla 2-1.1:
   Presión por clase: 51.1 bar = 5110 KPa.
   Relación de Tensiones = Presión / Presión por Clase = 3200 KPa / 5110 KPa = 0.62

3) Cálculo realizado con CAESAR II:
   Highest Stresses: (KPa) LOADCASE 1 (SUS) W+T1+P1
   CodeStress Ratio (%): 85.4 @Node 3060
   Code Stress: 117812 Allowable: 137892.0
   Relación de Tensiones = 117812 KPa / 137892 KPa = 0.85

Conclusión: La máxima relación de tensiones supera 0.8 en 1) y 3), el colector **requiere test de impacto** para operar a las condiciones de presión y temperatura especificadas. Se recomienda cambiar el espesor del colector.

Adoptando espesor Sch. XS (12.7 mm) para el colector:

1) Tensión circunferencial (Sn) calculada con el espesor nominal menos corrosión y tolerancias de fabricación según ecuaciones (3) y (4):

$$Sn = (Po \times Do) / Td \times 2 – (0.4 \times Po) \quad (3)$$

$$Td = Tn \times F – C \quad (4)$$

   Relación de Tensiones = Sn / SA = 97735 KPa / 137892 KPa = 0.7

2) De ASME B16.5 Tabla 2-1.1:
   Relación de Tensiones = Presión / Presión por Clase = 3200 KPa / 5110 KPa = 0.62

3) Cálculo realizado con CAESAR II:
   Highest Stresses: (KPa) LOADCASE 1 (SUS) W+T1+P1
   CodeStress Ratio (%): 74.6 @Node 4460
   Code Stress: 102878.4 Allowable: 137892.0
   Relación de Tensiones = 102878.4 KPa / 137892 KPa = 0.75

Conclusión: Cambiando el espesor del colector de 24” la tensión está por debajo del 80% de la admisible (109 MPa). **El sistema es apto**, no requiere test de impacto para operar a -40°C y no es necesario cumplir con otro requisito establecido en el código. Nótese que para el cálculo de las tensiones del punto 3) se consideró como sostenida (SUS) al caso de operación. La temperatura que se consideró es la mínima posible del fluido, no la del material de la tubería.

Discusión: Para ser conservativos al realizar el análisis de tensiones en la tubería, se asume que la temperatura del metal es igual a la temperatura del fluido. Para tuberías aisladas que tienen flujo

ISBN: 978-987-1676-63-7

continuo esto sería correcto. Sin embargo, es razonable cuestionar si esta suposición es válida para un sistema de alivio o de venteo con un flujo intermitente y de corta duración. En algunos casos en operación con flujos continuos, el metal tarda casi tres horas en alcanzar -29°C bajo las suposiciones más conservativas.

4.3 Ejemplo de Cálculo según ASME B31.8

Verificar materiales y espesores de un gasoducto según los siguientes datos:
Diámetro: 24". Espesor: 7.92 mm. Material: API 5L X52. Presión de Operación: 3468 KPa. Temperatura Mínima de Operación: 20°C. Los valores mínimos de energía absorbida en el Charpy V-notch Test (CVN) pueden tomarse del punto G.7 del Anexo G de API 5L (edición 45).

Se utilizó el método de Battelle. El Departamento de Procesos de Techint Ingeniería y Construcción (TEIC) desarrolló un programa que estima la velocidad de propagación dúctil de una grieta longitudinal en un tubo de acero (hasta X70) en función de la energía absorbida en el Charpy V-notch Test (CVN) y de la presión manométrica en el extremo de la grieta.
La velocidad de la onda de descompresión en el tubo al producirse la falla se estima por separado con Hysys y se ingresa al programa en función de la presión absoluta.
El programa grafica las dos curvas y permite verificar si la velocidad de descompresión se mantiene siempre superior a la velocidad de propagación de la fractura para cualquier presión, condición para asegurar que la grieta detendrá su avance al encontrar en su extremo una presión inferior a la requerida para su propagación. Ver Figura 6.
Con este criterio, se consigue que la falla total del ducto a partir de una grieta se restrinja a uno o dos tubos y no se propague varios kilómetros, extendiendo el área afectada y dificultando la reparación.

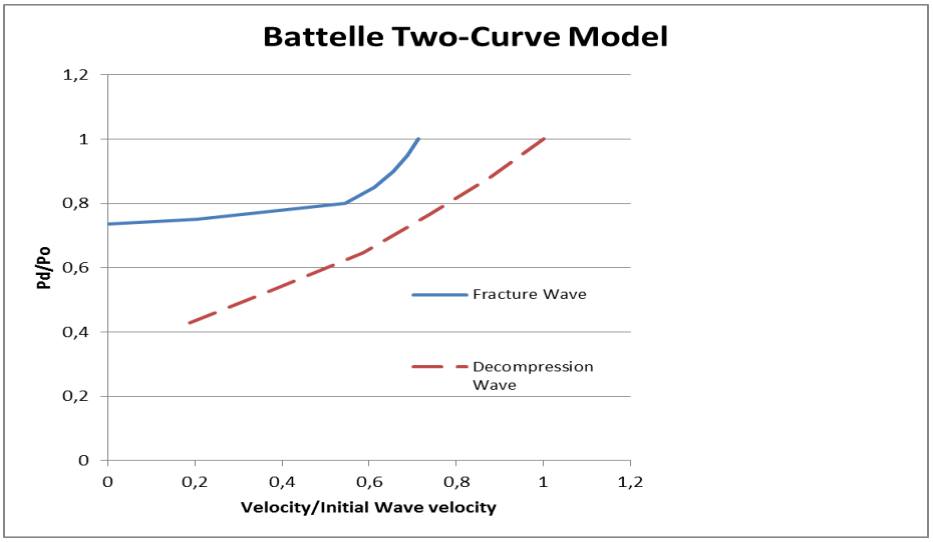


Figura 6 Curvas BTCM según programa de TEIC.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Conclusión: La curva del material seleccionado no intersecta a la curva de descompresión del gas en ningún punto. Esto indica que la velocidad de propagación de fractura es siempre menor que la velocidad de la onda de descompresión del gas, lo que conduce a una eliminación de la propagación de fractura. **El material es apto.** Este mismo procedimiento puede aplicarse para el caso de ductos según la norma ASME B31.4.

5 CONCLUSIONES

5.1 ASME B31.1 - 2014 Power Piping

Este código en el párrafo 124.1.2 “Límites a bajas temperaturas” hace referencia al ASME B31T, que es fácil de interpretar y aplicar. Simplifica la selección del material al agrupar según su característica a varios materiales (T-numbers), listándolos en la Tabla 3.1-1. Para determinar la relación de tensiones (Stress Ratio), es necesario realizar un análisis de tensiones, generalmente utilizando un software.

5.2 ASME B31.3 - 2014 Process Piping

El procedimiento indicado en el párrafo 323.2.2 de la norma, “Límites Inferiores de Temperatura, Materiales Listados” puede resultar de difícil interpretación para un diseñador de tuberías que no esté familiarizado con este aspecto del código. En el Flujograma incluido en la Figura 1, se indican los pasos a seguir para evaluar a un material.

Es fundamental, al indicar la temperatura mínima de diseño de un material, considerar el espesor de la tubería, por ejemplo, un error típico al especificar materiales:

Temperatura mínima de diseño: -29°C, Material: Acero al Carbono API 5L Gr.B, Diámetro: 24”, Espesor: Sch. 100 (38.9 mm).

Según la Fig. 323.2.2A, para un espesor de tubería de 38.9 mm la temperatura mínima de diseño es de 11°C y no de -29.

5.3 ASME B31.4 - 2012 Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries - ASME B31.8 - 2014 Gas Transmission and Distribution Piping Systems

Una de las más importantes observaciones que se han hecho como resultado de numerosas investigaciones de fallas es que éstas generalmente se inician en un defecto (ningún ducto está libre de defectos), con la única excepción de algunas pocas fallas debidas a groseras sobrecargas como: tensiones secundarias, combustión interna o sabotaje.

Desde la etapa de diseño, aplicando el BTCM se contribuye a mejora de la eficiencia en la operación del ducto y se reducen las probabilidades de fallas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

REFERENCIAS

[1] ASTM A370 – 14, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.

[2] ASME B31.1, Power Piping, ASME Code for Pressure Piping, B31. Two Park Avenue, New York, NY, 10016 USA, 2014.

[3] ASME B31.3, Process Piping, ASME Code for Pressure Piping, B31. Two Park Avenue, New York, NY, 10016 USA, 2014.

[4] ASME B31T, Standard Toughness Requirements for Piping, ASME Code for Pressure Piping, B31. Two Park Avenue, New York, NY, 10016 USA, 2010.

[5] ASME B31.4 [Revision and Consolidation of ASME B31.4-2009 and B31.11-2002 (R2008)] Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries, ASME Code for Pressure Piping, B31. Two Park Avenue, New York, NY, 10016 USA, 2012.

[6] ASME B31.8 (Revision of ASME B31.8-2012) Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME Code for Pressure Piping, B31. Two Park Avenue, New York, NY, 10016 USA, 2014.

[7] Specification for Line Pipe API Specification 5L Forty-Fifth Edition, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005, 2012.

[8] C. Lu, G. Michal, A. Godbole, P. Venton and L. Fletcher, Re-Examination of Battelle Two Curve Method, 2014 10th International Pipeline Conference.

[9] Btcm Rw-88 Manual de Procedimientos, Tepge Integridad de Ductos: “Battelle Two Curve Model” (BTCM).

[10] ASME B16.5 Pipe Flanges and Flanged Fittings, The American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990, 2004.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDIO DE MECÁNICA DE RELAJACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES USANDO UN MÉTODO DE MICRO-INDENTAS

Felipe V. Díaz [1,2], Claudio A. Mammana [1] y Armando P. Guidobono [3]

[1] Departamento de Ingeniería Electromecánica – Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela,
Acuña 49, Rafaela, Argentina
correo-e: felipe.diaz@frra.utn.edu.ar
[2] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina
[3] División Metrología Dimensional, Instituto Nacional de Tecnología Industrial,
Centro Regional Rosario,
Ocampo y Esmeralda, Rosario, Argentina

RESUMEN

A partir del uso de un método de micro-indentas, adaptado para implementar cuatro tratamientos isotérmicos, la mecánica de relajación de tensiones residuales fue exhaustivamente evaluada en muestras de aleación de aluminio AA 6082-T6. Los desplazamientos residuales fueron medidos usando una máquina de medir de alta precisión, lo cual posibilitó disminuir el error absoluto de medición a solo ± 300 nm. Las tensiones residuales fueron calculadas a partir de estos desplazamientos usando un modelo de tensión plana. Este trabajo presenta un detallado análisis de datos vía círculos de Mohr, lo cual permitió evaluar las componentes normales y tangenciales de la tensión residual en todas las direcciones para diferentes tiempos de relajación. Los resultados obtenidos revelan que el proceso de relajación finaliza cuando el alivio de tensiones residuales se completa en algunas direcciones preferenciales, e inmediatamente, una breve fase de recuperación de tensiones comienza. Finalmente, a partir de los valores obtenidos en el cierre de esta fase fue posible inferir que el estado final de las componentes normales relajadas es cuasi-isótropo.

Palabras Claves: *Mecánica de relajación, Tensiones residuales, Método de micro-indentas, Aleación de aluminio, Círculos de Mohr.*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes métodos a fin de determinar tensiones residuales usando datos generados mediante micro o nano-indentación. La mayoría de estos métodos compara la profundidad de contacto o bien las curvas carga-desplazamiento de muestras tensadas y destensadas, a partir de lo cual las diferentes componentes de la tensión residual pueden ser estimadas [1-3]. Recientemente fue desarrollado un método basado en el cambio de distancias entre micro-indentas [4,5], el cual opera cuando las tensiones residuales se relajan a partir de un tratamiento de distensión térmica. Más recientemente, este método fue optimizado incorporando una máquina de medir universal [6], lo cual posibilitó evaluar, con gran precisión, tensores de tensión residual generados mediante fresado de alta velocidad [7,8].

El propósito de este estudio es demostrar la viabilidad de un método de micro-indentas para evaluar la mecánica de relajación de componentes normales y tangenciales de tensión residual en muestras de aleación de aluminio sujetas a carga térmica. En la presente implementación del método, cuatro tratamientos isotérmicos fueron llevados a cabo a fin de evaluar la mecánica de relajación para diferentes tiempos. Es importante destacar que el método de micro-indentas aplica un solo tratamiento isotérmico, con el cual las componentes relajadas corresponderán al tiempo inherente a dicho tratamiento. La sensibilidad de la presente implementación fue evaluada a través de campos de tensión residual muy débiles. Los desplazamientos residuales fueron medidos usando una máquina de medir de alta precisión, lo cual posibilitó reducir el error absoluto de medición a solo ± 300 nm. Las tensiones residuales fueron calculadas a partir de los desplazamientos residuales usando un modelo de tensión plana. En este trabajo, la mecánica de relajación fue evaluada en todas las direcciones del campo de tensiones residuales generado. Los resultados obtenidos muestran que la relajación de las componentes normales es una función lineal del tiempo para todas las direcciones evaluadas. Un análisis exhaustivo de las componentes normales y tangenciales pudo ser llevado a cabo a partir de la herramienta gráfica conocida como círculo de Mohr [9]. A través de esta herramienta fue detectado que el proceso de relajación termina cuando la distensión se completa en algunas direcciones preferenciales, e inmediatamente, un proceso de recuperación de la tensión residual es activado. Finalmente, los valores de la tensión residual obtenidos al final del proceso de recuperación revelan que el estado final de las componentes normales relajadas es cuasi-isótropo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

ISBN: 978-987-1676-63-7

El presente estudio se llevó a cabo a partir de un producto laminado de aleación de aluminio AA 6082-T6. El espesor de este producto es de 4 mm. Cabe destacar que este material es principalmente usado en moldes y matrices, en la fabricación de maquinaria industrial, y también, en diferentes tipos de estructuras. En relación a sus principales características, estas incluyen buenas propiedades mecánicas y muy buena resistencia a la corrosión. La Tabla 1 muestra tanto la composición química como las propiedades mecánicas de esta aleación.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de la aleación AA 6082-T6

	Composición química (% peso)							Res. tracción	Lim. elástico	Elongación	Dureza
Al	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Zn	Cu	σ_u (MPa)	σ_e (MPa)	A (%)	HV0.5
Base	0.91	0.87	0.58	0.5	0.22	0.2	0.16	341	316	11	108

En este trabajo fueron evaluadas muestras de 30 x 30 x 4 mm. El método de medición consistió en dos etapas. Primero, una distribución de micro-indentas se introdujo en cada superficie a evaluar. Luego, las coordenadas de dichas micro-indentas fueron medidas, antes y después de un tratamiento térmico, usando una máquina de medir de alta precisión (GSIP MU- 314). Para estudiar la mecánica de relajación en función del tiempo, cuatro muestras fueron evaluadas. Los tratamientos térmicos inherentes a la segunda etapa del método se llevaron a cabo a 300 °C durante 20, 60, 80 and 100 minutos.

A partir de micro-indentas alargadas que se introducen mediante un dispositivo que se acopla a la mencionada máquina de medir [6], las incertezas asociadas a los procesos de referenciamiento y medición pudieron ser reducidas. La Figura 1 muestra la distribución de micro-indentas introducidas en cada muestra. Cada distribución posibilita evaluar todas las direcciones del campo de tensiones residuales en el baricentro del cuadrado generado.

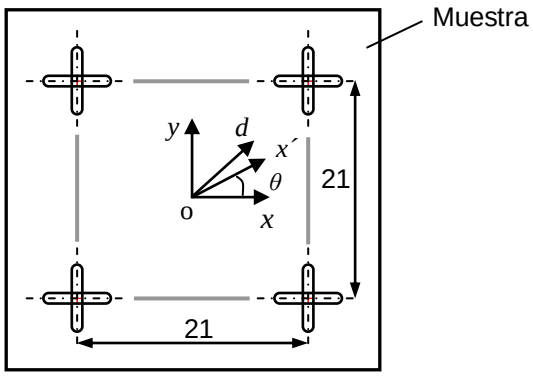


Figura 1: Distribución de ocho micro-indentas

A partir de las coordenadas de dicha distribución es posible obtener las componentes de la deformación residual ε_x, ε_y y γ_{xy}, las cuales corresponden al baricentro del mencionado cuadrado [8]. Además, las componentes asociadas a una dirección arbitraria x' se pueden expresar como [9]

$$\varepsilon_{x'} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2}\sin 2\theta$$

$$\gamma_{x'y'} = (\varepsilon_y - \varepsilon_x)\cdot \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cdot \cos 2\theta \qquad (1)$$

donde θ es el ángulo que forma dicha dirección arbitraria con el eje x (ver Figura 1). Luego, la componente tangencial de la deformación se puede obtener usando [9]

$$\varepsilon_{x'y'} = \gamma_{x'y'} / 2 \qquad (2)$$

Si bien las muestras evaluadas fueron tratadas a 300 °C, la deformación inelástica puede ser considerada como despreciable ya que las tensiones residuales evaluadas en este trabajo son muy bajas y además los tiempos de exposición no son excesivos [10,11]. Por otra parte, las tensiones residuales térmicas también se pueden considerar despreciables ya que la geometría de las muestras evaluadas es simple, el espesor es pequeño y la velocidad de enfriamiento de los tratamientos térmicos es lenta. Por lo tanto, considerando al material evaluado como homogéneo, isótropo y lineal elástico, y asumiendo que las superficies evaluadas se hallan bajo un estado de tensión plana, las componentes σ_x, σ_y y τ_{xy} pueden ser obtenidas [12]. Luego, las componentes normal y tangencial asociadas a dicha dirección arbitraria x' pueden ser expresadas como [9]

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \qquad (3)$$

Finalmente, el error inherente a este procedimiento pudo ser estimado en ± 0.9 MPa [6]. Es importante notar que las coordenadas de las mencionadas micro-indentas fueron medidas dentro de un rango de temperaturas de 20 ± 0.2 ˚C, con una variación menor a 0.01 ˚C/min. Cabe destacar que si esta variación resulta mayor al valor mencionado, el error de medición aumentará significativamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 (a) muestra las componentes normales σ_x y σ_y. Cabe señalar que los valores que alcanzan estas componentes representan las magnitudes relajadas. De 20 a 80 minutos ambas

funciones son lineales pero con diferentes pendientes, lo cual implica diferentes velocidades de relajación. A partir de los 80 minutos, σ_y es constante y σ_x disminuye en valor absoluto. No obstante esto, los valores correspondientes a 100 minutos son, para ambas componentes, muy similares.

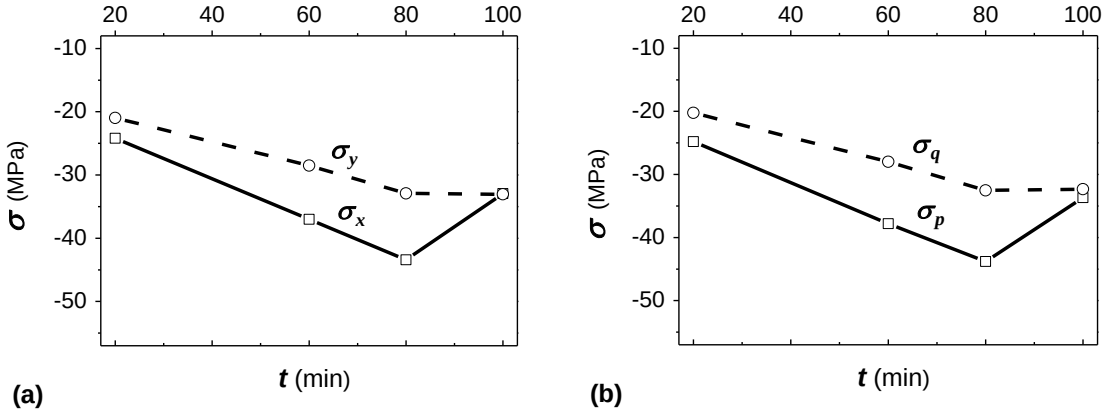


Figura 2: Variación de componentes normales de tensión residual correspondientes a las direcciones (a) de referencia y (b) principales

La Figura 2 (b) muestra las componentes normales σ_p y σ_q, las cuales corresponden a las direcciones principales. Es importante notar que estas direcciones son aquellas asociadas a las componentes normales máxima y mínima [10]. En este caso, σ_p y σ_q corresponden al máximo y mínimo compresivo, respectivamente. Los resultados obtenidos para ambas componentes son muy similares a los correspondientes a σ_x y σ_y. Debido a esto, es posible afirmar que las direcciones principales estarán muy cerca de los ejes de referencia x e y.

La Figura 3 muestra los círculos de Mohr obtenidos para cada tiempo evaluado. Es importante mencionar que, en cada círculo, las coordenadas ortogonales de cada punto corresponden a las componentes normal (abscisa) y tangencial (ordenada) asociadas a una dirección que se halla rotada un ángulo θ con respecto al eje de referencia x (ver Figura 1). Debido a esto, cada círculo brindará información acerca de las componentes normal y tangencial inherentes a todas las direcciones. Cada círculo incluye un pequeño segmento que define el punto correspondiente a la dirección de referencia ($\theta = 0$ en la Figura 1). Los círculos inherentes a la deformación residual se muestran en la Figura 3 (a). En cada círculo, todas las componentes normales son compresivas. Al evaluar el cambio de 20 a 80 minutos es posible advertir un virtual desplazamiento de círculo a izquierda, y además, un aumento de diámetro. Esto significa que las componentes normales aumentan en valor absoluto en todas las direcciones. Por otra parte, el círculo que corresponde a

ISBN: 978-987-1676-63-7

100 minutos tiene un diámetro muy pequeño, lo cual significa que las componentes normales son muy similares en todas las direcciones (estado cuasi-isótropo).

La Figura 3 (b) muestra los círculos de Mohr correspondientes a las tensiones residuales relajadas. En estos círculos se observa una diferencia importante entre los valores que alcanzan las componentes normales y tangenciales. Si bien la distribución de los círculos de deformaciones y tensiones es similar, los inherentes a las tensiones se hallan más alejados unos de otros, lo cual significa que los estados de tensión residual son más independientes que los estados de deformación residual. Como era de esperar, el cambio de 80 a 100 minutos implica una reducción drástica de diámetro y también un desplazamiento a derecha. Además, los dos círculos comparten la abscisa correspondiente a la componente principal menos compresiva σ_q.

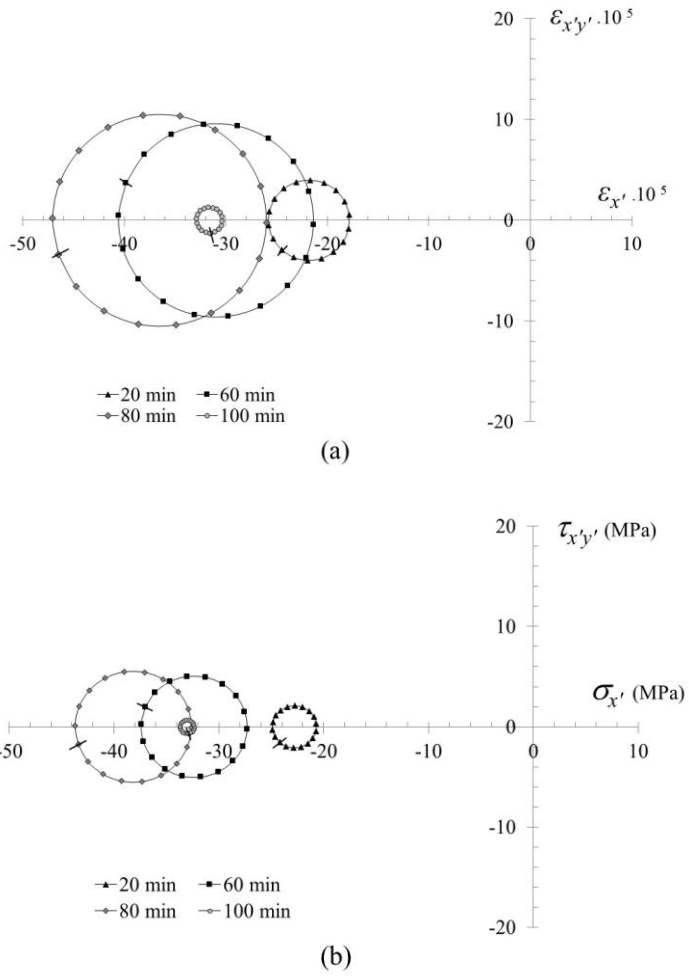


Figura 3: Círculos de Mohr inherentes a la (a) deformación y (b) tensión residual

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tomando en cuenta los resultados mostrados en dicha Figura 3 (b), en el intervalo de 20 a 80 minutos el proceso de relajación de la tensión residual se desarrolla aliviando componentes normales compresivas en todas las direcciones. El alivio de estas componentes es lineal en el tiempo. Además, en el mismo intervalo, el proceso de relajación también progresa aliviando componentes tangenciales en todas las direcciones. Por otra parte, la Figura 2 muestra que a partir de los 80 minutos hay un cambio de signo en las pendientes de las diferentes componentes normales evaluadas. Esto revela una modificación significativa en términos de la mecánica de relajación de la tensión residual. En efecto, la Figura 3 (b) muestra que a los 80 minutos el diámetro del círculo de tensiones es máximo, lo cual significa que las componentes tangenciales aliviadas son máximas [10]. Por el contrario, el diámetro del círculo más pequeño revela que las componentes tangenciales relajadas a los 100 minutos son extremadamente pequeñas. Es importante notar que la relación de los valores de la componente tangencial máxima para 80 y 100 minutos es de aproximadamente 8.

De la Figura 2 (a) se desprende que, de 80 a 100 minutos, pequeñas tensiones residuales se recuperan en la dirección x debido a que la relajación de la componente σ_x es máxima a los 80 minutos (el cambio de signo de la pendiente revelaría la recuperación de tensiones residuales). La misma figura muestra que la componente σ_y se relaja completamente a los 80 minutos, lo cual corrobora los resultados obtenidos por Fernández *et al.* [13] a partir de una aleación similar. Además, la componente principal menos compresiva σ_q también se relaja completamente a los 80 minutos (ver Figura 2 (b)). La Figura 4 muestra todas las direcciones relajadas completamente para dicho tiempo. Es importante destacar que la dirección y es perpendicular a la dirección de laminado, por lo tanto, en dicha dirección y la deformación plástica acumulada será mínima. A lo largo de todas las demás direcciones, la relajación no es completa a los 80 minutos y ya no será posible una relajación posterior. Por el contrario, en estas direcciones, pequeñas tensiones residuales compresivas también serán recuperadas. Este proceso de recuperación, que se produce espontáneamente después de los 80 minutos, reorganiza y nivela los valores de la tensión residual relajada en todas las direcciones, lo cual a su vez estaría impulsado por la tendencia del material a disminuir su propia energía de deformación total.

En el presente estudio, es posible explicar la mecánica de relajación a partir de dos fases claramente definidas. A partir de los 20 minutos, la relajación avanza en todas las direcciones, con componentes normales variando linealmente. Luego, la relajación se completa en algunas direcciones preferentes (ver Figura 4). Este hecho conduce al fin de la fase de relajación para todas las direcciones. Este proceso dura 80 minutos. A continuación, comienza la fase de recuperación. Esta segunda fase demanda 20 minutos. La Tabla 2 enumera las características principales de cada fase. Es importante señalar que en la segunda fase se recuperan pequeñas

ISBN: 978-987-1676-63-7

tensiones residuales en las direcciones que no se hallaban completamente relajadas a los 80 minutos, correspondiendo el valor máximo (-10.2 MPa) a la dirección principal más compresiva. Este resultado era esperado ya que, al evaluar el estado de tensiones relajadas a los 80 minutos, se comprueba que la dirección principal más compresiva es cercana a la dirección de laminado (eje x), en la que la deformación plástica acumulada introducida por dicho proceso es máxima. Cabe destacar que el mencionado vínculo entre dirección principal y dirección de laminado corrobora los resultados obtenidos en estudio previos, en los que las tensiones relajadas son evaluadas en muestras laminadas y maquinadas [8,14].

La recuperación de pequeñas tensiones residuales en diferentes direcciones cesa cuando los valores alcanzados se aproximan a los correspondientes a las direcciones cercanas al eje y mostradas en la Fig. 4. Por lo tanto, los valores alcanzados al final de la fase de recuperación serán similares en todas las direcciones (estado cuasi-isótropo). Finalmente, la amplitud de las tensiones normales correspondientes a estos valores, como muestra el círculo más pequeño de la Figura 3 (b), es -33 ± 0.7 MPa.

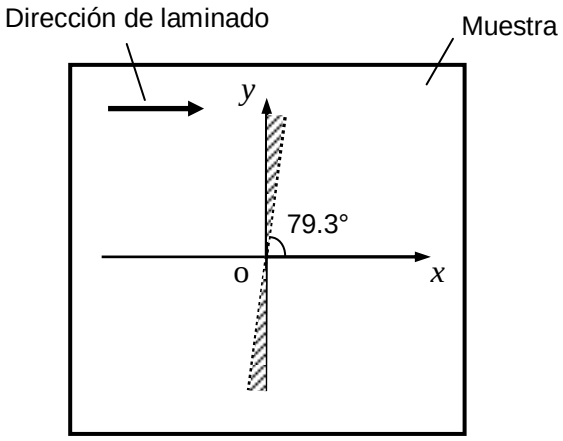


Figura 4: Direcciones completamente relajadas a los 80 minutos

Tabla 2. Principales características de las fases

	Fase de relajación	Fase de recuperación
Duración (min)	80	20
Componentes normales	linealmente decrecientes	constantes (eje y), crecientes (demás direcciones)
Direcciones principales	cercanas a la dirección de laminado	alejadas de la dirección de laminado

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSIONES

Un método de micro-indentas fue adaptado para determinar, con gran precisión, componentes normales y tangenciales de la tensión residual, las cuales fueron relajadas en muestras de aleación de aluminio sometidas a cargas térmicas. Implementando diferentes tratamientos isotérmicos, la mecánica de relajación de la tensión residual pudo ser estudiada para diferentes tiempos. Un uso novedoso de círculos de Mohr permitió evaluar la mecánica de relajación en todas las direcciones. La fase de relajación sólo pudo estar activa cuando el alivio fue posible en todas las direcciones. Las componentes normales fueron aliviadas siguiendo un patrón lineal en el tiempo. Los niveles máximos fueron detectados en direcciones muy cercanas a la dirección de laminado, donde la deformación plástica acumulada resulta máxima. La fase de relajación finalizó cuando el alivio se completó en algunas direcciones preferenciales cercanas al eje y, el cual es perpendicular a la dirección de laminado. Después de la fase de relajación, un proceso de recuperación se activó en el material a fin de nivelar los valores de las componentes normales relajadas en todas las direcciones. Finalmente, la dirección de laminado no resultó relevante durante esta última fase.

4. REFERENCIAS

[1] Suresh S., Giannakopoulos A.E. *A new method for estimating residual stresses by instrumented sharp indentation*. Acta Mater., 46, 5755-5767, 1998.

[2] Zhao M., Chen X., Yan J. et al. *Determination of uniaxial residual stress and mechanical properties by instrumented indentation*. Acta Mater., 54, 2823-2832, 2006.

[3] Dean J., Aldrich-Smith G., Clyne T.W. *Use of nanoindentation to measure residual stresses in surface layers*. Acta Mater., 59, 2749–2761, 2011.

[4] Wyatt J.E., Berry J.T. *A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes*. J. Mater. Proc. Tech., 171, 132-140, 2006.

[5] Wyatt J.E., Berry J.T. *Mapping of superficial residual stresses in machined components.* J. Ind. Tech., 25, 1-8, 2009.

[6] Díaz F.V., Bolmaro R.E., Guidobono A.P.M., Girini E.F. *Determination of residual stresses in high speed milled aluminium alloys using a method of indent pairs*. Exp. Mech., 50, 205-215, 2010.

[7] Díaz F.V., Mammana C.A. *Study of residual stresses in conventional and high-speed milling* (Chapter 4). In Filipovic L. A. (Ed.): *Milling: Operations, Applications and Industrial Effects*. Nova Science Publishers, Inc., New York, 127-155, 2012.

[8] Díaz F.V., Mammana C.A., Guidobono A.P.M. *Evaluation of residual stresses induced by high speed milling using an indentation method*. Mod. Mech. Eng., 2, 143-150, 2012.

[9] Gere J.M. *Mechanics of materials*, 5th ed. Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, 2001.

[10] De Bruin W. *Dimensional stability of materials for metrological and structural applications*. Annals of the CIRP, 31, 553-560, 1982.

[11] Seifi R., Salimi-Majd D. Effects *of plasticity on residual stresses measurement by hole drilling method*. Mech. Mater., 53, 72–79, 2012.

[12] Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of elasticity,* 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 1970.

[13] Fernández P., Fernández R., González-Doncel G., Bruno G. *Correlation between matrix residual stress and composite yield strength in PM 6061Al–15 vol% SiC_w*. Scr. Mater., 52, 793-797, 2005.

[14] Díaz F.V., Mammana C.A., Guidobono A.P.M. *Evaluation of residual stresses in low, medium and high speed milling.* Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., 11, 252–258, 2015.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer el apoyo financiero brindado tanto por la Universidad Tecnológica Nacional como por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPARAÇÃO DE DUREZA EM UMA JUNTA SOLDADA DE UM AÇO ASTM A 335-P91 REALIZADA NO METAL BASE, NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA E NA ZONA FUNDIDA.

Natal de Jesus Gaspar [1], José Carlos Morilla [2] Jan Vatavuk [3] Caio Cesar Rodrigues Antonio Gaspar [4]

1 Universidade Santa Cecília, Santos, São Paulo, Brasil, natal@unisanta.br

2 Universidade Santa Cecília, Santos, São Paulo, Brasil, morilla@unisanta.br

3 Universidade Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil, janvatavuk@uol.com.br

4 Eng. mecânico – mestrando em Engenharia Mecânica – caiocgaspar@uol.com.br

RESUMO

Uma das formas para avaliar a soldagem de uma peça ou equipamento foi bem executada é verificando se a dureza após o tratamento térmico de alivio de tensões (TTAT) encontra-se dentro dos limites estabelecidos pelo código de fabricação.

Neste trabalho é realizado um estudo de comparação entre as durezas encontradas no metal base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de solda (MS) de um corpo de prova soldado de aço ASTM A335-P91 com os processos de soldagem TIG e Arame tubular e que foi submetido ao do TTAT com os limites estabelecidos na norma ASME B31.3-2012.

Palavras Chaves: Soldagem, comparação de dureza, Aço liga.

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970 uma nova classe de aços ferríticos de 9Cr com uma estrutura martensítica estável e resistência à deformação começou a ser usada na fabricação de tubulações, Dentro desta classe o aço ASTM A 335 Gr P91 [1] foi desenvolvido nos Estados Unidos da América para aplicações nucleares, com base no aço para tubulações de P9, 9Cr-1Mo [2]

A soldagem do aço ASTM A 335 Gr P91 geralmente requer cuidados para a soldagem de peças, na qual devem ser mantidas as temperaturas de pré-aquecimento de no mínimo 200ºC, interpasse entre 175 e 230 ºC e pós-aquecimento de 300ºC também por um período mínimo de uma hora. [3]

Uma das formas para avaliar se a soldagem foi bem executada é verificando a dureza após o tratamento térmico de alivio de tensões (TTAT) e se a mesma se encontra dentro dos limites estabelecidos pelo código de fabricação.Neste estudo, estas durezas serão comparadas com os limites estabelecidos na norma ASME B31.3 - 2012. [3].

Segundo Martins (2014) [4] e Alberto (2016) [5], uma outra forma de tratamento de alivio de tensões é a técnica de alivio de tensões por vibrações sub-ressonantes (ATVS), em que e utilizada uma frequência de vibração abaixo da frequência de ressonância, promovendo dessa maneira o alivio de tensões de uma peça.

2. AÇO P91

Os aços ferríticos Cr-Mo são amplamente utilizados tanto na indústria de geração de energia (plantas termelétricas) quanto na indústria petroquímica (unidades de hidrocraqueamento, hidrotratamento e sistemas de recuperação de calor) e na indústria química por apresentarem praticamente a mesma resistência à ciclagem térmica a um custo inferior ao dos aços inoxidáveis autênticos [6]

Segundo HALD, VISWANATHAN, ABE, [7]. A partir da década de 1970 começou-se a usar uma nova classe de aços ferríticos de 9Cr com uma estrutura martensítica estável e resistência à deformação, o aço ASTM A 335 Gr P91[1] foi desenvolvido nos Estados Unidos da América para aplicações nucleares, com base no aço para tubulações de P9, 9Cr-1Mo.

Atualmente a utilização dos aços Cr-Mo convencionais ocorre em condições críticas de temperatura e pressão, para essa classe de material. [6].

O aço ASTM A 335 Gr P91, é um aço ligado ao Cr e Mo, com adições de V e Nb, com sua composição química estabelecida na norma ASTM A335 – 2015 [2], em destaque na tabela 1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 1 – Composição química de um aço Gr P91 [2].

GRAU	COMPOSIÇÃO %							
	C	Mn	P (max)	S (max)	Si	Cr	Mo	OUTROS
P1	0,10 - 0,20	0,30-0,80	0,025	0,025	0,10-0,50	...	0,44-0,65	...
P2	0,10 - 0,20	0,30-0,61	0,025	0,025	0,10-0,30	0,50-0,81	0,44-0,65	...
P5	0,15 max	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	4,00-6,00	0,45-0,65	...
P5B	0,15 max	0,30-0,60	0,025	0,025	1,00-2,00	4,00-6,00	0,45-0,65	...
P5C	0,12 max	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	4,00-6,00	0,45-0,65	...
P9	0,15 max	0,30-0,60	0,025	0,025	0,25-1,00	8,00-10,00	0,90-1,10	
P11	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50-1,00	1,00-1,50	0,44-0,65	
P12	0,05-0,15	0,30-0,61	0,025	0,025	0,50 max.	0,80-1,25	0,44-0,65	
P15	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	1,15-1,65	...	0,44-0,65	...
P21	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	2,65-3,35	0,80-1,06	...
P22	0,05-0,15	0,30-0,60	0,025	0,025	0,50 max.	1,90-2,60	0,87-1,13	...
P23	0,04-0,10	0,30-0,60	0,030 max.	0,010 max.	0,50 max.	1,90-2,60	0,05-0,30	V - 0,20-0,30
P91	0,08-0,12	0,30-0,60	0,020	0,010	0,20-0,50	8,00-9,50	0,85-1,05	V - 0,18-0,25 N - 0,030-0,070 Ni - 0,40 max. Cb - 0,06-0,10 Ti - 0,01 max. Zr 0,01 max.

Na tabela 1 pode se observar que no aço ASTM A335 Gr P91 a porcentagem de cromo esta compreendida entre 8 a 9,5%.

É obrigatória a realização do TTAT nesse material, independente da espessura (ASME B31.3 - 2012).

A temperatura de TTAT, conforme destacada na tabela 2, está compreendida na faixa de 732 a 774ºC devendo ser respeitada e bem monitorada observa-se nesta tabela o tempo mínimo para tratamento em função da espessura soldada. [3]

Na tabela 2 são encontrados os parâmetros de tratamento térmico de alívio de tensões (recozimento subcrítico) e dureza máxima permitida para os aços Gr P-91.

Tabela 2 – Parâmetros para execução de tratamento térmico de alivio de tensões e dureza máxima permitida [3]

METAL BASE	ANÁLISE DO METAL DE SOLDA A-Nº	GRUPO DO METAL BASE	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm)	TENSÃO MÍNIMA DE RESISTÊNCIA, METAL BASE (MPa)	FAIXA DE TEMPERATURA (°C)	ESPESSURA NOMINAL DA PAREDE (mm/min)	TEMPO MINIMO, h	DUREZA BRINEL (HB), MAX.
15E	5	Aços ligas 9Cr-1Mo-V	Todas	Todas	732-774	2,4	2	250

Observe-se que na tabela 2 está destacada a dureza máxima permitida para este tipo de aço que é 250 HB (253HV)HV. Este limite de dureza deve ser respeitado no metal base, no material de solda e na zona termicamente afetada.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizado um tubo de aço ASTM A335 Gr P91 preparado em duas partes, sendo que em cada extremidade da peça foi executado um bisel, segundo a definição na norma AWS A3.0 – 2010[8], com um ângulo de 45 graus, a serem unidas e posteriormente soldada. A figura 1(a), mostra a preparação da peça de teste e a figura 1(b), a representação gráfica da peça soldada.

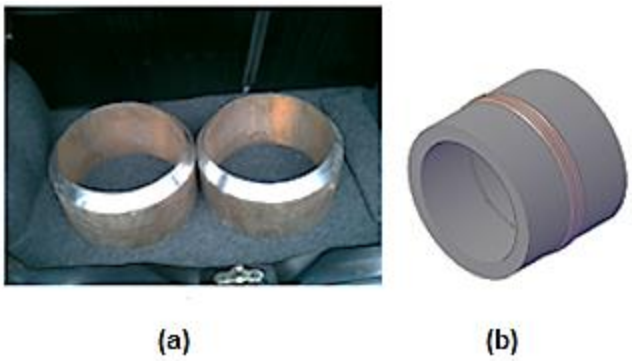


Figura 1 – Peça do aço ASTM A 335 Gr P91 preparada para soldagem.

Para a soldagem foram utilizados os processos TIG (gás tungsten arc welding - GTAW) e arame tubular (AT) (gás metal arc welding – GMAW), cujos parâmetros estão definidos na tabela 3.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem

PROCESSO SOLDAGEM	PASSE Nº	CAMADA Nº	CONSUMÍVEL CLASSE	DIÂMETRO (mm)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE (mm/min)	HEAT INPUT (J/mm)	TEMP. °C	LARGURA PASSE DE SOLDA (mm)	VAZÃO GÁS	TIPO GÁS	VAZÃO PURGA
TIG	1	1	ER 90S B9	3,25	9	94	86,7	585,48	250	7		99,99 % Ar	30l/min
TIG	2	2	ER 90S B9	3,25	11	182	455,49	263,72	275	8	15l/min		30l/min
GMAW	3	3	E 90C B9	1,2	25	210	500,29	629,64	280	9			-
GMAW	4	3	E 90C B9	1,2	25	212	492,22	646,06	295	8			-
GMAW	5	3	E 90C B9	1,2	25	210	504,42	624,48	298	7			-
GMAW	6	4	E 90C B9	1,2	27	255	500,29	825,73	289	8			-
GMAW	7	4	E 90C B9	1,2	27	260	496,22	848,82	275	9			-
GMAW	8	4	E 90C B9	1,2	27	260	504,42	835,02	285	8			-
GMAW	9	4	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	282	10			-
GMAW	10	4	E 90C B9	1,2	27	260	338,71	1.243,55	295	9			-
GMAW	11	5	E 90C B9	1,2	27	260	302,15	1.393,99	298	9			-
GMAW	12	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	301	9			-
GMAW	13	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	301	8			-
GMAW	14	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	312	10			-
GMAW	15	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	315	9			-
GMAW	16	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	320	8			-
GMAW	17	5	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	298	9			-
GMAW	18	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	299	9			-
GMAW	19	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	295	9			-
GMAW	20	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	315	8			-
GMAW	21	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	314	10			-
GMAW	22	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	321	9			-
GMAW	23	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	312	8			-
GMAW	24	6	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	319	10			-
GMAW	25	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	305	9			-
GMAW	26	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	304	9			-
GMAW	27	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	306	10			-
GMAW	28	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	305	9			-
GMAW	29	7	E 90C B9	1,2	27	260	303,66	1.387,09	311	9			-
GMAW	30	7	E 90C B9	1,2	27	94	303,09	502,43	315	7			-
GMAW	31	7	E 90C B9	1,2	27	182	302,52	974,61	320	8			-
GMAW	32	7	E 90C B9	1,2	27	280	301,96	1.502,17	321	9			-
GMAW	33	8	E 90C B9	1,2	27	280	301,41	1.504,93	310	8			-
GMAW	34	8	E 90C B9	1,2	27	280	300,86	1.507,67	305	10			-
GMAW	35	8	E 90C B9	1,2	27	280	300,32	1.510,40	298	9			-
GMAW	36	8	E 90C B9	1,2	27	280	299,78	1.513,10	315	11			-
GMAW	37	8	E 90C B9	1,2	27	280	299,25	1.515,80	312	10			-
GMAW	38	8	E 90C B9	1,2	27	280	298,72	1.518,47	315	9			-
GMAW	39	8	E 90C B9	1,2	27	280	298,2	1.521,13	320	9			-
GMAW	40	8	E 90C B9	1,2	27	280	297,68	1.523,78	301	8			-
GMAW	41	8	E 90C B9	1,2	27	280	297,17	1.526,41	295	7			-
GMAW	42	9	E 90C B9	1,2	26	210	296,66	1.104,29	298	7			-
GMAW	43	9	E 90C B9	1,2	26	215	296,16	1.132,50	295	7			-
GMAW	44	9	E 90C B9	1,2	26	212	295,66	1.118,58	310	8			-
GMAW	45	9	E 90C B9	1,2	26	210	295,17	1.109,89	305	8			-
GMAW	46	9	E 90C B9	1,2	26	218	294,68	1.154,08	315	9			-
GMAW	47	9	E 90C B9	1,2	26	215	294,19	1.140,07	320	7			-
GMAW	48	9	E 90C B9	1,2	26	210	293,71	1.115,38	291	8			-
GMAW	49	9	E 90C B9	1,2	26	210	293,23	1.117,19	295	9			-
GMAW	50	9	E 90C B9	1,2	26	215	292,76	1.145,64	301	8			-
GMAW	51	9	E 90C B9	1,2	26	218	292,3	1.163,48	315	7			-

20 l/min Ar + CO2

Após a conclusão dessa etapa, da peça de teste foi retirada um setor circular de tubo para a realização do ensaio de dureza Vickers conforme mostra a figura 2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

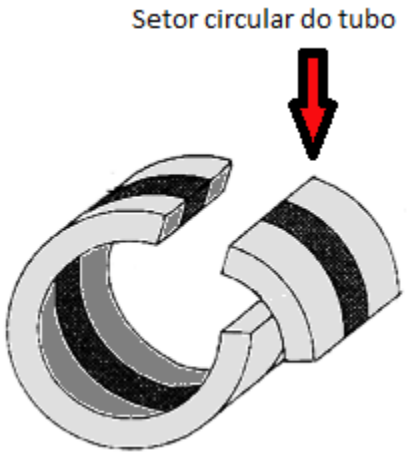


Figura 2 – Setor circular do tubo – Tubo ASTM A 335 Gr P91.

A tabela 4 apresenta a composição química do aço ASTM A335 Gr P91, extraída da norma ASTM A335 – 2015 e a composição química dos consumíveis utilizados em todo o processo de soldagem, [2].

Tabela 4 – Composição química do metal de base e consumível de soldagem.

MATERIAL	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Nb	Mo	OUTROS
A335 Gr P91	0,08	0,3	0,002.	0,01.	0,20 0,50.	8,0 9,5	-	-	0,85	V-0,18 0,25
E9015-B9	0,10.	1,0.	-	-	0,25	9,0.	0,80.	0,08	1,0.	V-0,25
Arame Tubular (E90C-B9)	0,10 0,13	0,60 1,20.	0,020.	0,015.	0,50.	8,0 10,0.	0,07.	0,07	0,85 1,20.	V-0,18 0,25
TIG (ER90S-B9)	0,10.	0,50.	-	-	0,30	9,0	0,70.	0,06.	1,0.	V-0,20.

Gás – Star Plus – White Martins.

A sequência de soldagem foi executada conforme pode ser visualizada na figura 3.

Cada cordão possui uma dimensão de 8,5± 1,5mm. Foram feitos 51 cordões distribuídos em 9 camadas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

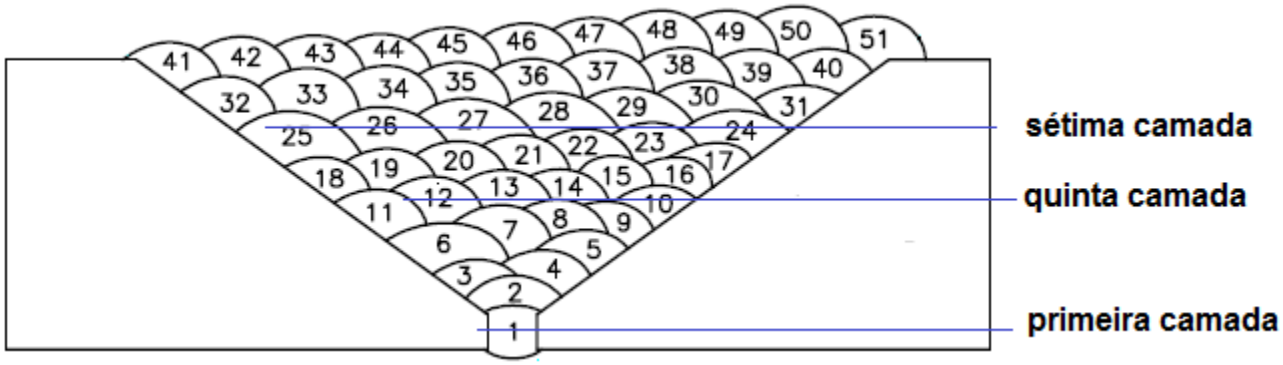


Figura 1 - Sequência da soldagem e distribuição das camadas de solda.

A velocidade de deposição dos cordões variou em função da camada executada. Para os cordões pertencentes entre a camada 1 e a camada 4 a velocidade ficou em torno de 500 mm/min.

Para os cordões das demais camadas, próximo a 300 mm/min.

Esta variação de velocidade é em função do processo. Com este modo de operação a temperatura do MB próxima à região da solda, ficou em torno de 300°C. Para o controle de temperatura do pós-aquecimento, foi utilizado lápis térmico. Esta medição de temperatura foi efetuada pelo mesmo lado de aplicação de calor na região soldada. Concluído o pós-aquecimento, a junta foi recoberta com manta refratária até o resfriamento à temperatura ambiente.

A figura 4(a) mostra três corpos de prova obtidos e a figura 4 (b) é uma representação gráfica de um corpo de prova onde são destacados o MB, o MS e a ZTA.

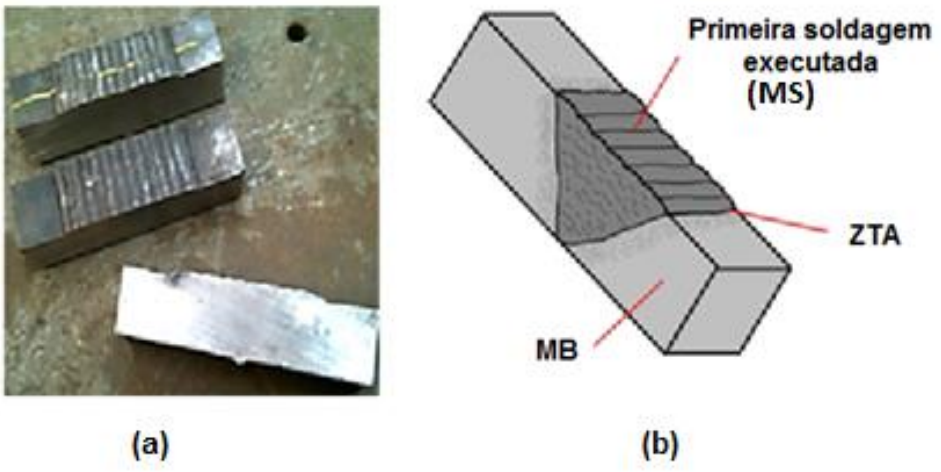


Figura 4 – Sentido da soldagem dos passes de revenimento.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. CONCLUSÃO

A dureza média do MB foi de 233HV, da ZTA 220HV e do MS 239HV, todas abaixo de 253HV que é o limite máximo estabelecido na norma ASME B31.3 – 2012[3].

Em todo o corpo de prova o ponto de maior dureza ocorreu no metal de solda. No corpo de prova da solda original o ponto de maior dureza foi o ponto 46, como pode ser verificado na tabela 5 com 258HV.

Em todo o corpo de prova a maior média de dureza ocorreu no metal de solda. Neste corpo de prova da solda original ela foi de 244HV.

Conclui-se, portanto, que não existiu variação relevante da dureza na região da solda, na ZTA e no MB.

Lembra-se que para o atendimento aos padrões de dureza estabelecidos pela norma ASME B31.3 – 2012, em função do encontrado neste trabalho, deve ser necessário algum tipo de tratamento.

4. REFERENCIAS

[1] HALD, J.; VISWANATHAN, V. and ABE, F. - Energy Materials, Creep Resistant 9-12% Cr Steels – Long-Term Testing, Microstructure Stability and Development Potentials, Elsam/Energy E2/IPL-MPT TU Denmark, 2006.

[2] ASTM A335; Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High Temperature Service. 2015.

[3] ASME B31.3 (Process Piping), Edition - 2012.

[4] MARTINS, Carlos Augusto Pereira – Alivio de tensões por vibrações sub-ressonantes: Analise e parametrização – UNISANTA, 2014, 121p- - Dissertação (mestrado) – Universidade Santa Cecilia – São Paulo,2014.

[5] ALBERTO, Aldo João - Comparação das tensões residuais em soldas de reparo no aço ASTM A335 Gr P91 submetidas aos tratamentos de alívio de tensões por tratamento térmico e por vibração sub-ressonante - UNISANTA, 2016, 89p- - Dissertação (mestrado) – Universidade Santa Cecilia – São Paulo.2016.

[6] CUNHA, B. R. M. da. - Soldabilidade da nova geração de aços ferríticos Cr-W resistentes a altas temperaturas. UFRJ, 2006, 123 p. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro – RJ, 2006.

[7] HALD, J; VISWANATHAN, V. and ABE, F. - Energy Materials, Creep Resistant 9-12% Cr Steels – Long-Term Testing, Microstructure Stability and Development Potentials, Elsam/Energy E2/IPL-MPT TU Denmark, 2006.

[8] AWS A3.0 – Standard Welding Terms and Definitions – Edition 2011.

Agradecimientos

Os autores agradecen a empresa INSPEBRAS, (Engº Heretiano Dalmacio Sampaio Junior e o Inspetor de Soldagem – Rodrigo Sampaio) pelo apoio no fornecimento de mão de obra e local para a execução da soldagem das peças de teste.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDIO DE FALLAS EN ACEROS DE CALDERAS DE VAPOR

Miguel Ángel Zago

Departamento de Mecánica – Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda
Av. Ramón Franco 5050 (1870), Villa Dominico, Avellaneda, Buenos Aires, Argentina
mecanica@fra.utn.edu.ar; mzago@itba.edu.ar; mzago@austral.edu.ar

RESUMEN

Las calderas de vapor de agua son instalaciones estudiadas por la Ingeniería; las soluciones aportadas para las aleaciones constituyentes, particularmente aceros de baja, media y alta aleación, han sido satisfactorias durante décadas.

La vida útil de estas calderas es de 30 años. Luego, su utilidad se extiende por lapsos análogos mediante el cambio de tubos y soportes estructurales, en particular aquellos utilizados para sobrecalentadores y recalentadores de vapor.

Los tubos y sus soportes son solicitados por valores extremos de tensión y temperatura. Las tensiones surgen de la componente tangencial debida a la presión interna de los tubos y de las cargas provocadas por su propio peso, mientras que los soportes de suspensión reciben solicitaciones de tracción y corte [1]. Los estados de tensión en un ámbito de elevadas temperaturas propician el fenómeno de fluencia lenta (*creep,* del inglés coloquial), falla de largo plazo que concluye con fracturas no pocas veces catastróficas [2]. Pese al mantenimiento preventivo de las calderas y las técnicas aplicadas de ensayos no destructivos utilizados para estudiar el daño provocado por fluencia lenta, los deterioros del fenómeno persisten; tal es su importancia que se crean instituciones dedicadas a su estudio [3].

Durante varios años se estudiaron tubos y soportes; se evaluó la vida útil residual mediante técnicas paramétricas y recomendaciones y se analizaron fallas en componentes cuyos períodos de actividad superaron esa vida útil y otros con fracturas prematuras. Se detectaron diversos tipos de fallas, algunos avanzados como oquedades de fluencia lenta y globulización y coalescencia de la cementita, mientras que otros como descarburación superficial y crecimiento granular son, en general, premonitorios de la fluencia lenta. En este trabajo se exhibe nuestra experiencia durante la evaluación del comportamiento de diversos aceros y su tendencia a la fractura vinculada con la globulización de carburos y su coalescencia en bordes de granos.

Palabras Claves: *globulización de carburos, coalescencia de carburos, fluencia lenta, perlita, oquedades.*

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales expuestos a elevadas temperaturas sufren deterioros a corto, mediano y largo plazo. La corrosión de los aceros a alta temperatura ó corrosión seca y la fatiga térmica de bajo ciclado son procesos típicos que pueden suceder bajo esas condiciones. Cuando actúan simultáneamente esfuerzos mecánicos, la situación se agrava por las condiciones que impone la fluencia lenta. Pero también es frecuente que los procesos anteriores interactúen perjudicando aún más el deterioro.

A altas temperaturas, el fenómeno bastante habitual de termo fluencia afecta los bordes de los granos de los metales y las aleaciones. Cuando están solicitados por tensiones ó componentes de tracción y temperaturas de servicio T_s del siguiente orden:

$$T_s \geq 0{,}4T_m, \tag{1}$$

donde T_m es la temperatura del punto de fusión expresada en °K, se generan mecanismos de desplazamientos atómicos individuales y grupales en planos [4] que propician discontinuidades en los bordes de granos.

En estas situaciones de servicio, la temperatura admisible, el tiempo probable de ruptura desde que el elemento nuevo se pone en servicio y la tensión aplicada se obtienen a través de diversas formas paramétricas de las cuales, la más difundida es el Parámetro de Larson-Miller P_{LM} [4-6]:

$$P_{LM} = T\left(C - \log t_r\right) \tag{2}$$

donde T es la temperatura absoluta en °K, t_r el tiempo de ruptura en horas y C una constante intrínseca del material que varía entre 15 y 30 para aceros y otras aleaciones no ferrosas.

Las formas paramétricas se traducen en documentos [7-9] que permiten obtener, de manera sencilla, los valores admisibles para que no se produzcan condiciones de fluencia lenta.

Además de la temperatura, el tiempo de exposición a ella y la tensión aplicada, en el fenómeno de fluencia lenta actúa la deformación permanente ó plástica aun cuando los esfuerzos no alcanzan valores superiores al límite elástico para la temperatura de servicio. La relación entre estas cuatro variables se vuelca a la gráfica deformación vs. tiempo de exposición de la Figura 1. La Etapa 2 de las curvas responde a una recta de proporcionalidad que define la velocidad de fluencia lenta V_{FL}:

$$V_{FL} = \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{3}$$

donde ε es la deformación específica y t el tiempo de exposición. Durante esta Etapa se produce el desplazamiento de planos atómicos dislocados; su transición hacia la Etapa 3, que conduce finalmente a la fractura, provoca en aceros al carbono y de baja, media y media-alta aleación fenómenos de globulización del carburo de hierro (Fe_3C, cementita) y de otros carburos de

ISBN: 978-987-1676-63-7

elementos de aleación. Los carburos globulizados precipitan en el interior de los granos y, por un mecanismo difusivo, en el borde de los mismos. Luego, en la medida que la temperatura y el tiempo sean propicios y el contenido de carbono se eleve [2], coalescen en idénticos lugares.

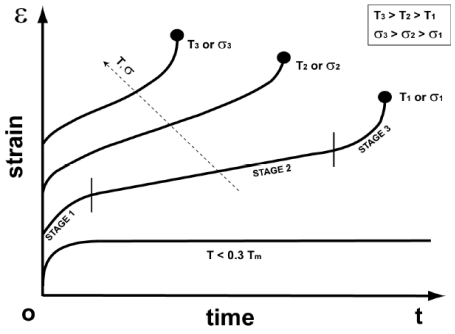


Figura 1: Diagrama deformación-tiempo y curvas de respuesta según el incremento de la temperatura y la tensión.

En el presente trabajo se describen los hallazgos obtenidos durante varios años estudiando estructuras de aceros de tubos y soportes de hogares de calderas de vapor. Se observó que los carburos coalescidos en los bordes de granos, como la cementita Fe_3C y los carburos de elementos de aleación, generan discontinuidades independientes del mecanismo de formación de subgranos por movimientos difusivos, típica actividad de la fluencia lenta.

2. DESARROLLO

Se analizaron fallas recurrentes en tubos de acero de caldera y en soportes de acero para suspensión de esos tubos. Las aleaciones analizadas se describen en la Tabla 1.

Los tubos y soportes sufrieron solicitaciones de tracción ó de componentes de tracción a temperaturas del orden de 450°C a 600°C superándose, en algunas ocasiones, ese rango. Además, los tubos fueron sometidos a presiones internas de servicio entre 40 bar y 155 bar por el tránsito de vapor de agua saturado y sobrecalentado según su aplicación.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Composición química de los aceros analizados

Elemento	Porcentajes en peso						
	Tubos, ASTM			Soportes, ASTM			
	A210 grado A1	A213 grado T11	A213 grado T22	A29 grado 4140	A276 tipo 302	A387 grado 2	A681 tipo H13
Carbono (C)	máx. 0,27	0,05 a 0,15	0,05 a 0,15	0,38 a 0,43	máx. 0,15	0,04 a 0,21	0,32 a 0,45
Manganeso (Mn)	máx. 0,93	0,30 a 0,60	0,30 a 0,60	0,75 a 1	máx. 2	0,50 a 0,80	0,20 a 0,60
Silicio (Si)	mín. 0,10	0,50 a 1	0,50 a 1	0,15 a 0,35	máx. 1	0,13 a 0,40	0,80 a 1,25
Fósforo (P)	máx. 0,035	máx. 0,025	máx. 0,025	máx. 0,035	máx. 0,045	máx. 0,035	máx. 0,030
Azufre (S)	máx. 0,035	máx. 0,025	máx. 0,025	máx. 0,040	máx. 0,030	máx. 0,035	máx. 0,030
Cromo (Cr)	---	1 a 1,50	1,90 a 2,60	0,80 a 1,10	17 a 19	0,46 a 0,85	4,75 a 5,50
Molibdeno (Mo)	---	0,44 a 0,65	0,87 a 1,13	0,15 a 0,25	---	0,40 a 0,65	1,10 a 1,75
Níquel (Ni)	---	---	---	---	8 a 10	---	---
Vanadio (V)	---	---	---	---	---	---	0,80 a 1,20
Nitrógeno (N)	---	---	---	---	máx. 0,10	---	---

El proceso de deterioro sigue un patrón similar en las aleaciones estudiadas a pesar de las diferentes composiciones químicas. En los aceros A210-A1; A213-T11/T22; A29-4140 y A387-2 con perlita laminar ese proceso comienza con la globulización de la cementita y la precipitación y coalescencia del carburo de hierro en los bordes de granos (Figura 2). En el entorno de la temperatura crítica inferior de la aleación ferrosa ocurre un fenómeno adicional: la grafitización de la cementita (Figura 3). En los aceros A276-302 (acero inoxidable austenítico) y A681-H13 (acero de herramientas para trabajo en caliente) el mecanismo es similar aunque los carburos son diversos, de cromo ($Cr_{23}C_6$) en el primero y complejo M_7C_3 en el H13 [10].

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 2: Microfotografía de un acero ASTM A213 T11 con cementita globulizada en borde de grano y coalescida en su interior (ataque Nital 5; X1181).

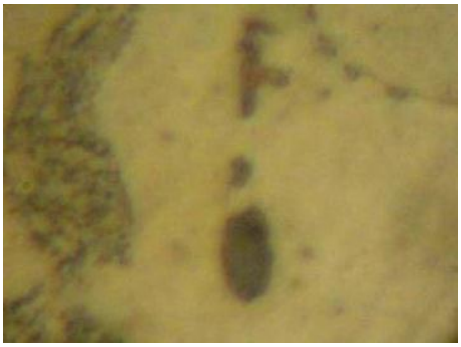


Figura 3: Microfotografía de un acero ASTM A213 T22 con cementita grafitizada (grafito secundario, abajo) y globulizada (arriba) (ataque Nital 5; X1181).

En un grupo de tubos de aceros A213 T11 y A213 T22 para sobrecalentadores de vapor se observó la presencia de grietas y fracturas vinculadas con la formación de oquedades en el entorno de los carburos precipitados y coalescidos en los bordes de granos (Figuras 4 a 9).

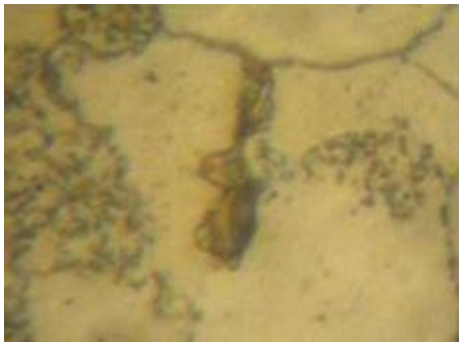


Figura 4: Microfotografía de un acero ASTM A213 T11, hueco en borde de grano y cementita globulizada (ataque Nital 5; X1181)

ISBN: 978-987-1676-63-7

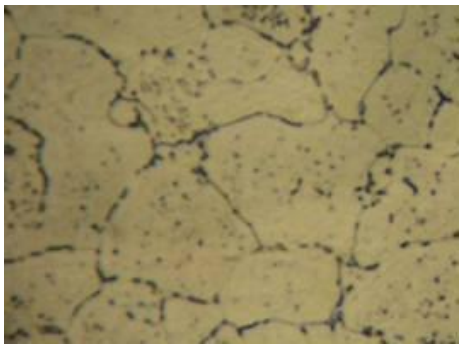


Figura 5: Microfotografía de un acero ASTM A213 T11, globulización de la cementita y micro grietas en bordes de granos (ataque Nital 5; X470)

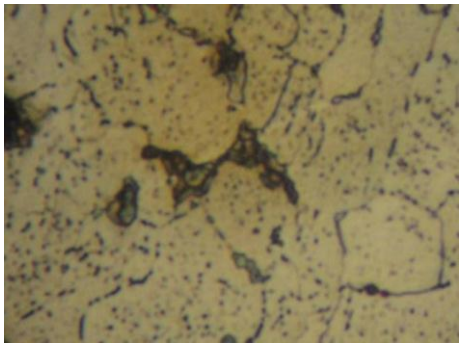


Figura 6: Microfotografía de un acero ASTM A213 T11, globulización de la cementita y huecos en bordes de granos (ataque Nital 5; X470).

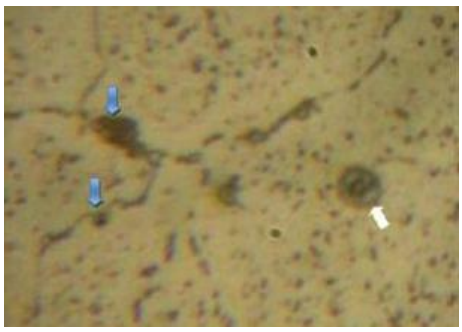


Figura 7: Microfotografía de un acero ASTM A213 T11, huecos (flechas azules) y grafitización de la cementita (flecha blanca) (ataque Nital 5; X700)

ISBN: 978-987-1676-63-7

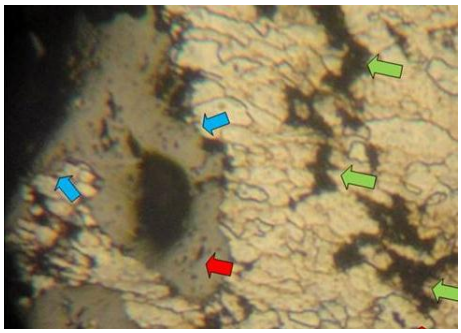


Figura 8: Microfotografía de un acero ASTM A213 T11 mostrando la superficie de fractura intergranular (flechas azules), presencia de óxidos (flecha roja) y grietas intergranulares de fluencia lenta (flechas verdes) (ataque Nital 5; X118).

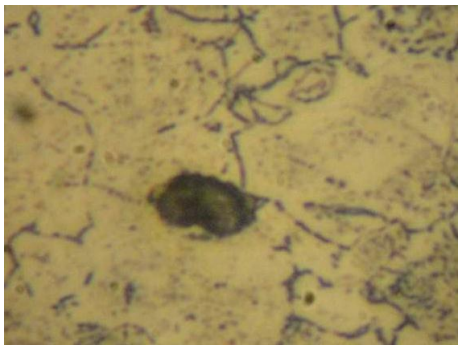


Figura 9: Microfotografía de un acero ASTM A213 T22, oquedad de fluencia lenta en la intersección de cuatro granos y carburos en su entorno (ataque Nital 5; X470).

En tubos de acero A210 A1 aplicados a economizadores de ciclos combinados de generación se detectó la presencia de grietas y huecos orientados en planos coincidentes con las componentes tangenciales [4, 11] derivadas de la tensión principal de tracción que impone la presión interior en los tubos. Las Figuras 10 a 12 muestran las observaciones microscópicas obtenidas de esos tubos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

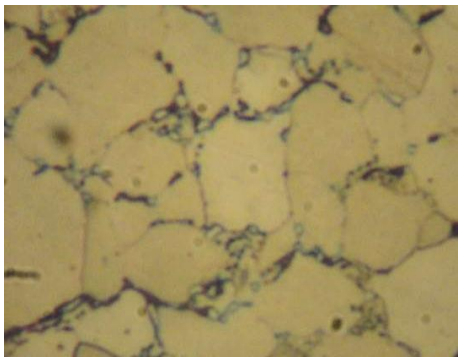


Figura 10: Microfotografía de un acero ASTM A210 A1; grietas de fluencia lenta a partir de la globulización y coalescencia de la cementita en bordes de granos (ataque Nital 5; X470).

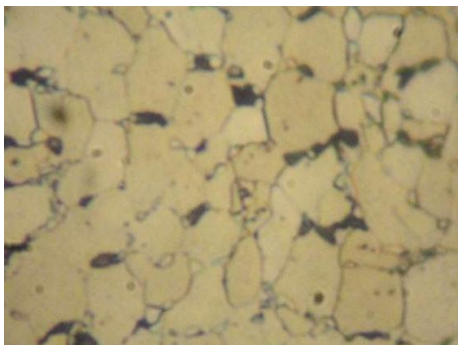


Figura 11: Microfotografía de un acero ASTM A210 A1; oquedades de fluencia lenta y formación de subgranos en la intersección de tres ó más granos (ataque Nital 5; X470).

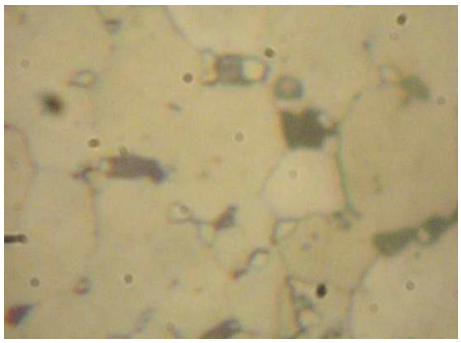


Figura 12: Microfotografía de un acero ASTM A210 A1; oquedades de fluencia lenta y formación de subgranos en la intersección de tres ó más granos (ataque Nital 5; X700).

Los pernos y las placas utilizadas para la suspensión de las serpentinas de recalentadores y sobrecalentadores de vapor también presentan idéntica fisonomía microscópica. En la Figura 13 correspondiente a un perno de suspensión elaborado con acero de herramientas se aprecian huecos en la intersección de granos [12] luego de una exposición discontinua de 25 meses a una

ISBN: 978-987-1676-63-7

temperatura de 520°C. Mientras, en la Figura 14, se puede observar un fenómeno análogo en una placa de suspensión de acero inoxidable austenítico.

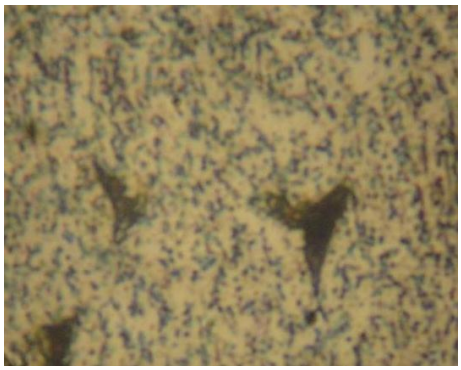


Figura 13: Microfotografía de un acero ASTM A 681 H13; oquedades de fluencia lenta y carburos globulizados (ataque Nital 5; X470).

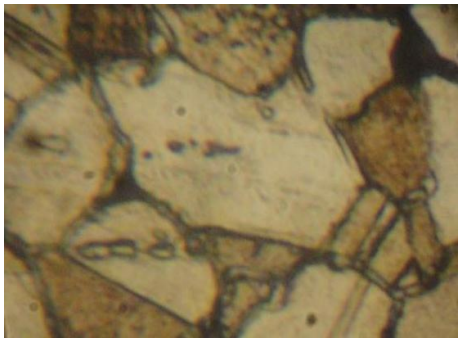


Figura 14: Microfotografía de un acero ASTM A 276 tipo 302; oquedades de fluencia lenta en la intersección de tres granos con presencia de carburos en esos sitios (ataque agua regia acética; X470).

3. DISCUSIÓN

Se abordaron aleaciones típicamente utilizadas para trabajos en altas temperaturas, se estudiaron los diversos tipos de carburos que se forman en esos aceros y se obtuvieron evidencias objetivas del deterioro que la fluencia lenta provoca como consecuencia de la precipitación de esos carburos.

La posibilidad y la amplitud que brinda la fluencia lenta como fuente de múltiples factores de fallas se puso de manifiesto en el reducido espectro de materiales analizados.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSIONES

Además de otros procesos de fallas provocados por la exposición prolongada a altas temperaturas (enunciados en el parágrafo 1.INTRODUCCIÓN), la precipitación de carburos en los bordes de los granos es una circunstancia que debe considerarse no solo como preámbulo de la fluencia lenta sino como el comienzo mismo de dicha causa de fractura. El presente trabajo, a través de los casos analizados, permite asegurar que el síntoma común presentado de precipitación de carburos globulares coalescidos en bordes de granos y grietas y oquedades asociadas, es una prueba suficiente de que este mecanismo se anticipa a otros procesos más avanzados en el tiempo de la termo fluencia vinculados con el movimiento de planos atómicos, con la formación de subgranos y con la aparición de grietas en esos sitios.

5. REFERENCIAS

[1] Zheng-Fei Hu, Chapter 10; Thermal Power Plants (edited by Dr. Mohammad Rasul), *Heat-Resistant Steels, Microstructure Evolution and Life Assessment in Power Plants*, Suecia, pp. 195 – 226; InTech Europe, Rijeka, Croatia, 2012.

[2] Davis J. R. editor, ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Material, ASM International, Material Park, Ohio, USA, 2002.

[3] ECCC European Creep Collaborative Committee, *European Collaboration in Development of Creep Data for High Temperature Plant,* UK, News Letter, april 2004.

[4] Dieter, George E.. *Mechanical Metallurgy*. Mc Graw-Hill Book Company, UK, 1988.

[5] Hosford, William F.. *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press, UK/USA, 2005.

[6] Hertzberg, R. W.. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. John Wiley and Sons, USA,1996.

[7] NBN EN 10269 norm, Staalsoorten en Nikkellegeringen voor Bevestigingsartikelen die bij Verhoogde en/of Lage Temperaturen Worden Gebruikt, Geregistreerde Belgische Norm, 1999.

[8] ISO Technical Report 7468, Summary of Average Stress Rupture Properties of Wrought Steels for Boilers and pressure Vessels, International Organization for Standardization, 1981.

[9] API, American Petroleum Institute. *Recommended Practice 571, Section 4.0, General Damage Mechanisms*. 2010.

[10] Krauss, G.. *Steels Processing, Structure, and Performance*. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2005.

[11] Berns, H., Broeckmann C. and Hinz H. F., *Creep of High Speed Steels, part 1, Experimental Investigations*, 6th International Tooling Conference, Karlstad University, Sweden, 2002.

[12] Rinaldi A. et al. *Creep Damage in Steels: A Critical Perspective.* Advances in Materials Science Research Volume 1, pp. 57-93, 2011.

Agradecimientos

El autor de este trabajo desea agradecer a MDP por su comprensión y al cuerpo docente del Laboratorio de Metalografía y Tratamientos Térmicos de la UTN, Fac. Reg. Avellaneda por el apoyo brindado.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS NA ESTRUTURA E MICRODUREZA DO Ti (TITÂNIO) GRAU 4

José Claudio Lopes[1], Fábio Bossoi Vicente[2], Luciano Monteiro da Silva[3] e Flávia Queiroz Costa[4]

[1-2-4] Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade Paulista - UNIP
Rua Luiz Levorato S/N, Bauru – SP, Brasil
[3] Faculdade de Engenharia – Faculdades Integradas de Ourinhos - FIO
Rodovia BR-153, Km 338 S/N, Ourinhos – SP, Brasil

RESUMO

Os recentes avanços científicos permitiram um aumento significativo na qualidade de vida e por consequência, na longevidade. Como consequência disso, a população de idosos aumentou consideravelmente e com isso, doenças relacionadas à idade, como osteoporose. Este fato, aliado aos acidentes de trânsito, por exemplo, fazem com que o governo invista consideráveis quantias na produção e no implante de próteses ortopédicas. As ligas mais utilizadas na manufatura de próteses são divididas em três grupos: aços inoxidáveis, ligas a base de Cr-Co (Cromo-Cobalto) e ligas a base de Ti (Titânio). Dentre estes três grupos, os biomateriais com melhor resposta clínica são aqueles a base de Ti, pois apresentam excelente biocompatibilidade, boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão.

Neste trabalho é analisado os efeitos de tratamentos térmicos convencionais na densidade, microestrutura e microdureza do Ti-CP Grau 4, compreendendo a metalurgia física por trás das transformações de fase no estado sólido do titânio.

O titânio Ti-cp Grau 4, apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta, estrutura essa que compõe o material até cerca de 883°C, fase α (alfa), quando o respectivo material é aquecido acima dessa fase, acontece uma transição onde há uma mudança da estrutura cristalina, passando assim para cúbica de corpo centrado, fase β (beta). Essa mudança de estrutura muda significativamente as propriedades mecânicas do material.

O estudo comportou-se de forma a explorar os benefícios gerados por conta de cada tratamento térmico, as devidas modificações em suas estruturas e o quão isso poderia beneficiar ou não no emprego da mesma em campo, sendo assim, devido aos tratamentos, determinado material tende a resistir de maneira mais eficaz a esforços como tração, compressão e fadiga, por exemplo, estabelecendo uma maior relação no quesito versatilidade, custo e segurança.

Palabras Chaves: *Titânio, Tratamentos Térmicos, Microscopia Óptica, Microdureza Vickers.*

1. INTRODUÇÃO

Embora se saiba desde meados do século passado sobre as propriedades biocompatíveis do titânio, sua maior utilização ocorre na indústria aeronáutica e aeroespacial, em dispositivos nucleares, computadores, na indústria automobilística, na engenharia civil, na indústria petroleira e na indústria naval [1], [2], [3] e [4]. O titânio reúne ao mesmo tempo excelentes propriedades mecânicas e elevada razão resistência mecânica/ densidade [2], [5] e [6].

Tabela 1 – Características do Titânio [6]

Nome do Elemento	Titânio
Símbolo	Ti
Número Atômico	22
Peso Atômico (u.m.a.)	47,88
Densidade do Sólido (g/cm3)	α: 4,51 a 20 °C β: 4,35 a 885 °C
Estrutura Cristalina	HCP, para T < 882 °C CCC, para T > 882 °C
Raio Atômico (nm)	0,145
Raio Iônico (nm)	0,068
Valência mais comum	+4
Ponto de Fusão	1670 ± 5 °C

A partir da década de 1960, passou a ser empregado na indústria química, devido a sua excelente resistência à corrosão [5]. Esta resistência é causada por uma camada de óxido de titânio, que se forma espontaneamente na superfície do titânio ao entrar em contato com a atmosfera. Outras aplicações do titânio e suas ligas são as aplicações estruturais em ambientes salinos [7]. Cabe destacar que somente 10% da produção total de titânio se destinam à obtenção do material na forma metálica. Os outros 90% se destinam à fabricação de dióxido de titânio, o qual é usado como proteção antioxidante. Dentre os 10%, metade é utilizada para a produção de ligas biocompatíveis [8].

O titânio puro apresenta dimorfismo, isto é, sofre uma transformação alotrópica à temperatura de 882,5 ºC (em condições normais de pressão), quando a fase α, estável à temperatura ambiente transforma-se em fase β que permanece estável até a temperatura de fusão do material em 1670 °C. Tal transformação alotrópica está associada à mudança da estrutura cristalina hexagonal compacta (fase α) para a cúbica de corpo centrado (fase β) [8].

ISBN: 978-987-1676-63-7

O titânio possui propriedades mecânicas interessantes no quesito de tração, resistência à penetração (dureza), alto ponto de fusão (1668 °C) e uma densidade baixa (4,507 g/cm^3) em comparação ao aço (aproximadamente 7,8 g/cm^3), é muito utilizado nesse setor industrial quando há a necessidade de alto desempenho e grandes resistências a empecilhos oriundos de quaisquer forças que possam inviabilizar o projeto [6] e [8].

De forma amplamente utilizada na indústria referente a próteses ortopédicas, o titânio e suas ligas são materiais essenciais para adequação de implantes no corpo de pacientes, uma vez que estudos revelam que o alumínio e suas ligas quando implantadas podem causar distúrbios neurológicos em longo prazo, levando até mesmo a discussões sobre possíveis causas de Alzheimer [9].

2. OBJETIVO

Comprovar a finalidade dos processos de tratamentos térmicos no âmbito do emprego do mesmo na análise comportamental do Titânio Grau 4, estudando os efeitos de tratamentos térmicos convencionais na densidade, microestrutura e microdureza do Titânio Grau 4, compreendendo a metalurgia física por trás das transformações de fase no estado sólido do material.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Transformações alotrópicas do Titânio

O Titânio é um Metal de transição que possui uma transformação alotrópica em torno de 883 °C. Abaixo desta temperatura sua estrutura cristalina é da forma hexagonal compacta, sendo denominada fase α. A fase β possui uma estrutura cúbica de corpo centrado (Figura 1), sendo formada em temperaturas acima de 883 °C e permanecendo estável até a fusão do metal. Como o titânio apresenta a camada de valência incompleta, o elemento pode formar soluções sólidas com uma variedade de elementos de liga, desde que possuam uma diferença de tamanho de até 20%. Os elementos de liga do titânio são classificados de acordo com a modificação que produzem na temperatura de transformação alotrópica [1], [10] e [11].

Os elementos que aumentam a temperatura de transformação alotrópica são denominados de α-estabilizadores. Pertencem a este grupo os elementos: Alumínio, Gálio e Germano, além dos intersticiais: Carbono, Oxigênio e Nitrogênio. Os β-estabilizadores são elementos que diminuem a temperatura de transformação alotrópica do titânio, eles podem ser divididos em β-isomorfos ou β-eutetóides de acordo com a formação ou não de um composto intermetálico [11].

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 1- Representação da cela unitária hexagonal compacta e cubica de corpo centrado respectivamente

3.2. Densidade

As medidas de densidade forma efetuadas com base no Princípio de Arquimedes, que afirma que todo corpo sólido imerso parcial ou totalmente em um fluido recebe esta uma força denominada empuxo, cujo módulo é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo [12]. Desta forma pode-se calcular a densidade através da seguinte equação:

$$\rho_{amostra} = \frac{m}{(m - m_{liq})} \rho_{liq} \qquad (1)$$

onde: $\rho_{amostra}$ é a densidade do corpo, m é a massa do corpo, m_{liq} é a massa do corpo submerso em água, e ρ_{liq} é a densidade da água.

3.3. Microdureza Vickers

O teste de dureza Vickers consiste em endentar o material em teste com um endentador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136° entre as faces opostas, utilizando uma carga de 1 a 100 kgf [13]. A carga plena é aplicada normalmente durante um tempo de 10 a 15 segundos. As duas diagonais da endentação deixadas na superfície do material depois da remoção da carga são medidas usando-se um microscópio. Com os valores lidos calcula-se a média aritmética e posteriormente calcula-se a área da superfície inclinada da endentação.

A dureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da endentação. Desta forma, denomina-se a dureza Vickers através da seguinte equação [13]:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$HV = \frac{2Fsen(136°/2)}{d^2} \qquad (2)$$

onde: *F* é a carga em Kgf, *d* é a média aritmética entre as duas diagonais d_1 e d_2 em mm e *HV* é a dureza Vickers.

4. METODOLOGIA

O Titânio Grau 4 utilizado para a pesquisa foi adquirido em formato cilíndrico de aproximadamente 100mm de comprimento e 10mm de diâmetro. Cada amostra foi submetida a um tratamento térmico distinto a fim de analisar e comparar as consequências de cada tratamento nas estruturas do material. A composição foi fornecida pelo doador dos corpos de prova, e são apresentadas na seguinte tabela.

Tabela 2 - Componentes químicos da amostra Titânio Grau 4

Elemento Químico	Peso (%)
Nitrogênio	0,05
Carbono	0,08
Hidrogênio	0,02
Ferro	0,50
Oxigênio	0,40
Titânio	Base

Fonte: Bionnovation

4.1. Tratamentos Térmicos

Para o procedimento foram realizados tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera, seguindo os passos ressaltados abaixo:

- Recozimento realizado numa temperatura de 1000°C (1273 K) durante 120 minutos, com resfriamento lento ao forno.
- Normalização realizada numa temperatura de 1000°C (1273 K) durante 120 minutos, com resfriamento lento ao ambiente.
- Têmpera realizada numa temperatura de 1000ºC (1273 K) durante 120 minutos, com resfriamento rápido em água.

Todos os tratamentos térmicos foram realizados em um forno tipo mufla da marca QUIMIS, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção Mecânica – UNIP de Bauru.

Para efeito de comparação das possíveis alterações ocasionadas pelos tratamentos térmicos, foi estabelecida como base uma amostra denominada amostra recebida, sem quaisquer tratamentos. Após as amostras terem sido submetidas aos respectivos tratamentos térmicos, com o auxílio de uma cortadora metalográfica de precisão foram extraídas amostras de 5 mm de comprimento.

4.2. Densidade

Em seguida, utilizando uma balança analítica, juntamente com seu kit de determinação de densidade pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - Unesp de Bauru, foram realizadas pesagens dos corpos de prova. O procedimento foi realizado 5 vezes visando confiabilidade estatística aos resultados. As densidades foram obtidas utilizando a equação (1).

4.3. Microscopia

As amostras foram embutidas em baquelite, usando uma embutidora semi-automática modelo PRE 30Mi da Arotec pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - Unesp de Bauru. Após este procedimento, foi realizada a preparação metalográfica com um lixamento com lixas d'água com granulação de 360, 400, 500, 600, 1200 e 1500 com consequente polimento nas amostras com suspensão de diamante de 1µm em um pano de polimento, ambos da marca Buehler. Para revelar a estrutura, as amostras foram atacadas quimicamente utilizando um composto de H_2O, HNO_3 e HF. Após as amostras terem sido atacadas quimicamente, utilizando um microscópio ótico Olympus BX51M, pertencente ao Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais - Unesp de Bauru, foram realizadas as micrografias.

4.4. Microdureza Vickers

As medidas de dureza Vickers foram realizadas no laboratório de Bioquímica da Faculdade de Odontologia da USP, campus de Bauru. O microdurômetro utilizado foi um Shimadzu HMV-2 que está acoplado a um microcomputador e fornece o valor conferido pelo microdurômetro através do software Newage Testing Instruments C.A.M.S. Testing System. As amostras utilizadas para esta análise são as mesmas que foram preparadas metalograficamente para a microscopia ótica. Para cada amostra, foram realizadas 5 endentações distribuídas aleatoriamente, com carga de 1,961 N (0,20 kgf) durante 60s. Foi considerada média dos valores obtidos.

5. RESULTADOS

5.1. Densidade

ISBN: 978-987-1676-63-7

Na tabela 3, são mostrados os valores de densidade para cada amostra com seus devidos tratamentos. As medidas de densidade foram realizadas utilizando água como fluido, cuja densidade a 22°C (temperatura no momento das medições) consiste em 0,9978 g/cm^3 [13].

Tabela 3- Densidades obtidas e teóricas comparadas.

Condição	Densidade Experimental (g/cm³)	Densidade Teórica [6],[14] (g/cm³)	Erro (%)
Recebida	4,53 ± 0,05	4,51	0,54
Recozida	4,48 ± 0,04	4,51	0,67
Normalizada	4,50 ± 0,01	4,51	0,25
Temperada	4,54 ± 0,01	4,51	0,67

Há uma pequena variação entre os valores das densidades das amostras após os consequentes tratamentos térmicos. Sabendo o valor teórico da densidade do Titânio (Ti-CP) é 4,51 g/cm^3 percebe-se erros inferiores a 0,7%. Por meio do gráfico (Figura 2) observa-se que de acordo com os dados obtidos não houve significativas mudanças na densidade do material devido aos processos térmicos realizados, Indicando que a quantidade de impurezas pesadas inseridas durante os tratamentos foi bem reduzida.

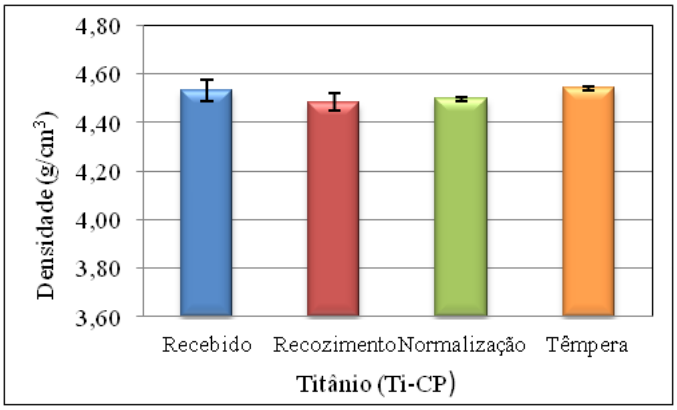


Figura 2 - Gráfico de comparação dos valores da densidade relacionados a cada tratamento

5.2. Microscopia

Observando a figura 3(a), vale ressaltar que em geral, a amostra recebida passou por processo de conformação industrial, ou seja, foi submetida a um processo onde houve forjamento rotativo e outros meios que evidenciam certa tensão interna no material, tensões que prejudicam as

propriedades como módulo elástico e dificulta a conformação de peças, por isso, a necessidade dos demais tratamentos térmicos a fim de melhorar suas propriedades mecânicas.

Na figura 3(b) é apresentada a amostra que arremetida ao recozimento. Em comparação com a amostra recebida, nota-se um refinamento dos grãos. Esse refinamento diz respeito ao fato do material ter sido corrigido de forma térmica, o que significa que a maior parte dos danos estruturais ocorridos durante o processo de fabricação foram corrigidos, tendendo assim a uma melhora da usinagem e elasticidade. No geral, para que seja possível trabalhar com o titânio na indústria, na grande maioria das vezes é necessário fazer uso das técnicas de alívio de estresse e de recozimento do metal. O titânio, quando não passa por pelo recozimento, têm grandes chances de apresentar fissuras e rachaduras quando processado. De todos os aspectos mecânicos melhorados pelo alívio de tensão decorrente do recozimento, ressalta-se uma melhora na ductilidade.

A amostra que sofreu normalização é apresentada na figura 3(c), onde percebe-se que os grãos da amostra normalizada tende a ser mais homogêneos e estruturados quando compara à recebida. Esse tipo de estrutura explica o motivo pelo qual é praticamente indispensável a utilização desse processo antes da têmpera, pois a estrutura sendo uniforme reduz a tendência ao empenamento e melhorando algumas das propriedades mecânicas já ressaltadas no item anterior.

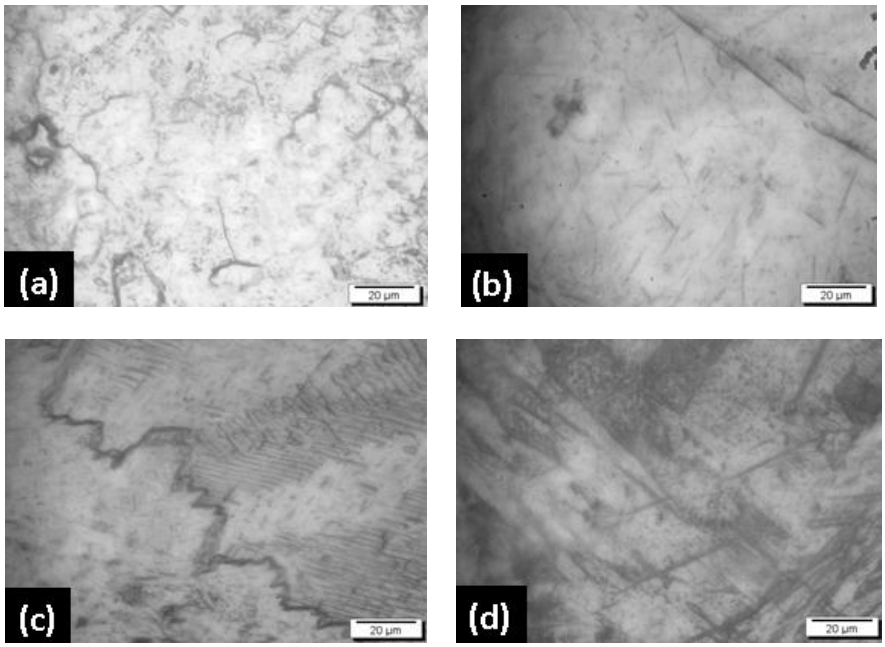


Figura 3 - Microscopia por meio de microscópio ótico do Titânio Grau 4;
(a) Condição como recebida; (b) Condição após recozimento; (c) Condição após normalização;
(d) Condição após têmpera

A figura 3(d) representa uma amostra que foi temperada. O propósito geral desse tratamento é obter uma estrutura martensítica do titânio, o que exige um resfriamento rápido, assim evitando que a estrutura cúbica de corpo centrado seja transformada hexagonal compacta de forma termodinamicamente estável. Devido ao fato da fase α do titânio manter-se estável até a temperatura de 883°C (1156 K), todos os processos cujo temperatura não ultrapassam esta temperatura, tendem a não modificar algumas propriedades mecânicas, como a dureza por exemplo. Porém, quando o tratamento térmico ocorre acima de 883°C (1156 K), o reticulado hexagonal compacto se transforma em cúbico de corpo centrado, o que significa uma diminuição do fator de empacotamento dos átomos; assim, tal diminuição corresponde a um maior espaço entre os átomos o que pode ser utilizado para adição forçada ou não de elementos intersticiais como oxigênio e nitrogênio, por exemplo. A adição de elementos intersticiais ocorre quando o material em fase β recebe de forma controlada tais elementos, de forma que há nesse momento um ambiente de atmosfera controlada no forno[15]. Outra característica da tempera, é que esta congela as estruturas cristalinas fora da condição de equilíbrio, mantendo o titânio em uma condição com a coexistência de duas fases. Normalmente, a coexistência das fases α e β causam um endurecimento por solução sólida [15], [16].

5.3. Microdureza

Com relação à dureza, tem-se que a estrutura cristalina de um material é um dos fatores mais relevantes no quesito de resistência e aplicação de um material, desta forma, quanto maior o fator de empacotamento (acomodação dos átomos em uma estrutura) maior será a resistência quanto à penetração.

Tabela 4 - Comparação dos valores da densidade experimental com o valor da densidade teórica

	Dureza (HV)							
	Recebido		Recozimento		Normalização		Têmpera	
Teste	1º	159,00	1º	192,00	1º	194,00	1º	197,00
	2º	179,00	2º	182,00	2º	175,00	2º	182,00
	3º	175,00	3º	180,00	3º	191,00	3º	179,00
	4º	193,00	4º	185,00	4º	204,00	4º	179,00
	5º	182,00	5º	175,00	5º	179,00	5º	196,00
	Média	177,60	-	182,80	-	188,60	-	186,60

ISBN: 978-987-1676-63-7

Através da tabela 4, pode-se analisar que os valores de dureza após os respectivos tratamentos térmicos não se alteraram de forma significativa, ou seja, mesmo sendo submetidas a altas temperaturas, as amostras se mantiveram praticamente estáveis. Tal fenômeno pode ser atribuido ao fato de o mesmo ter sido tratado termicamente em forno sem qualquer controle de atmosfera, sendo assim submetido a quantidades incontroláveis de oxigênio em sua estrutura, quantidade estas que fariam com que não houvesse a transformação de estrutura hexagonal compacta para cúbica de corpo centrado [15], [16].

Comparando-se os resultados, a dureza da amostra normalizada é superior. Tendo como base o tratamento térmico de normalização que visa o aquecimento acima da fase de transição e logo um resfriamento a taxa lenta, sendo o mesmo resfriado em atmosfera ambiente, o mesmo comportou-se de forma natural, sendo apenas a amostra submetida à têmpera com um menor valor e fora do esperado.

6. CONCLUSÃO

O estudo explorou os benefícios gerados por conta de cada tratamento térmico, as devidas modificações em suas estruturas e o quão isso poderia beneficiar ou não no emprego do material em campo, minimizando os possíveis erros por conta de um material inadequado para tal função atribuída. Pode-se analisar que a não alteração das características de densidade do material, diz respeito à baixa exposição do mesmo a contaminantes pesados havendo uma diferença inferior a 0,7%. Com relação à análise de dureza, o estudo comportou-se de forma a comprovar que o material necessita de ambiente com atmosfera controlada para haver consideráveis diferenças nos resultados, no entanto, mesmo em ambiente não favorável, houve mudanças na estrutura e pequenas alterações nas propriedades, podendo assim determinar eficaz os métodos de análises utilizados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a FAPESP pelo apoio financeiro, e aos professores Dr. Carlos Roberto Grandini e Dr.ª Marilia Afonso Rabelo Buzalaf pela disponibilidade dos laboratórios utilizados.

7. REFERÊNCIAS

[1] LÜTJERING, G.; Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α+β) titanium alloys. **Materials Science and Engineering A**, 1998.

[2] TITANIUM TECHNOLOGIES LLC Disponível em: <http://www.titaniumllc.com> último acesso em 5 de fevereiro de 2015.

[3] CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 3ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002.

[4] COLLINGS, E.W. **The Physical Metallurgy of Titanium Alloys**, ASM, Ohio, USA, 1984.

[5] JAFEE, R.I.; PROMISEL, N.E. **The Science, Technology and Application of Titanium**, Pergamon Press, London, 1970.

[6] LIDE, D.R. **Handbook of Chemistry and Physics**, 80th Edition 1999-2000, CRC Press, 1999.

[7] WANG, Y.B; ZHENG, Y.F Corrosion behaviour and biocompatibility evaluation of low modulus Ti–16Nb shape memory alloy as potential biomaterial. Materials Letters, V. 63, p.1293–1295, 2006

[8] DONACHIE, M.J. **Titanium - A Technical Guide**, ASM, Ohio, 1988

[9] VICENTE, F. B. et al. The Influence of Small Quantities of Oxygen in the Structure, Microstructure, Hardness, Elasticity Modulus and Cytocompatibility of Ti-Zr Alloys for Dental Applications, Materials, v.7, p. 542-553, 2014.

[10] BANERJEE, D. MUKHOPADHYAY, P. Phase transformations, Examples from Titanium and zirconium alloys, Elselvier, Oxford (UK), 2007.

[11] BANERJEE, D. WILLIAMS, J.C. Perspectives on titanium science and technology,Acta Materialia, v.61, p 844-879, 2013.

[12] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. MERRIL, J. **Fundamentos de Física 2**, LTC Editora, 7ª edição, Rio de Janeiro, 2006.

[13] **CIMM**, disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6556-teste-de-dureza-rockwell> último acesso em 20/08/2015.

[14] SHACKELFORD, JAMES F. **Ciência dos Materiais**, 6ª Edição, Editora Pearson Education - Br, São Paulo, 2008.

[15] ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN L.; REED-HILL, R. E.;Physical Metallurgy Principles, 4 ed., Cengage Learning, 2009.

[16] BOYER, R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E.G. **Materials Properties Handbook: Titanium Alloys**, ASM, USA, 2003.

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SOLDADURA DE RECARGUE CON ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Sebastián Zappa [1,2], Juan Martínez [1], Hernán Svoboda [2,3] y Estela Surian [4]

[1] Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Lomas de Zamora
Ruta 4, km 2, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina
correo-e: zappasebastian@hotmail.com
[2] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Godoy Cruz 2290, CABA, Argentina
[3] GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214, CABA, Argentina

RESUMEN

Los aceros inoxidables dúplex se caracterizan por poseer una estructura dual constituida por ferrita y austenita en iguales proporciones. Poseen una combinación de buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, que dependen de la composición química y de la relación entre las fases mencionadas. Son ampliamente utilizados en las industrias de procesos químicos y, fundamentalmente, del petróleo y gas. La soldadura de recargue, es utilizada en las industrias de fabricación y reparación para aumentar la vida útil de los componentes a menores costos. Las propiedades superficiales del recubrimiento dependen de la composición química y la microestructura en esa zona, las que a su vez, quedan definidas por el porcentaje de dilución y el procedimiento de soldadura. Si bien existen en la literatura trabajos donde se ha investigado la optimización de los parámetros de soldadura en recubrimientos con depósitos dúplex, están en general orientados al modelado numérico y no se ha encontrado un análisis microestructural sistemático. El objetivo de este trabajo fue el de estudiar el efecto del calor aportado (bajo, medio y alto) y de la cantidad de capas (una y dos) en recargues con depósitos inoxidables dúplex sobre la macroestructura, composición química, dilución, microestructura y dureza. Para tal fin, se soldaron 6 cupones de recargue mediante el proceso de soldadura semiautomático con protección gaseosa. Se realizó un análisis dimensional de los cordones, se determinó la composición química por medio de espectrometría de emisión óptica, se calculó la dilución geométrica y química, se caracterizó la microestructura por medio de microscopía óptica y electrónica de barrido y se midió la microdureza Vickers. Para una capa, el equilibrio microestructural en recargues con aceros inoxidables dúplex está controlado principalmente por el grado de dilución y para dos capas por el calor aportado.

Palabras Claves: *Soldadura Semiautomática, Acero Inoxidable Dúplex, Recargue, Microestructura*

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura de recargue se utiliza para la protección de superficies sometidas a servicios específicos (soldadura de revestimiento o cladding). En los últimos años, el recargue se ha implementado en numerosas industrias, por una cuestión económica, generando una solución a los problemas de la ingeniería y reducción de costos. Las industrias principales de aplicación son: del papel, químicas, de procesamiento de alimentos, nuclear e industrias del gas y del petróleo, fundamentalmente [1]. El concepto general del recargue se basa en depositar una capa de material con propiedades específicas, fundamentalmente resistencia a la corrosión o desgaste, sobre un elemento o pieza diseñada para soportar solo los esfuerzos mecánicos. En particular, las características deseables de los materiales de recargue inoxidables a depositar son: buena resistencia a la corrosión generalizada y localizada, soldabilidad y propiedades mecánicas. Los aceros inoxidables dúplex (DSS) poseen todas estas características: tienen altas resistencias a la corrosión generalizada y localizada, son soldables y poseen buenas propiedades mecánicas [2].

Estos materiales se caracterizan por poseer una estructura dual constituida por ferrita y austenita, en proporciones similares. Poseen una combinación de buenas propiedades en tracción, tenacidad y resistencia a la corrosión, que dependen de la composición química, de la relación entre las fases mencionada anteriormente y a la presencia de otras fases secundarias. Se ha encontrado que la precipitación de dichas fases, tales como nitruros de cromo (Cr_2N), austenita secundaria (γ_2) y compuestos intermetálicos, como ser fase sigma (σ) y chi (χ) tienen una gran influencia sobre las propiedades y el rendimiento de estos aceros [3].

En función del procedimiento de soldadura empleado se puede perder el equilibrio entre fases y generar la precipitación de fases secundarias obteniendo una pérdida importante de las propiedades. En términos generales, en soldaduras de DSS, altas velocidades de enfriamiento, pueden dar como resultado una excesiva cantidad de ferrita y la precipitación de nitruros. Por otro lado, una baja velocidad de enfriamiento puede generar un mayor contenido de austenita y la precipitación de fases intermetálicas [4]. Además, la composición química, la microestructura y las diferentes propiedades de los materiales de recargue son dependientes del grado de dilución del metal aportado por el consumible y el metal base fundido, sobre el cuál se deposita y se mezcla. La dilución reduce la concentración de elementos de aleación y aumenta el contenido de C en la capa de recargue (dado que el material base, generalmente, posee mayor contenido de este elemento que un DSS), lo que disminuye las propiedades de resistencia a la corrosión y causa otros problemas metalúrgicos. Además, un grado de dilución no controlado, puede producir un desequilibrio de las fases microestructurales presentes (50 % de ferrita y 50 % de austenita), que caracterizan a estos aceros [1, 2].

ISBN: 978-987-1676-63-7

La literatura [2], ha investigado la optimización de los parámetros de soldadura en recubrimientos con depósitos dúplex. Sin embargo, estos trabajos están orientados a la simulación numérica y no han proporcionado un análisis sobre las características geométricas, el equilibrio microestructural y la dureza del recargue.

El objetivo de este trabajo fue el de estudiar el efecto del calor aportado (bajo, medio y alto) y de la cantidad de capas (una y dos) sobre las características geométricas del cordón, la composición química, el grado de dilución, la microestructura y la dureza en depósitos de soldadura de acero inoxidable dúplex utilizando el proceso de soldadura semiautomático con protección gaseosa.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se soldaron seis cupones de soldadura de recargue mediante el proceso de soldadura semiautomático con protección gaseosa. Se utilizaron los mismos parámetros eléctricos para todos los casos, pero se modificó la velocidad de soldadura, de manera de generar tres niveles diferentes calor aportado (diferentes velocidades de enfriamiento). Asimismo, se soldaron cupones con una y dos capas. La primer capa fue de cinco cordones en la segunda de cuatro. El consumible empleado fue un alambre tubular (FCAW) de 1,2 mm de diámetro que deposita un acero inoxidable dúplex. La posición de soldadura fue plana y realizada en forma mecanizada. El gas de protección fue Ar+20 %CO_2, con un caudal de 18 L/min y la distancia entre el pico de contacto y la pieza, en todos los casos, fue de 20 mm. Las chapas base utilizadas fueron de acero comercial de bajo contenido de C de 3” x 3/8” x 250 mm. La Tabla 1 muestra la composición química de la chapa base, determinado por espectrometría de emisión óptica, y del metal de aporte puro del consumible utilizado, reportado por el fabricante. La Tabla 2 muestra la identificación de cada cupón en la que se indica la cantidad de capas (1 o 2) y el nivel de aporte térmico (A: alto, M: medio, B: bajo). Asimismo, se presentan los parámetros de soldadura promedio y el calor aportado para cada caso.

Se extrajeron cortes transversales para la caracterización macroestructural, se determinaron las características geométricas de los recargues (penetración, ancho y alto) y dilución geométrica por medio del área de metal base fundido (B) dividido el área total (A + B) [2], como se muestra en la Figura 1. En la superficie de los recargues se midió la composición química por espectrometría de emisión óptica (OES). Con estos datos, se determinó la dilución química definida como la diferencia entre la composición química del metal de aporte puro y la medida experimentalmente. Se caracterizó la microestructura mediante microscopías óptica (LM) y electrónica de barrido (SEM). Se realizó la cuantificación de las fases presentes por medio de metalografía color a 500x en 40 imágenes para cada condición. Además, se midieron 20 valores de microdureza Vickers con 1 kg de carga (H_{V1}) sobre las superficies de los recargues, reportándose el promedio de los mismos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Composición química de los materiales utilizados

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
Chapa A° al C	0,1	0,2	0,58	-	-	-
Consumible DSS	0,03	0,8	0,9	22,7	9,1	3,2

Nota: Valores expresados en porcentaje en peso

Tabla 2. Identificación de las probetas y parámetros de soldadura utilizados

Cupón	Tensión (V)	Corriente (A)	Velocidad de soldadura (mm/seg)	C. aportado (kJ/mm)
D1B	28	196	9,7	0,6
D1M	28	195	6,4	0,9
D1A	28	200	3,1	1,8
D2B	28	195	9,7	0,6
D2M	28	195	6,4	0,9
D2A	28	200	3,1	1,8

Nota: C. aportado: Calor aportado = Tensión x Corriente / Velocidad de soldadura

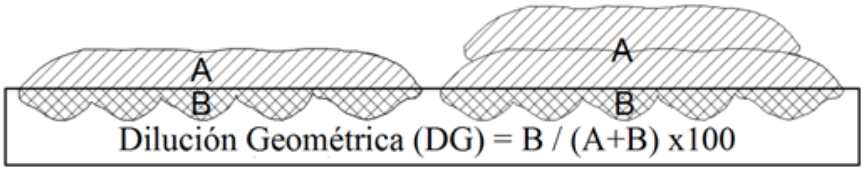


Figura 1: Determinación de la dilución geométrica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el aspecto superficial de los cupones de recargue obtenidos. Se pueden observar bajos niveles de salpicaduras y de escoria, en todos los cupones. Además, los cordones presentaron una buena terminación superficial. Sin embargo, puede verse una gran cantidad de poros vermiculares superficiales asociados a los gases que quedan atrapados debajo de la escoria. La Figura 3 muestra imágenes de cortes transversales de los recargues. En las mismas, se observa la chapa base, la zona afectada por el calor y el metal de soldadura conformando el recargue. En la mayoría de los cupones soldados, se pueden observar islas de escoria atrapada entre cordones.

Según la literatura [5], la geometría del cordón es directamente proporcional al calor aportado. En la Tabla 3 se presentan los valores de las dimensiones de los cupones: penetración, ancho y altura, medidas sobre cada uno de los recargues. La Figura 4 muestra la evolución de las características geométricas en función al calor aportado.

Al aumentar el calor aportado se observó un aumento en todos los parámetros geométricos de los recargues, manifestándose en un aumento del área transversal de los cupones. El ancho y la altura

ISBN: 978-987-1676-63-7

del recargue, aumentaron al aumentar el calor aportado (controlado por la velocidad de soldadura). Al disminuir la velocidad aumenta el calor aportado por unidad de longitud, generando un aumento en el ancho y la altura del depósito [5]. Por otro lado, no se observaron grandes variaciones en la penetración. No se detectaron variaciones significativas con la cantidad de capas.

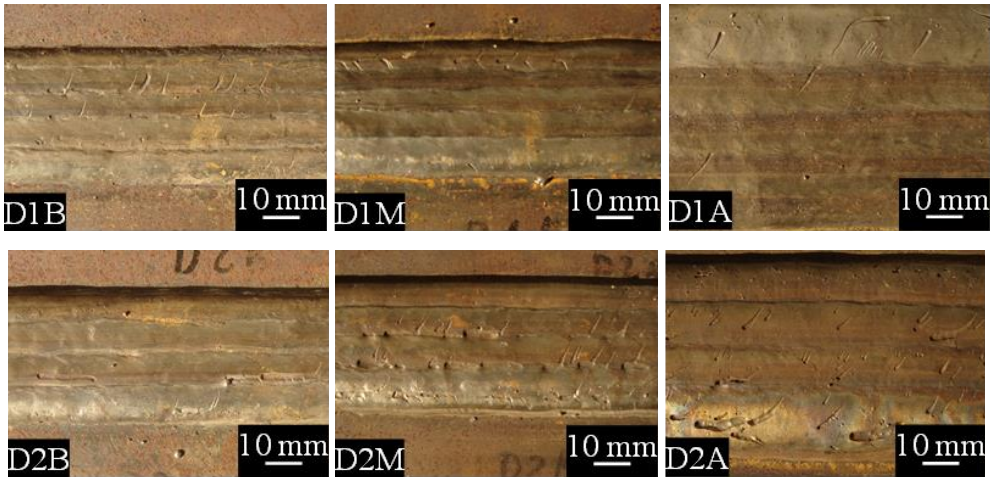


Figura 2: Aspecto superficial de los cordones

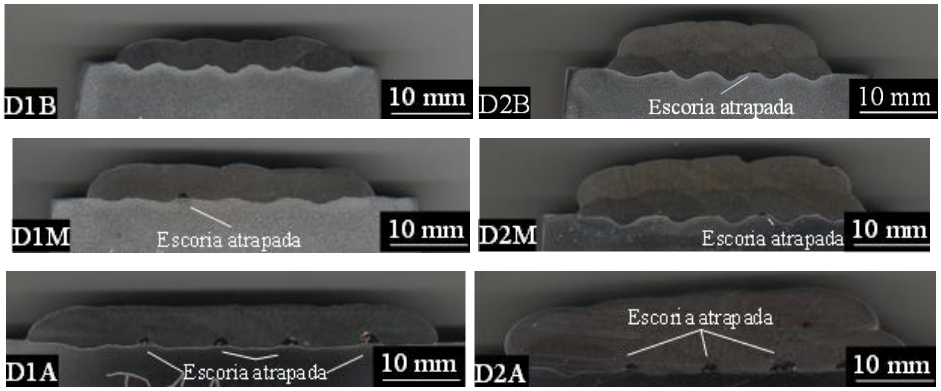


Figura 3: Aspecto superficial de los cordones

Tabla 3. Características y dilución geométrica

Muestra	Penetración (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	B (mm^2)	A+B (mm^2)	Dilución geométrica (%)
D1B	1,1	30,8	3,6	19,2	103,7	18,5
D1M	1,2	37,9	4,6	25,3	159,9	15,8
D1A	1,0	54,0	4,9	27,5	234,7	11,7
D2B	1,0	29,5	6,5	18,5	171,8	10,8
D2M	1,2	38,2	7,6	24,0	269,0	8,9
D2A	1,1	52,8	10,2	35,9	422,1	8,5

ISBN: 978-987-1676-63-7

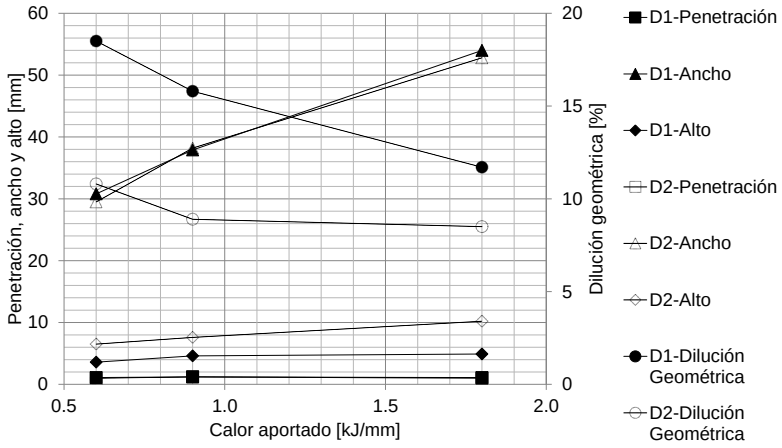


Figura 4: Características y dilución geométricas

La dilución geométrica osciló entre un 9 y un 20 %, aproximadamente, para las distintas condiciones de soldadura. En este sentido, el hecho de que la dilución se haya encontrado entre estos valores, es un dato relevante, dada la importancia de la composición química en la formación de las fases microestructurales [1]. El porcentaje de dilución del metal base en la pileta líquida disminuyó con el aumento del calor aportado y de una a dos capas. Estos hechos podrían estar asociados a que al aumentar el calor aportado y/o la cantidad de capas del recargue, se generan mayores volúmenes de material aportado respecto del volumen de material base fundido, dando como resultado la disminución de la dilución geométrica. Sin embargo debe tenerse en cuenta que si el aporte térmico se aumenta a través de un aumento de la corriente el resultado de la dilución podría ser diferente.

La Tabla 4 muestra la composición química de los recargues en la superficie y el cálculo de la dilución química. La Figura 5 muestra la evolución de la composición química y la dilución química al aumentar el calor aportado para una y dos capas. En dicha imagen se puede observar que al aumentar el calor aportado disminuye la dilución química (al igual que lo observado en la Tabla 3 respecto a la dilución geométrica), generando el enriquecimiento de elementos de aleación.

Tabla 4. Composición y dilución química

Muestra	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Dilución química promedio (%)
D1B	1,0	18,6	7,6	2,5	19
D1M	1,0	19,8	8,2	2,7	13
D1A	1,0	21,3	8,7	2,9	6
D2B	1,0	21,0	8,7	2,9	8
D2M	1,1	21,7	8,8	3,0	5
D2A	1,0	22,2	9,0	3,1	2

ISBN: 978-987-1676-63-7

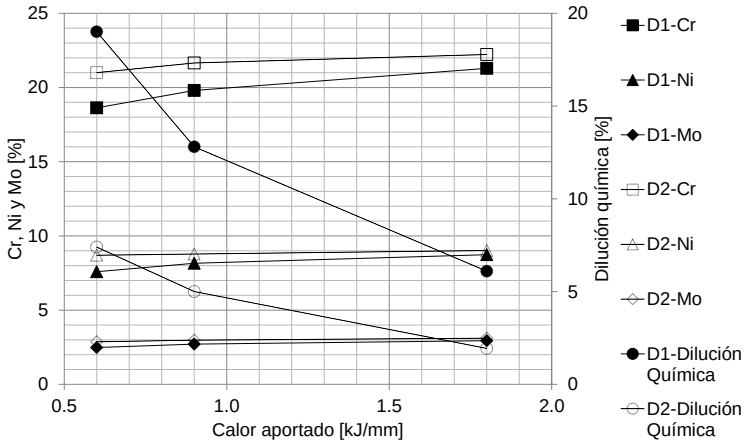


Figura 5: Composición y dilución química

El calor aportado es una medida relativa de la energía transferida por unidad de longitud soldada, siendo un factor de relevancia ya que afecta la velocidad de enfriamiento y el grado de dilución de los depósitos, lo cual define la evolución microestructural y las propiedades finales del metal depositado. Según la literatura [1] a mayor calor aportado, menor contenido de ferrita en la microestructura. Esto está asociado a que al aumentar el calor aportado disminuye la velocidad de enfriamiento y el tiempo de transformación de ferrita en austenita es mayor, dando como resultado un menor contenido de ferrita en la microestructura. Además, con mayor aporte térmico, la pileta líquida permanece más tiempo en este estado, posibilitándose una mayor oxidación de los elementos de bajo potencial de oxidación, que pasan como óxidos a la escoria o al medio, disminuyendo así su contenido en el metal depositado, entre ellos el Cr, uno de los más oxidables y el principal elemento ferritizante [6]. Además, la dilución es un aspecto de gran importancia en la soldadura, fundamentalmente en recubrimientos, donde se buscan bajos niveles de dilución, ya que la misma altera la composición química final de los cordones y, por ende, la microestructura resultante. Cuando la dilución es baja, la composición química del recubrimiento es cercana a la composición química del consumible y las propiedades finales del recubrimiento son las deseadas [1]. La literatura [7], menciona que al aumentar los niveles de dilución el contenido de ferrita en la microestructura disminuye. Un aumento de la dilución provoca un aumento en el contenido de C y reduce los contenidos de Cr y Ni del material de recargue, aumentando el contenido de austenita.

El calor aportado, modificado por medio de la velocidad de soldadura, influyó en la microestructura de los depósitos, al igual que la cantidad de capas, debido a lo mencionado anteriormente. La Figura 6 muestra las microestructuras obtenidas para los recargues soldados. En todos los casos la microestructura estuvo constituida por dos fases, una oscura (ferrita) y otra clara (austenita). No se encontraron variaciones significativas observables para los diferentes cupones de soldadura, mediante esta técnica. Sin embargo, se pudo observar que la microestructura no estuvo

ISBN: 978-987-1676-63-7

balanceada (50 % ferrita y 50 % austenita) y hubo mayor contenido de austenita en todos los casos de estudio. Además, se pudo observar que la microestructura en la zona afectada por el calor entre cordones (zona recristalizada) estuvo conformada por grandes placas de ferrita con altos contenidos de austenita secundaria en el interior de las mismas.

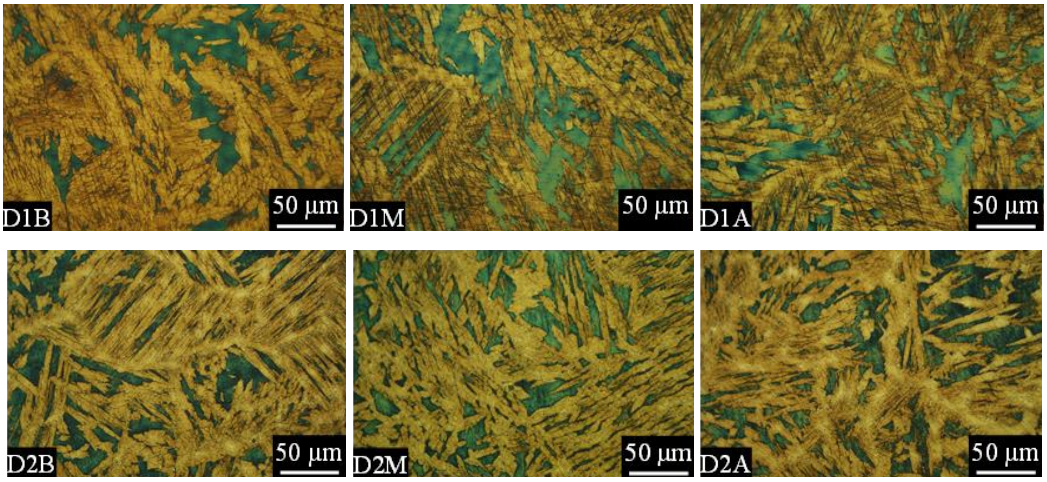


Figura 6: Microscopía óptica

La Figura 7 muestra imágenes de microscopía electrónica de barrido. En las mismas se pueden observar placas de austenita en una matriz de ferrita. Además, en la muestra D2B, se puede observar un gran contenido de austenita secundaria dentro de las placas de ferrita en zona recristalizada entre cordones. La literatura reporta [8] que la zona recristalizada experimenta un recalentamiento que se describe en tres etapas:

1) El material es calentado a muy alta temperatura (sin alcanzar la temperatura de fusión). A esta temperatura, la austenita comienza a transformarse en ferrita hasta que, eventualmente, la estructura es completamente ferrítica. En esta instancia, la mayoría de los posibles precipitados (carburos, nitruros, etc.) comienzan a disolverse.

2) Una vez alcanzada la temperatura pico ocurre crecimiento de grano de la ferrita, ya que no hay segundas fases o precipitados que inhiban su crecimiento.

3) Durante el enfriamiento, la austenita nuclea y crece, mientras que los precipitados se vuelven a formar.

La transformación de ferrita a austenita es dependiente de la composición química y de la velocidad de enfriamiento. Con una alta velocidad de enfriamiento, no hay tiempo suficiente para la transformación de ferrita en austenita, dando como resultado un alto contenido de ferrita en la zona afectada por el calor [8]. Además, según la literatura [8] los Cr_2N son sitios preferenciales para la nucleación de austenita secundaria y puede ocurrir gran cantidad de precipitación durante el

ISBN: 978-987-1676-63-7

recalentamiento en DSS. Los múltiples recalentamientos, como los experimentados en soldaduras multipasadas, pueden conducir a una gran cantidad de austenita secundaria. Lo discutido anteriormente puede indicar la existencia de nitruros de cromo en la microestructura, no identificados con las técnicas utilizadas en este trabajo.

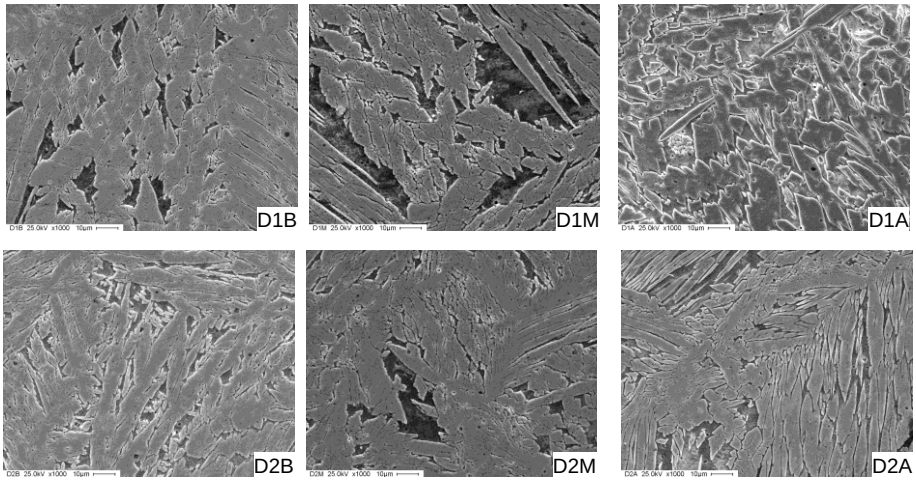


Figura 7: Microscopía electrónica de barrido

La Tabla 6 presenta los contenidos de ferrita, de austenita y los valores promedio de microdureza de cada muestra. En la Figura 8 se observa la relación de estas propiedades con el calor aportado. De acuerdo con estos resultados se presentan dos efectos opuestos. Se puede observar que el aumento del calor aportado generó un aumento del contenido de ferrita para los recargues soldados con una capa. Sin embargo, ocurrió el efecto contrario para los recargues soldados con dos capas. Por un lado, al disminuir la velocidad de soldadura, disminuye la dilución con la chapa base, dando como resultado un mayor contenido de ferrita [1, 2, 7]. Por otro lado, una disminución de la velocidad de soldadura genera un mayor calor aportado y tiempo de transformación de ferrita en austenita durante el enfriamiento, dando como resultado un menor contenido de ferrita en la microestructura [9, 10]. En este sentido, a partir de lo observado en las diferentes condiciones analizadas, para los recargues soldados con una capa, la dilución tiene un mayor efecto sobre el equilibrio microestructural en soldadura de aceros inoxidables dúplex que la velocidad de solidificación (tiempo de transformación de ferrita en austenita). Sin embargo, para los recargues soldados con dos capas con diluciones bajas y prácticamente constante (entre el 2 y 8 %, Tabla 4), existe un mayor efecto del calor aportado ya que el contenido de ferrita disminuye con el aumento del mismo.

Considerando los resultados de dureza para las distintas condiciones de recargue se observa que, si bien no se encontraron grandes variaciones (20 H_{V1}), los recargues soldados con una capa presentaron los menores valores respecto a los recargues soldados con dos capas. Para los

ISBN: 978-987-1676-63-7

recargues de una capa, al aumentar el calor aportado aumenta la dureza. Por otro lado, para los recargues soldados con dos capas, donde se encontraron las menores diferencias de dureza (4 H_{V1}) al aumentar el calor aportado la dureza disminuyó. Ambos resultados están asociados y controlados con los contenidos de ferrita medidos en la microestructura para estas condiciones [11].

Tabla 6. Cuantificación de ferrita y dureza

Muestra	Ferrita (%)	Austenita (%)	Dureza (%)
D1B	32	68	242
D1M	36	64	244
D1A	38	62	259
D2B	44	56	266
D2M	39	60	263
D2A	37	62	262

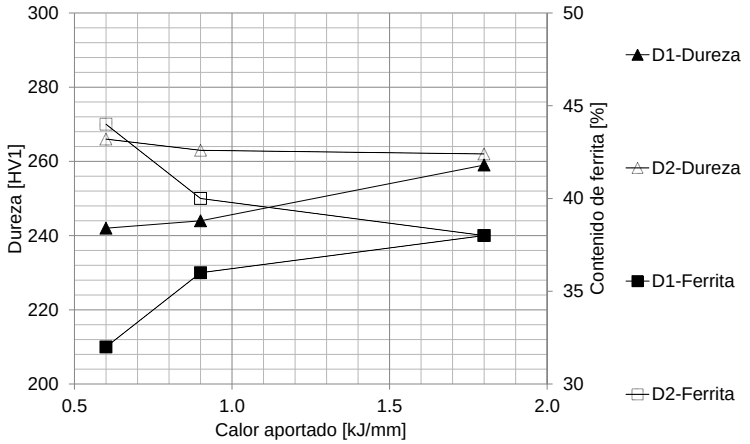


Figura 8: Cuantificación de ferrita y dureza

4. CONCLUSIONES

El aumento del aporte térmico, al disminuir la velocidad de soldadura, en los recargues de aceros inoxidables dúplex generó: un aumento en el ancho y el alto de los cordones, una menor dilución, un mayor contenido de ferrita y una mayor dureza.

Por otro lado, la segunda capa de recargue respecto de una simple, generó menores valores de dilución, acercando la composición química superficial de los recargues a la del consumible. Además, la microestructura estuvo más balanceada, acercándose los contenidos de ferrita al 50%, generando una mayor dureza.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El equilibrio microestructural en recargues con aceros inoxidables dúplex, está controlado principalmente por el grado de dilución para una capa y por el calor aportado para dos capas.

5. REFERENCIAS

[1] Kannan, T. and N. Murugan, *Prediction of Ferrite Number of duplex stainless steel clad metals using RSM*. Welding Journal, 85, 91, 91s-100s, 2006.

[2] Kannan, T. and N. Murugan, *Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality*. Journal of Materials Processing Technology, 176, 230-239, 2006.

[3] Bettini, E., et al., *Study of corrosion behavior of a 22% Cr duplex stainless steel: Influence of nano-sized chromium nitrides and exposure temperature*. Electrochimica Acta, 113, 280-289, 2013.

[4] Karlsson, L., Welding duplex stainless steels - A review of current recommendations. IIW Doc., IX-2355-11 (IX-H-736-11), 1-17, 2011.

[5] Almenara, M.D., et al., *Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un acero inoxidable dúplex 2205*. Dyna, 78, 169, 206-215, 2011.

[6] Zappa, S., et al. *Efecto del aporte térmico sobre la microestructura y la dureza en soldaduras de acero inoxidable dúplex*. CONAMET-SAM 2014, Argentina2014.

[7] KOTECKI, D.J., *Dilution control in single-wire stainless steel submerged arc cladding*. Welding Journal, 75, 2, 35s-45s, 1996.

[8] Lippold, J.C. and D.J. kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley-Interscience ed, USA, 2005.

[9] Vitec, J., S.A. Davis, and C.R. Hinman, *Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects - Part 1: Model development*. Welding Journal, 82, 1, 10s-17s 2003.

[10] Vitec, J., S.A. Davis, and C.R. Hinman, *Improved ferrite number prediction model that accounts for cooling rate effects – Part 2: Model results*. Welding Journal, 82, 2, 43s-50-s, 2003.

[11] Martins, M. and L.C. Casteletti, *Effect of heat treatment on the mechanical properties of ASTM A 890 Gr6A super duplex stainless steel*. Journal of ASTM International, 2, 1, 1-14, 2005.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Daniel Betz de BOHELER Argentina por la provisión del consumible utilizado, a Ricardo Flores de AIR LIQUIDE Argentina por la donación de los gases de soldadura, a Eduardo Asta de ESAB-CONARCO Argentina por los análisis químicos, a Mercedes Pianetti del Laboratorio de Microscopía Electrónica del INTI - MECÁNICA por las imágenes SEM y a la UNLZ por el aporte financiero.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

Estudio del procedimiento de soldadura en recargues nanoestructurados Fe-(Cr,Mo,W)-(C,B).

[1]**Gramajo J.** [2]**, Gualco A.** [2], **E. Surian** [3]**, H. Svoboda** [4]

[1-2] Secretaria de Investigación - Facultad de Ingeniería UNLZ. Camino de Cintura y Juan XXII, (1832) Lomas de Zamora. Argentina. [1] CIC, Calle 526 entre 10 y 11.[2] CONICET, Av. Rivadavia 1917, C.A.B.A., Argentina
[3] Consultor Independiente.
[4] GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería - UBA. Av. Las Heras 2214 (1427), CABA, Argentina. CONICET, Av. Rivadavia 1917, C.A.B.A., Argentina.

RESUMEN

La optimización de las propiedades tribológicas de las superficies recuperadas por medio de técnicas de recargues ha presentado grandes avances en el campo metalúrgico en el último tiempo. Las aleaciones del tipo Fe-Cr-C y Fe-C-B son conocidas por exhibir excelentes prestaciones al desgaste en condiciones severas, donde la incorporación de Nb, Mo y B mejora las prestaciones a elevada temperatura. En este contexto, para procesos de soldadura semiautomáticos FCAW y FCAW-S, han sido diseñados nuevos consumibles que depositan un material base hierro, nanoestructurado, de alta aleación, con carboboruros de W, Mo y Cr de muy alta dureza y resistente al desgaste abrasivo. En recientes trabajos se ha encontrado que el calor aportado afecta a la dilución y al tamaño y la distancia media entre los precipitados, todos factores que influyen sobre la resistencia al desgate abrasivo. Estas variaciones que se observaron en el proceso FCAW-S además se ven acompañadas de la ventaja que implica la posibilidad de prescindir del uso de gases, facilitando trabajos de campo. El propósito de este trabajo es comparar variaciones microestructurales entre los depósitos soldados con una y dos capas mediante soldadura semiautomaticas FCAW Y FCAW-S. Sobre cada cupón se analizará la composición química, se caracterizará la microestructura mediante difracción de rayos X y microscopías óptica y electrónica de barrido. Se determinará el porcentaje de dilución geométrica y se tomarán perfiles horizontales y verticales de microdureza Vickers (HV_2) y sobre las distintas fases y carburos ($HV_{0,025}$). Resultado preliminares indican que la dilución para recargues de una capa, con y sin protección gaseosa fueron de 26% y 19%, con una dureza de 960 y 1000 HV_2 respectivamente. Se observó un aumento de dureza en las zonas recristalizadas, como así también la cantidad de carboboruros en el último cordón.

Palabras Claves: *FCAW; FCAW- S; números de capas; microestructura; nanoestructurado.*

1. INTRODUCCIÓN

La mejora de la resistencia al desgaste de componentes de máquina puede ser lograda con una adecuada selección de materiales resistentes a la abrasión para la deposición de capas duras [1]. El agregado de elementos de aleación y la solidificación rápida generan finas microestructuras que distribuyen homogéneamente las fases duras produciendo una excelente combinación de dureza y tenacidad [2]. Las fases duras y gruesas de alta dureza son importantes para lograr una gran resistencia a la abrasión. La dureza de las fases duras y / o la dureza de la matriz debe ser mayor que la dureza del abrasivo [2, 3].

Aleaciones base hierro que contienen niobio (Nb), titanio (Ti), molibdeno (Mo) en combinación con boro (B) and carbono han sido seleccionados como aleaciones de recargue debido a su alta dureza y resistencia al desgaste obtenido por la precipitación de diferentes fases duras resistentes a la abrasión [4]. Los hierro con alto cromo son ampliamente utilizados para el recargue de componentes industriales de la minería, cementeras, centrales térmicas y las industrias de hierro y acero, debido a su elevada dureza y excelente resistencia a la abrasión, que se atribuye por la formación de carburos de cromo [5, 6]. Las propiedades de desgaste se ven afectados por las microestructuras y por la cantidad de fases de carburos. Las microestructuras más gruesas y con poca cantidad de carburos presentan una gran pérdida de peso durante la abrasion [7]. Sin embargo, el control de los tamaños de carburo y su distribución se ha convertido en un reto importante para las aleaciones de recargue Fe-Cr-C-B debido a la fragilidad de carburos alargados primarios. Por lo tanto la resistencia al desgaste de recargues depende de muchos factores tales como el tipo, la forma y distribución de fases duras, así como la tenacidad y el comportamiento de endurecimiento por deformación de la matriz [8]. En este sentido, en el proceso FCAW, todos estos factores mencionados anteriormente están fuertemente influenciados por el procedimiento de soldadura. El propósito del siguiente trabajo fue estudiar la influencia del número de capas y el gas de protección sobre la microestructura, el tamaño de cristallita y la microdureza de depósitos de aleaciones base Fe nanoestructuradas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

El consumible empleado fue un alambre tubular de diámetro 1,6 mm, depositado mediante el proceso semiautomático de soldadura bajo protección gaseosa, con una longitud libre del alambre de 20 mm, en forma mecanizada, empleando un dispositivo Miggytrac.

Se soldaron 4 cupones con 1 y 2 capas, con Ar-20% CO2 y sin protección gaseosa. Los parámetros se eligieron en base a trabajos previos [9-10]. La secuencia de soldadura fue de 4

ISBN: 978-987-1676-63-7

cordones para la primera capa y de 3 cordones para la segunda capa, como se muestra esquemáticamente en la figura 1. La longitud libre del alambre fue de 18 mm, bajo gas, y 25 mm para las probetas soldadas sin protección gaseosa. Los parámetros de soldadura empleados se pueden ver en la tabla 1, así como la identificación empleada en cada caso.

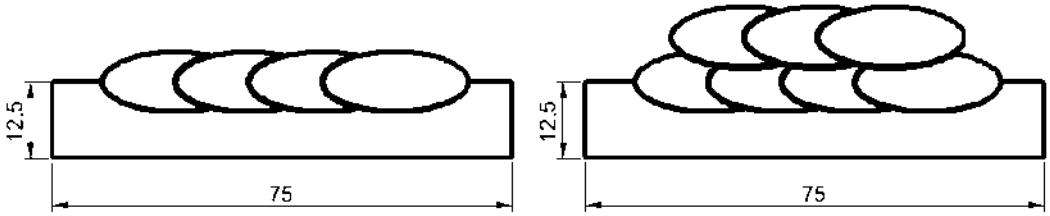


Figura 1: Esquema de los cupones; unidades en mm.

Tabla 1. Parámetros de soldadura.

Identificación	Capas	Gases	Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad avance [mm/s]	Calor aportado [kJ/mm]
A1	1	Ar-20 CO_2	35	300	3	3,5
A2	2	Ar-20 CO_2	35	300	3	3,5
O1	1	-	35	300	3	3,5
O2	2	-	35	300	3	3,5

Luego de soldadas las distintas probetas se realizó una inspección visual analizándose el aspecto superficial y la presencia de defectos macroscópicos superficiales.

Se determinó la composición química mediante espectrometría de emisión por chispa (ES). El boro fue medido mediante la técnica de espectroscopía de emisión por plasma. Se realizaron mediciones de composición química con espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS). Se caracterizó la microestructura mediante microscopías óptica (LM) y electrónica de barrido (SEM). En base a las geometrías de las capas se calculó la dilución de cada muestra mediante software de análisis de imágenes.

Sobre la superficie de los cupones se realizó difracción de rayos X (DRX), en la zona rayada de la figura 2. El equipo empleado fue un RIGAKU, con radiación de Cu K-α. Los barridos se realizaron de 35° a 95º con una velocidad de 1º por minuto. Con los espectros obtenidos se analizaron las fases presentes y se determinó el tamaño de cristalita, utilizando la fórmula de Scherrer [11, 12]:

ISBN: 978-987-1676-63-7

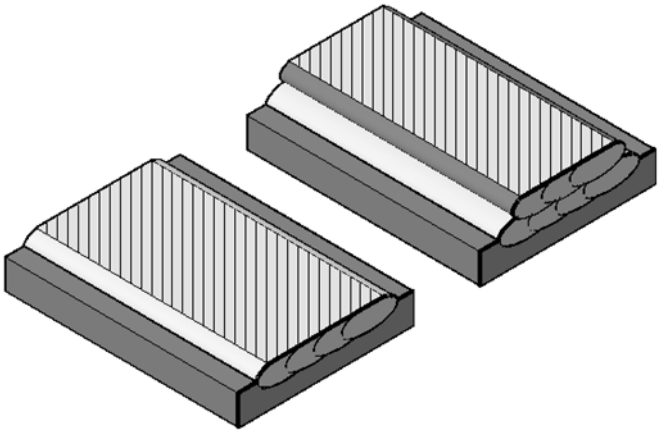


Figura 2: Esquema de la zona donde se realizó DRX.

De cada una de las probetas soldadas se extrajeron cortes transversales. Sobre ellos se realizaron perfiles de micro-indentación Vickers (HV2) a 1 mm de la superficie, en forma horizontal. La microdureza de las fases se calculó como el promedio de tres mediciones realizadas con HV0,025.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 *Inspección visual*

En la figura 3 se puede ver el aspecto superficial de la primera capa de los cordones depositados.

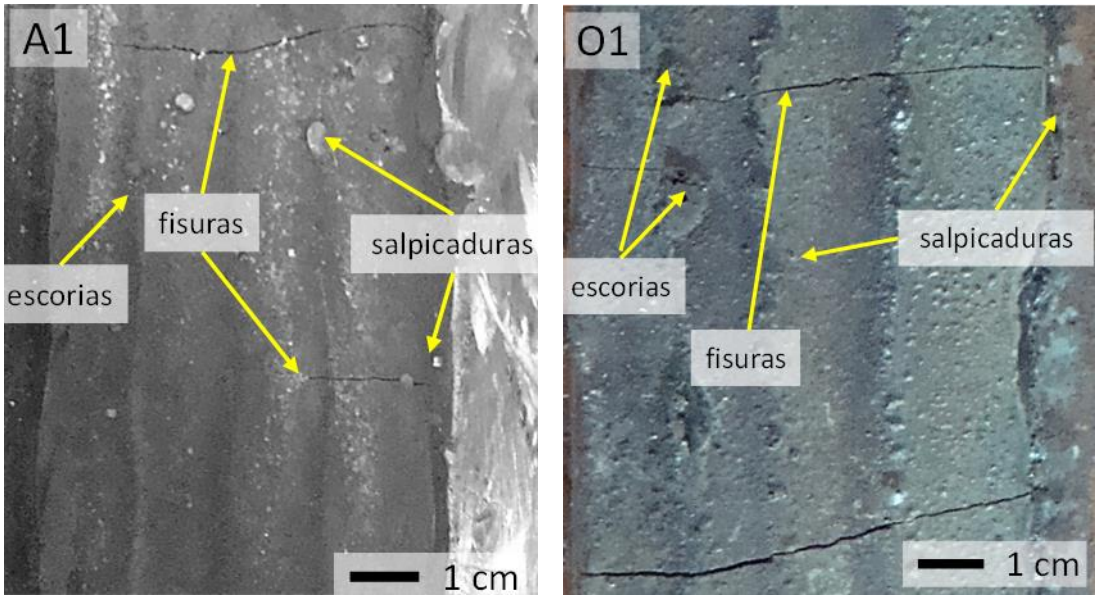


Figura 3: Vista superior de los cordones soldados.

Se observó que la probeta soldada con gas presentó mayores niveles de salpicaduras y poca escoria. El mayor porcentaje de proyecciones estaría relacionado con el cambio modo en el transferencia de globular a globular repelido para la probeta soldada sin protección gaseosa [13]. Se observaron fisuras transversales que se generaron durante el enfriamiento del cordón, producidas por el alivio de tensiones, típico en estos materiales.

3.2 *Macrografía*

En la figura 4 se muestran las macrografías del corte transversal del cupón. Se puede ver tanto en el metal base como en el depósito ausencia de defectos macroscópicos, como poros e inclusiones.

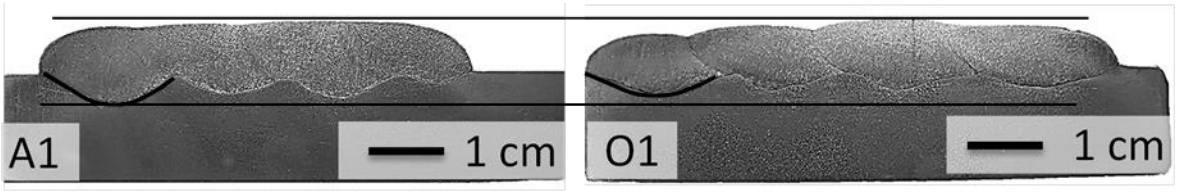


Figura 4: Macrografía de cortes transversales de los cupones.

En base a la geometría de los cordones se calculó la dilución de cada muestra utilizando un software de análisis de imágenes. La probeta A1 presentó una dilución del 26% y al de O1 del 19%. Esto estaría relacionado con la menor penetración, producto del cambio en el modo de transferencia, y el mayor volumen de recargue debido al aumento en la longitud libre del alambre, de 18 a 25 mm, ambos factores producen una menor dilución. Además, se observó que el ancho de los cordones aumentó con las probetas soldadas sin protección gaseosa. Esto estaría relacionado con la mayor tasa de deposición de material.

3.3 *Composición química*

En la tabla 2 se muestra el resultado del análisis químico medido sobre la superficie del último cordón, mediante espectrometría de emisión por chispa (ES).

Tabla 2. Composición química del metal de aporte puro (% en peso)

	C	Mn	Cr	Nb	Mo	W	B
A1	1,49	0,39	14,3	5,5	3,2	5,7	4,8
O1	1,60	0,39	14,9	5,7	3,4	6,1	4,9
A2	1,60	0,34	17,1	7,2	4,0	7,5	5,1
O2	1,70	0,37	18,1	7,3	4,1	7,8	5,1

ISBN: 978-987-1676-63-7

El material depositado presentó una alta concentración de elementos de aleación, dentro del sistema Fe-(Nb,Cr,Mo,W)-(C,B). Esta aleación es característica a formar estructuras amorfas. En trabajos previos de diferentes autores [14, 15] han reportado que en estas aleaciones es muy difícil formar estructuras vítreas, independientemente de la velocidad crítica de enfriamiento. Esto estaría relacionado a la presencia de fases cristalinas heterogéneas en el metal base que actuarían como sitios de nucleación. Además, han observado que está gran habilidad a formar fases vítreas permite un alto sobrenfriamiento y como consecuencia una mayor frecuencia de nucleación, limitando el tiempo de crecimiento y generando un gran refinamiento de la estructura metalúrgica [16, 17].

En la tabla 2 se observa una mayor cantidad de elemento de aleación en las probetas soldadas con mayor número de capas. Esto estaría relacionado con el nivel de dilución con el metal base. Si compramos las probetas con igual número de capas pero con diferentes protecciones se observa que la diferencia es menor debido a leve diferencia de dilución (de 19 a 25%) y a la transferencia de elementos de aleación a la escoria en la probeta soldada sin gas de protección.

3.4. *Caracterización microestructural*

En la figura 5 se muestran los espectros de DRX obtenidos para todas las condiciones.

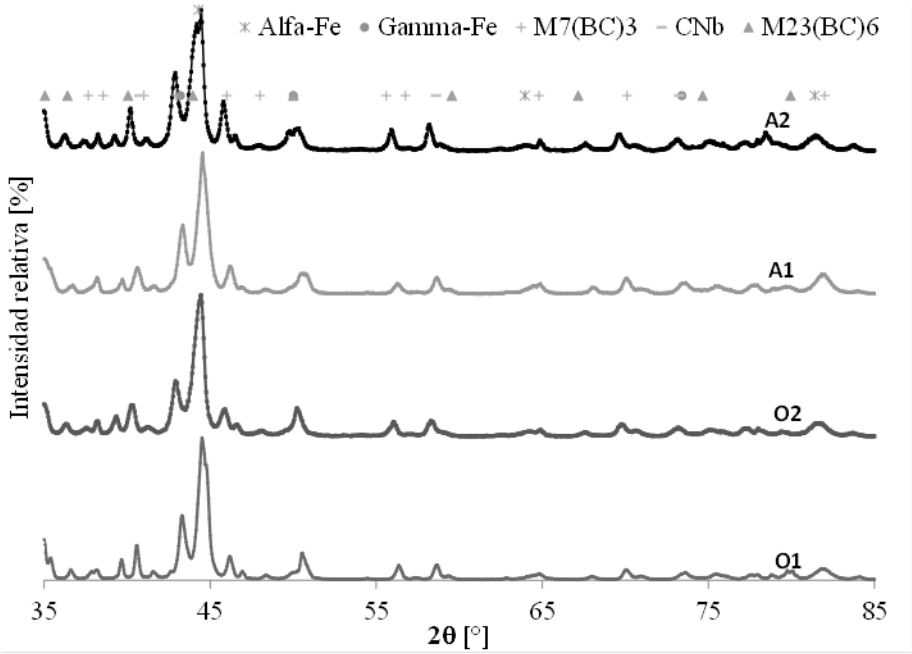


Figura 5: Espectros de DRX de todas las condiciones.

En la figura 5 se puede ver que la microestructura estuvo formada por α-Fe y γ-Fe, detectándose la presencia de carboboruros metálicos ($(Cr,Fe)_7(B,C)_3$, $(Cr,Fe)_{23}(B,C)_6$) [17, 18]. Tambien se

identificaron carburos de Nb en todas las probetas. El tamano de cristalito fue de entre 50-90 nm. El porcentaje de carburos y carboboruros fue mayor al 70%. Se observo un leve aumento de γ-Fe y de los carboboruros (Cr,Fe)7(B,C)3 en las probetas soldadas bajo proteccion gaseosa y con dos capas. Esto estaria asociado a la mayor velocidad de enfriamiento y al mayor contenido de elementos de aleacion.

En la figura 6 se muestra una micrografía de electrones retrodifundidos de la probeta A1. Se puede distinguir una gran dispersion de precipitados duros en formas de bloque y tipo listones homogeneamente distribuidos. El porcentaje de los mismos es de alrededor del 65%, lo que es consistente con lo observado en los espectros de difracción.

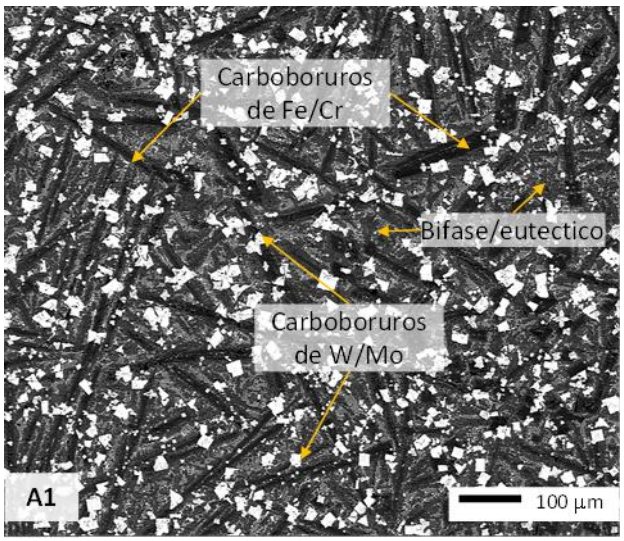


Figura 6: Imagen SEM de la microestructra de la zona central del último cordon de A1.

En la figura 7 se muestras diferentes imágenes de electrones secundarios realizadas sobre el último cordon y en la zona central del mismo. Se observan los carburos de niobio de tamaño de 2 a 4 μm, caboboruros de Mo/W en forma de bloque de 10μm en la primer capa y de 20 μm para la de dos capas, carboboruros alargados $M_{23}X_6$ de 10 a 15 μm de ancho y el eutéctico formado de láminas planas y globulares de precipitados del tipo M_7X_3 de espesor 1 a 3 μm en una matriz α-Fe. Según lo reportado en la literatura [17], los primeros carburos en aparecer durante el proceso de solidificación son los CNb. Posteriormente, con la disminución de la temperatura, nuclean sobre dichos carburos los caboboruros de Mo/W y en forma paralela crecen los carboboruros alargados complejos $M_{23}X_6$. Finalmente, a partir del líquido remanente se forma el eutéctico, α o γ-Fe y M_7X_3.

ISBN: 978-987-1676-63-7

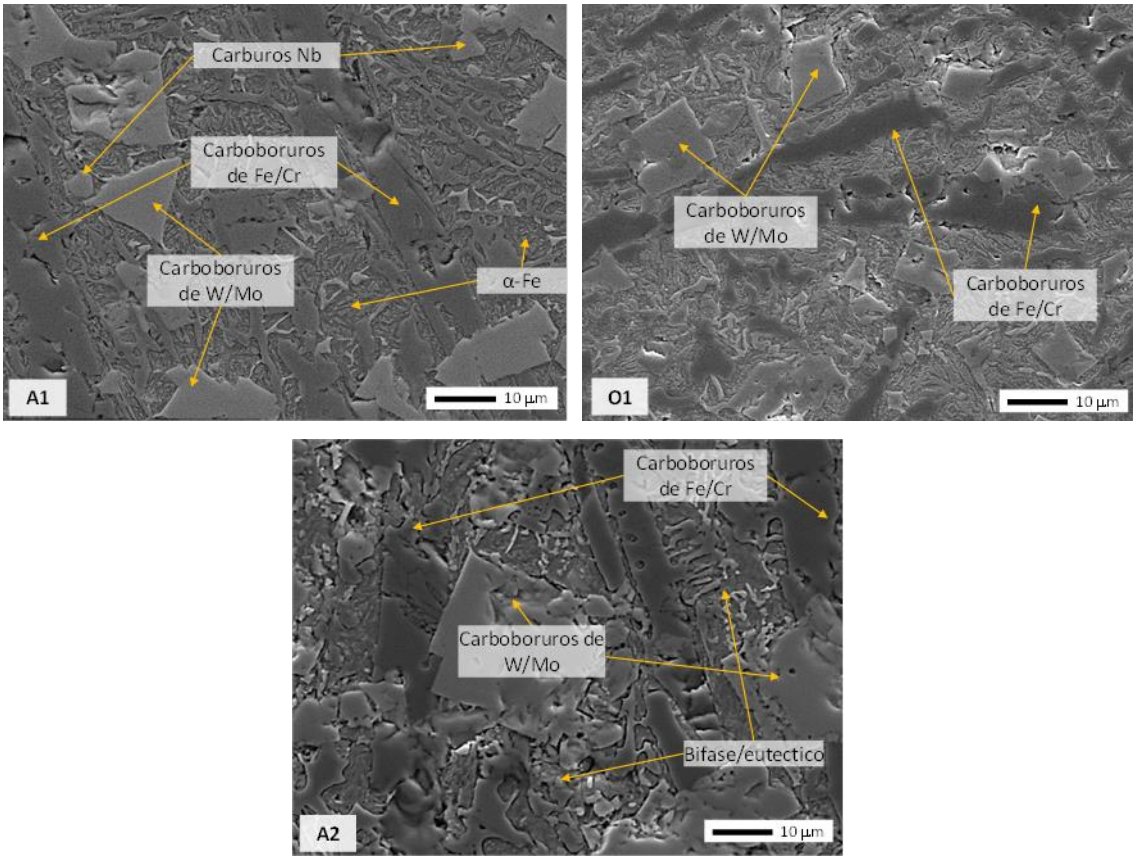


Figura 7: Imagen de electrones secundarios de las muestra A1, O1 y A2.

3.4. *Microdureza.*

En la figura 8 se presentan los resultados de microdureza de las diferentes fases. La valores de microdureza son el promedio de 3 mediciones realizadas sobre cada fase con $HV_{0,025}$.

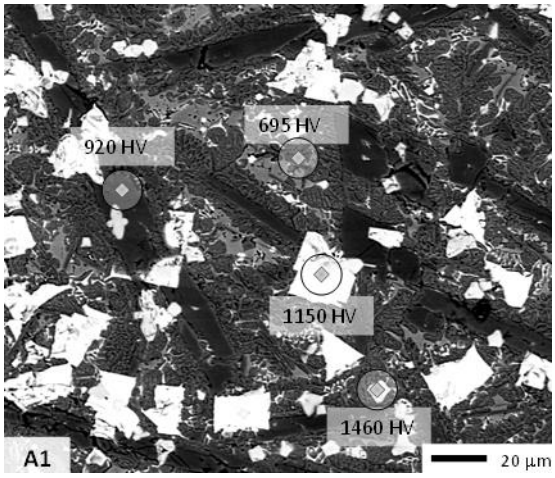


Figura 8: Medidas de microdureza de fases realizados en el cupon A1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se puede ver en la figura 8 que las microdurezas de fases fueron de: 1460 HV para los carburos de niobio, 1150 HV para los carboboruros de Mo/W, de 920 HV para los carboboruros de Fe/Cr y de 695 HV para el eutéctico. Se observó que la microdureza de la zona bifásica o eutéctica varió en función del número de capas siendo menor para las probetas soldadas sin gas de protección. Esto estaría relacionado con la disminución de la cantidad en volumen del carboboruro eutéctico M_7X_3.

En la figura 9 se muestran los perfiles horizontales de dureza de los diferentes cupones.

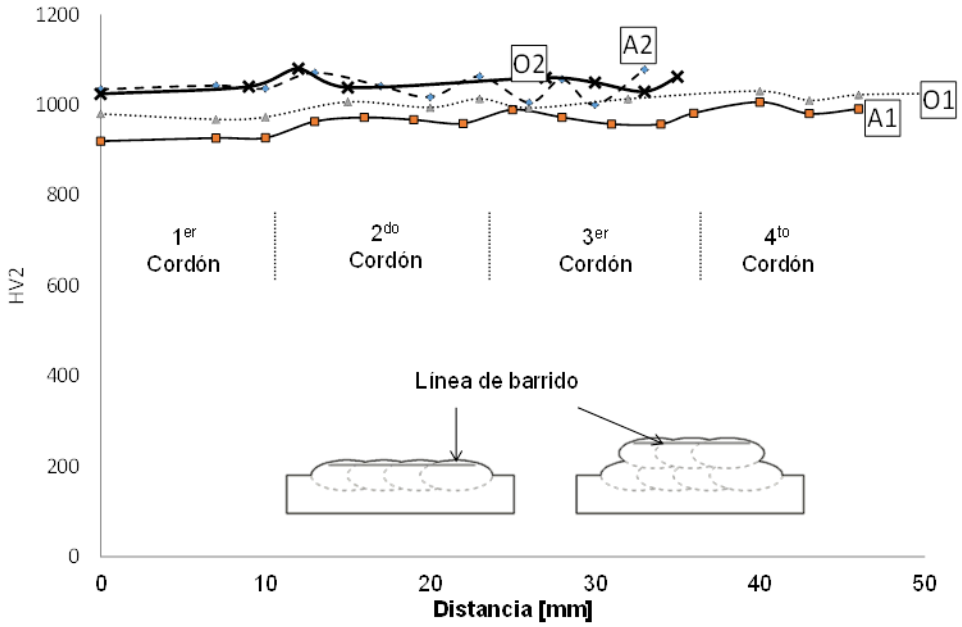


Figura 9: Gráfica de los barridos de dureza los cupones realizados a 1 mm de la superficie superior.

En la figura 9 se observa que la dureza HV2, dureza del depósito, estuvo entre los 900 y los 1100 HV, esto es consistente con lo reportado para este tipo de materiales [17, 18]. Se puede ver que las probetas con dos capas presentaron las mayores durezas. Esto se explicaria por alta fracción de fases de duras en ambas condiciones producto de su mayor contenido de elementos de aleación, ver tabla 2. No se observaron grandes diferencias en función del tipo de protección gaseosa.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. CONCLUSIONES.

- La probeta soldada con gas presentó mayores niveles de salpicaduras y poca escoria. Se observaron fisuras transversales que se generaron durante el enfriamiento del cordón, producidas por el alivio de tensiones, típico en estos materiales.
- El material depositado presentó una alta concentración de elementos de aleación, dentro del sistema Fe-(Nb,Cr,Mo,W)-(C,B).
- La microestructura estuvo formada por α-Fe y γ-Fe, detectándose la presencia de carboboruros metálicos ((Cr,Fe)7(B,C)3, (Cr,Fe)23(B,C)6). También se identificaron carburos de Nb para todas las probetas. El tamano de cristalito fue de entre 50-90 nm. El porcentaje de carburos y carboboruros fue mayor al 70%. Se observó un leve aumento de γ-Fe y de los carboboruros (Cr,Fe)7(B,C)3 en las probetas soldadas bajo proteccion gaseosa y con dos capas.
- Se encontraron carburos de niobio de tamaño de 2 a 4 μm, caboboruros de Mo/W de forma en bloque de 10μm para la primer capa y de 20 μm para la de dos capas, carboboruros alargados M23X6 de 10 a 15 μm de ancho y el eutéctico formado de láminas planas y globulares de espesor 1 a 3 μm de precipitados del tipo M7X3 en una matriz α-Fe.
- Las microdurezas de fases fueron de: 1460 HV para los carburos de niobio, 1150 HV para los carboboruros de Mo/W, de 920 HV en los carboboruros de Fe/Cr y el eutéctico de 695 HV. Se observó que la microdureza de la zona bifásica o eutéctica varió en función del número de capas siendo menor para las probetas soldadas sin gas de protección.
-La dureza del depósito, estuvo entre los 900 y los 1100 HV. Las probetas con dos capas presentaron las mayores durezas. No se observaron grandes diferencias en función del tipo de protección gaseosa

5. REFERENCIAS.

[1] Amado JM, Tobar MJ, Alvarez JC, Lamas J, Yáñez A. *Laser cladding of tungsten carbides (Spherotene1) hardfacing alloys for the mining and mineral industry*. Appl Surf Sci 2009; 255:5553–6.

[2] Badisch E, Katsich C, Winkelmann H, Franek F, Roy M. *Wear behaviour of hardfaced Fe–Cr–C alloy and austenitic steel under 2-body and 3-body conditions at elevated temperature*. Tribol Int 2010; 43:1234–44.

[3] Coronado JJ, Caicedo HF, Gómez AL. *The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits*. Tribol Int 2009;42:745–9.

[4] Azimi G, Shamanian M. *Effect of silicon content on the microstructure and properties of Fe–Cr–C hardfacing alloys*. J Mater Sci 2010;45:842–9.

[5] Sapate SG, Selokar A, Garg N. *Experimental investigation of hardfaced martensitic steel under slurry abrasion conditions*. Mater Design 2010; 31(8):4001–6.

[6] Kim JH, Ko KH, Noh SD, Kim GG, Kim SJ. *The effect of boron on the abrasive wear behavior of austenitic Fe-based hardfacing alloys*. Wear 2009; 267:1415–9.

[7] Hou QY, He YZ, Zhang QA, Gao JS. *Influence of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based alloy coating obtained by plasma transferred arc process*. Mater Design 2007; 28(6):1982–7.

[8] Buchely MF, Gutierrez JC, León LM, Toro A. *The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys*. Wear 2005; 259:52–61.

[9] Gramajo N.J.; Gualco, A.; Svoboda, H.G.; Surian, E.S. *Influencia del aporte térmico en recargues duros multicomponentes (Cr, Mo, W, Nb, C, B) base hierro nanoestructurados depositados por FCAW*, XLI Consolda, Salvado Bahia, Brasil, 12-15, octubre, 2015.

[10] Gramajo N.J.; Gualco, A.; Svoboda, H.G.; Surian, E.S, *Caracterización microestructural de depósitos nanoestructurados base Fe-(Nb,Cr,Mo,W)-(C,B)*. SAM/CONAMET, 17-20 de noviembre 2015, Concepción, Chile.

[11] Cullity, B.D.; Stock, S.R. *Elements of X-ray diffraction*. 3 ed. Prentice Hall. 2001. 520 p.

[12] Software de análisis de espectros de difracción: Xpowder, versión 2004.

[13] Norrish J., *Advanced welding process-Technologies and process control*. Woodhead Publishing Limited. 2006.

[14] Inoe A. ; *"Amorphous and nanocrystalline materials: Preparation, properties, and applications"*; Springer, p.206, 2010.

[15] Gleiter. H., *Nanostructured materials: basic concepts and microstructure*. Acta Materialia. v.48. n.1. pp. 1-29. 2000.

[16] Weissmiiller J., *"Some basic notions on nanostructured solids"*; Materials Science and Engineering, A Vol.179-180, p. 102-107, 1994.

[17] Branagan D.J., Marshall M.C. and Meacham B.E, *"High toughness high hardness iron based PTAW weld materials"*; Materials Science and Engineering A 428, p. 116–123, 2006.

[18] Kirchgabner M.; Badish E.; Franek F. *Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasión and impact*, Wear 265, pp. 772-779, 2008.

Agradecimientos

Los autores agradecen a EUTECTIC-CONARCO Argentina por la provisión del consumible utilizado, a AIR LIQUIDE Argentina por la donación de los gases de soldadura, a EUTECTIC-USA por la realización de los análisis químicos, al LABORATORIO DE MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE INTI - MECÁNICA por la realización de la microscopía electrónica de barrido, y a APUEMFI

(Asociación de Profesores Empresarios Área Mecánica de la Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional de Lomas de Zamora) por el apoyo económico al presente proyecto.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LA TRANSMITANCIA TÉRMICA EN DIVERSOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

J. Molina*[1], D. Sartorio[2], I. Vasquez[3], G. Bóveda[4]

*[1]Laboratorio de Mecánica y Energía – Ingeniería Mecánica – Ingeniería Electromecánica - Universidad Nacional de Asunción – Barrio Villa Universitaria Campus Universitario
San Lorenzo - Paraguay
correo-e: dsartorio@ing.una.py
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la influencia de la humedad en la transmitancia térmica de diversos materiales de construcción tales como ladrillo común, ladrillo refractario, mortero de Cemento, losa de Hormigón, tejuela Cerámica, tejuela hueca de Cerámica, fabricados íntegramente en el Paraguay. Para la realización de las mediciones se fabricó un calorímetro capaz de aislar de las condiciones exteriores al conjunto de medición, con materiales existentes en el mercado nacional, siguiendo las normas ASTM C-177, NCh of850, BS 874, ISO 8302. Para deshidratar los materiales de fabricó una cámara de secado al vacío preparada especialmente. Las pruebas evidenciaron que la transmitancia térmica y la conductividad térmica aumentan con el contenido de humedad del material.

Palabras Claves: *transmitancia térmica, conductividad térmica, calorímetro.*

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el Paraguay no presenta problemas de capacidad de generación de energía eléctrica, pero esto no está garantizado para el futuro, es por eso que debemos dar énfasis a políticas ambientalistas. Esto nos situará en un contexto en el cual se debe buscar un desarrollo sustentable y de eficiencia energética, con bajo impacto sobre el medio ambiente. Ello también debe conseguirse en el ámbito de la construcción, especialmente en el acondicionamiento térmico de edificios, viviendas familiares etc.

Los mecanismos de transferencia de calor se tornan cada vez más estudiados y analizados, debido a que éstos desempeñan un papel fundamental en el diseño y cálculo de refrigeración de todo tipo de ambientes (edificios, cámaras frigoríficas, etc.), también en el diseño de vehículos, maquinarias que operan con calor (motores de combustión interna, calderas, etc.), aparatos electrónicos, entre otros. El calor se transfiere de tres maneras diferentes que son la conducción, convección y radiación. En el caso de los materiales sometidos a un gradiente de temperatura existe una magnitud llamada transmitancia térmica y es la medida de la facilidad que ofrece el material al flujo de calor que fluye por él cuándo está sometido a un gradiente de temperatura. En el Sistema Internacional se mide en unidades $W/m^2\ ^oC$ o en W/m^2K, (Donde, W: Vatios, m^2: metros cuadrados, C: Celsius, K: Kelvin) [1].

Dichos valores se ven alterados por diversos factores entre los que destacan la densidad, la temperatura y el contenido de humedad. Los tipos de humedades que se pueden manifestar en los edificios son: humedad de construcción, humedad proveniente del suelo, humedades de condensación producto del uso del edificio, humedades de lluvia y humedades accidentales.

La transmitancia térmica depende de la densidad del material. La materia por sí misma es más conductora que el aire contenido en los poros, con lo cual a mayor densidad mayor conductividad térmica. Pero este comportamiento no es absoluto pues también interviene la forma y orientación de los poros, por lo cual en la madera la conductividad térmica es mayor en el sentido de las fibras que en sentido perpendicular.

También influye la naturaleza química del material. Por ejemplo los materiales calcáreos son menos conductores que los materiales cristalinos, lo cual explica porque a igual densidad los hormigones de escoria son más aislantes que los hormigones de agregados ordinarios. La humedad del material también influye pues el agua es más conductora que el aire, cuando ocupan los poros del material, y por ende aumenta la conductividad.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con el presente trabajo se busca determinar la influencia de la humedad en la transmitancia térmica de algunos materiales de construcción de superficie plana. Se considera la transferencia de calor por conducción y un flujo de calor unidireccional. Las mediciones se realizaron en el calorímetro de placa caliente guardada, a una temperatura máxima de 40 º C y una mínima de entre 30 º y 19 º C. La humedad contenida en los materiales serán las adquiridas por sumergirlos en agua durante un periodo de tiempo previamente determinado. Las dimensiones de los materiales a medir son de 300x300 mm y espesores de entre 10 mm y 100 mm. Se ha realizado una fase experimental de dos etapas: extraer la humedad contenida en las distintas probetas mediante una cámara de secado al vacío y la determinación de la transmitancia térmica de dichas probetas con distintos índices de humedad utilizando el método de “La placa caliente guardada”. Los materiales a ensayar son: Mortero de Cemento, Ladrillo común, Ladrillo refractario, Losa de Hormigón, Tejuela Cerámica, Tejuela hueca de Cerámica.

2. Proceso Experimental

La metodología a seguir para cada material es la descrita a continuación:

Se realiza primero el secado del material en la cámara de secado al vacío, el tiempo de secado depende en su mayoría de la densidad (porosidad) del material. Como regla general se opta por dejar un mínimo de 48 horas en la cámara de secado al vacío y verificar luego en intervalos de 3 horas la masa de la misma hasta que esta sea constante, la cual no debe variar más de 1,00 gramo entre medidas consecutivas como establece la norma ASTM D2216-71[4].

Una vez obtenido el material totalmente seco, se procede inmediatamente a medir la masa de la misma (masa seca), y luego a la medición de la transmitancia térmica en el calorímetro. Antes de ingresar en el calorímetro se procede a envolver la probeta en papel film minimizando la migración de la humedad hacia el material durante las mediciones, tratando de evitar burbujas de aire al envolverlo ya que estos pueden distorsionar las mediciones al actuar como aislantes entre la probeta y los sensores (evitar que en la zona donde va ubicada la termopila este cubierta por papel film).

Determinada la transmitancia térmica del material en estado seco, se procede a sumergir la probeta totalmente en agua durante un mínimo de 72 horas y verificar luego en intervalos de 3 horas hasta masa constante, siguiendo siempre las recomendación de la norma citada anteriormente para el secado del material, para la medición de la masa de la probeta se seca superficialmente para obtener un material de masa saturada superficie seca que es la que recomienda la norma.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Una vez obtenida la masa húmeda se procede a determinar su transmitancia térmica en el calorímetro, previamente envuelto en papel film para evitar perdida de humedad durante la medición, evitando siempre la formación de burbujas de aire al envolverlo (evitar que en la zona donde va ubicada la termopila este cubierta por papel film). Ya obtenida la masa seca y la masa húmeda, se procede a determinar la masa para la cual el material tenga un 50% de saturación para obtener un punto intermedio entre estas dos, de manera a obtener la curva Transmitancia vs Humedad (%).

$$\%\,\boldsymbol{de\ humedad} = \frac{masa_{humeda} - masa_{seca}}{masa_{seca}} \times \mathbf{100} \qquad (1)$$

Luego se halla la masa que posee 50% de saturación

$$\boldsymbol{masa_{50\%}} = \boldsymbol{masa_{seca}} + \frac{masa_{humeda} - masa_{seca}}{\mathbf{2}} \qquad (2)$$

Calculada la masa teórica para una saturación de 50%, se procede a dejarlo secar al ambiente hasta la masa teórica calculada. Ya calculada la masa que posee 50% de saturación, se mide su transmitancia térmica en el calorímetro, previamente envuelto en el papel film, siguiendo los pasos descriptos para la operación del calorímetro anteriormente. Obtenido los tres valores de transmitancia de un mismo material para diferentes contenidos de humedad (0% 50% y 100%) se procede a graficar la curva de las propiedades térmicas (conductividad, resistencia y transmitancia) en función del contenido de humedad.

2.1. Cámara de Secado al vacío.

La cámara de secado al vacío con todos los componentes necesarios: tanque modificado, manómetro de baja presión, bomba de vacío, la banda calefactora, se aprecia en la Figura 1.



Figura 1. Cámara de Secado al Vacío y bomba de vacío. Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

El perfil de temperatura puede ser visualizado en la Figura 2.

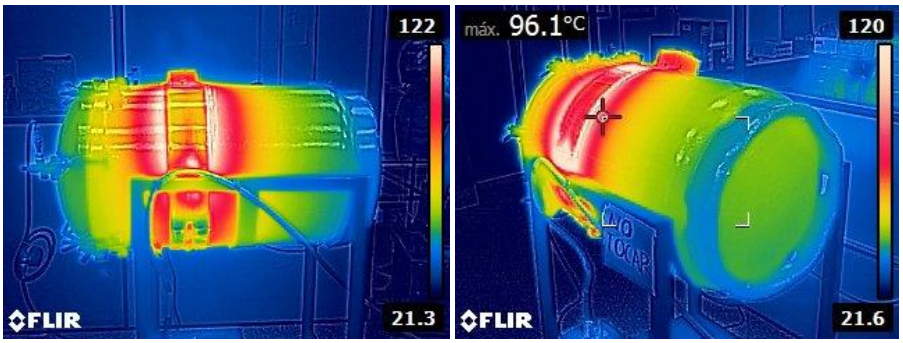


Figura 2. Perfil de temperatura en la cámara de vacío. Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Pasos para la operación de la cámara de vacío:

a. Introducir el material a secar y cerrar la cámara mediante el mecanismo de cierre bulón-tuerca mariposa ubicados radialmente por la circunferencia del tanque como se puede observar en la Figura 1, y asegurarse de un cierre bien hermético.

b. Conectar la manguera con el manómetro de baja presión a la entrada de la bomba de vacío, utilizar en las uniones roscadas cinta teflón para asegurar una unión más estanca.

c. Dejar funcionar la bomba hasta alcanzar la presión máxima de vacío (aprox. 20 in Hg de vacio), una vez alcanzada la presión de trabajo (15 minutos aproximadamente), se debe reapretar las mariposas de cierre debido a que la presión de vacío tiende a succionar la tapa y por consiguiente presionar la junta de estanqueidad ubicada entre el cuerpo de la cámara y la tapa, así las mariposas de sujeción quedan flojas de vuelta, por eso la importancia de repetir el paso 1 para evitar la entrada de aire dentro de la cámara.

d. Encender la banda calefactora y regular el termostato a una temperatura de 200°C. Una vez alcanzada dicha temperatura, actuará el termostato manteniéndola en un rango 200°C ± 1°C.

e. Hacer funcionar la bomba de vacío intermitentemente, a intervalos de 2 horas, por un periodo de 15 minutos, de manera a evacuar toda la humedad liberada por el material y mantener la presión de trabajo.

2.2. Calorímetro.

Para medir las propiedades térmicas de los materiales de construcción, se utilizó un calorímetro de placa caliente guardada fabricado primeramente por la Ingeniera Rocío Carolina Suárez Rolón en el año 2012, modificado por los Ingenieros Alan Delgado y José Agüero en el año 2014[2] y [3], el

cual se encuentra en el Laboratorio de Mecánica y Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA). El equipo fue elaborado en base a las normas ASTM C177 [5], ISO 8302 [6], BS 874 [7] y AFNOR NFX10-021[8]. Partes del Calorímetro, como la carcasa aislada, la fuente caliente, las resistencias eléctricas, la fuente fría y la fuente caliente, se observan en la Figura 3.

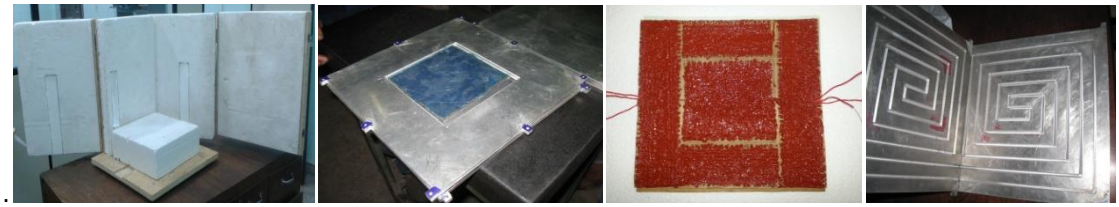


Figura 3. Partes del Calorímetro. Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

2.3. Instrumentos principales de medición.



Figura 4. Termo higrómetros y Fuente de CC regulada de 3 canales, marca MINIPA. Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción, Paraguay



Figura 5. Termostato digital, TRSYS01 medidor de flujo de calor y temperatura, Sensor de flujo de calor HFP01. Fuente: Elaboración Propia, Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

2.4. Prueba inicial

Según los datos proporcionados por el TRSYS01 la diferencia de temperatura entre la placa caliente y la placa fría se mantiene en el intervalo recomendado de la norma NCh850 [9] (de 5°C a 10°C) como se puede apreciar en la Figura 6. Con este grafico se demuestra que obviar el sistema de refrigeración para la placa fría no influye en el experimento y además se ahorra en complicaciones a la hora de instalarlo.

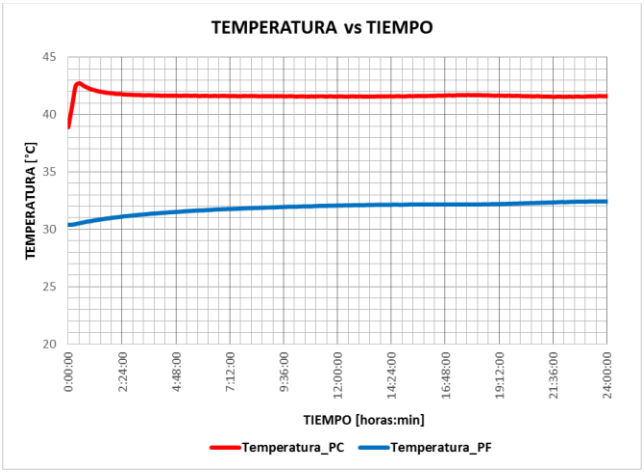


Figura 6.Prueba inicial, Temperatura de la placa caliente y la placa fría
Fuente: Elaboración propia

La Figura 7, corresponde al flujo de calor medido por el TRSYS01. Considerando la forma de la curva del flujo medio (color negro), esta varia con el tiempo y se mantiene así en todo el experimento, por lo tanto, el flujo de calor que pasa a través de la probeta no entra en un estado de régimen permanente ($\frac{df}{dt} \neq 0$) durante el experimento.

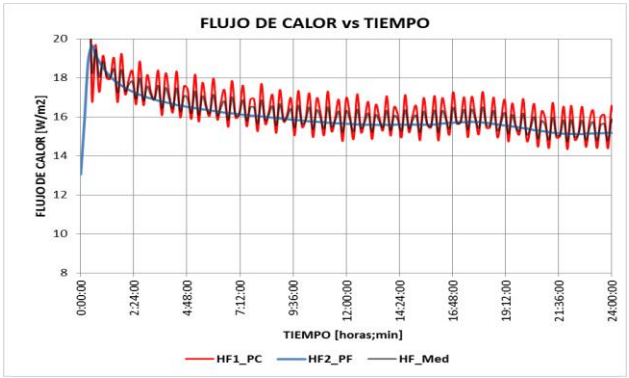


Figura 7.Prueba inicial-Flujo de calor vs Tiempo
Fuente: Elaboración propia

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las normas ASTM C177 y NCh850 establecen que se debe tener un mínimo de 5 mediciones que no sobrepase el 2% de variación con respecto a la media de las mediciones, en la Figura 8, se observa que no se cumple la exigencia de las normas citadas anteriormente.

Se concluyó que la constante variación del flujo medio de calor se debe a la acción del termostato incorporado al calorímetro el cual mantiene en un rango de temperaturas a la placa caliente, la acción repetida del termostato se debe a que el punto de operación o potencia suministrada a la placa caliente es muy superior a la potencia necesaria para que esta opere a 40°C sin que la acción del termostato impida que el flujo medio de calor ingrese a un estado de régimen permanente, en consecuencia se debe proporcionar una potencia menor para el siguiente experimento y así encontrar el nuevo punto de operación del calorímetro.

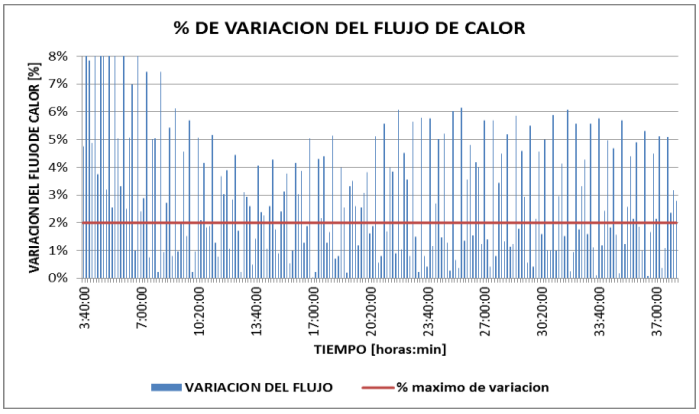


Figura 8.Prueba inicial-% de variación del flujo de calor con respecto a la media
Fuente: Elaboración propia

2.5. Pruebas posteriores - Nuevo punto de operación

La potencia suministrada a la placa caliente inicialmente (11V, 0,64 A) fue superior a la necesaria. Se realizaron varias pruebas con distintas tensiones e intensidades de corrientes, hasta llegar a la potencia con que el nuevo calorímetro modificado puede funcionar correctamente. Esta potencia debe ser menor a la del punto inicial de partida. Después de las múltiples pruebas realizadas, la potencia deseada se obtiene con10V y 0.58 A, y se consigue resultados favorables conforme a las normas utilizadas en el trabajo.

3. Análisis de resultados

3.1. Influencia de la humedad en la Transmitancia térmica - Mortero de cemento

Datos de la probeta Mortero de cemento

- Dimensiones = 300 x 300 [mm2].

- Espesor = 37 [mm].
- Temperatura media del ensayo = 22 [ºC]

La temperatura del laboratorio durante las mediciones controlamos mediante dos acondicionadores de aire de 24.000 BTU cada uno. En la Tabla 1 se tienen los valores y el aumento de Transmitancia térmica, con los distintos contenidos de humedad.

Tabla 1. Influencia de la humedad en la Transmitancia Térmica - Mortero de cemento.

Fuente: Elaboración Propia

Humedad [%]	Transmitancia [W/m2.K]
0	12.493
46	19.361
100	24.423

Humedad [%]	Transmitancia [%]
0-46	54.98%
0-100	95.49%

Con estos valores, se obtiene el Gráfico de la figura 9.

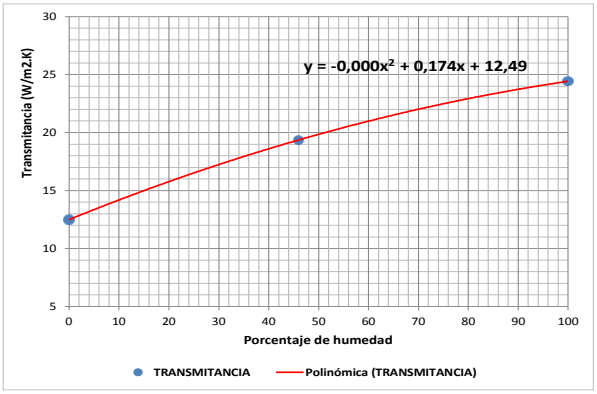


Figura 9. Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica - Mortero de cemento

Fuente: Elaboración propia

3.2. Influencia de la humedad en la Transmitancia térmica - Tejuela Cerámica

Dimensiones = 300 x 300 [mm2].

Espesor = 12 [mm].

Temperatura media del ensayo = 22 [ºC]

Tabla 2. Influencia de la humedad en la Transmitancia Térmica - Tejuela Cerámica.

Fuente: Elaboración Propia

Humedad [%]	Transmitancia [W/m2.K]
0	16,620 ± 0,132
47	24,435 ± 0,160
100	30,600 ± 0,221

Humedad [%]	Transmitancia [%]
0-47	47.02%
0-100	84.12%

Con estos valores, se obtiene el Gráfico de la figura 10.

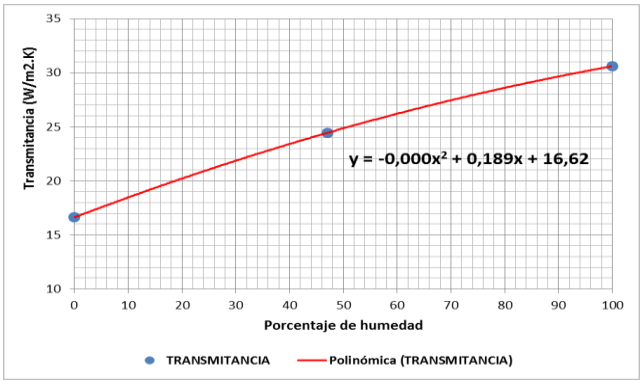


Gráfico 10. Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica - Tejuela Cerámica

Fuente: Elaboración propia

3.3. Influencia de la humedad en la Transmitancia térmica – Hormigón

Dimensiones = 300 x 300 [mm2].

Espesor = 25 [mm].

Temperatura media del ensayo = 22 [ºC]

Tabla 3. Influencia de la humedad en la Transmitancia Térmica - Hormigón.

Fuente: Elaboración Propia

Humedad [%]	Transmitancia [W/m2.K]
0	13,171 ± 0,138
47	14,062 ± 0,200
100	24,880 ± 0,213

Humedad [%]	Transmitancia [%]
0-47	6.76%
0-100	88.90%

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con estos valores, se obtiene el Gráfico de la figura 11.

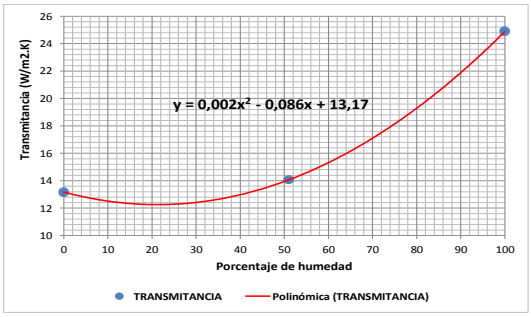


Figura 11. Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica - Hormigón.

Fuente: Elaboración propia

3.4. Influencia de la humedad en la Transmitancia térmica - Ladrillo Cerámico

Dimensiones = 300 x 300 [mm2].

Espesor = 55 [mm].

Temperatura media del ensayo = 22 [ºC]

Tabla 4. Influencia de la humedad en la Transmitancia Térmica - Ladrillo Cerámico.

Fuente: Elaboración Propia

Humedad [%]	Transmitancia [W/m2.K]
0	6,690 ± 0,271
47	19,137 ± 0,386
100	19,347 ± 0,419

Humedad [%]	Transmitancia [%]
0-53	186.07%
0-100	189.20%

Con estos valores, se obtiene el Gráfico de la figura 12.

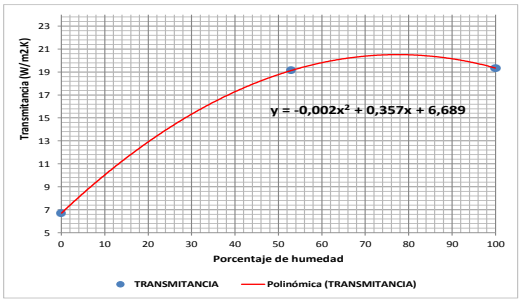


Gráfico 12. Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica - Ladrillo Cerámico.

Fuente: Elaboración propia

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.5. Influencia de la humedad en la Transmitancia térmica - Ladrillo Común

Dimensiones = 300 x 300 [mm2].

Espesor = 30 [mm].

Temperatura media del ensayo = 22 [ºC]

Tabla 5. Influencia de la humedad en la Transmitancia Térmica - Ladrillo Común.

Fuente: Elaboración Propia

Humedad [%]	Transmitancia [W/m2.K]
0	5,566 ± 0,048
47	11,551± 0,195
100	11,788 ± 0,133

Humedad [%]	Transmitancia [%]
0-49	107.53%
0-100	111.78%

Con estos valores, se obtiene el Gráfico de la figura 13.

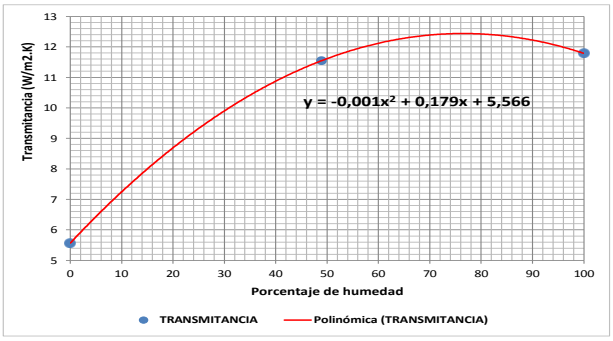


Gráfico 13. Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica - Ladrillo Común.

Fuente: Elaboración propia

3.6. Influencia de la humedad en la Transmitancia térmica – Tejuela Cerámica Hueca

Dimensiones = 300 x 300 [mm2].

Espesor = 25 [mm].

Temperatura media del ensayo = 22 [ºC]

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 6. Influencia de la humedad en la Transmitancia Térmica - Tejuela Cerámica Hueca.

Fuente: Elaboración Propia

Humedad [%]	Transmitancia [W/m2.K]
0	6,560 ± 0,065
55	12,608± 0,139
100	13,805 ± 0,247

Humedad [%]	Transmitancia [%]
0-55	92.19%
0-100	110.43%

.Con estos valores, se obtiene el Gráfico de la figura 14.

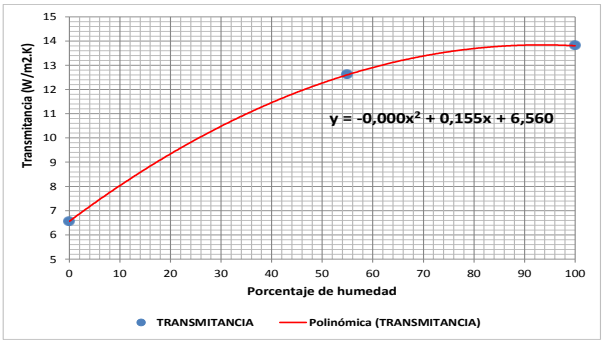


Figura 14. Influencia de la Humedad en la Transmitancia Térmica - Tejuela Cerámica Hueca.

Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

Utilizar datos estandarizados de otros países en lo que a propiedades térmicas de materiales de construcción se refiere no es una solución adecuada, ya que estos presentan un comportamiento diferente según el medio ambiente al que se encuentra (tipo de clima), el método de fabricación y el tipo de materia prima que se utiliza en cada país. Por lo cual es importante la caracterización de los materiales de construcción de acuerdo al país en el que es fabricado, ya que la influencia del tipo de clima determina su verdadero desempeño. Se ha desarrollado un método tanto para el deshidratado de los materiales de construcción y medición de la transmitancia térmica, y los resultados son aplicables en el campo de la ingeniería.

5. Conclusiones

Esta discusión, impulsó a efectuar varias mediciones para la determinación de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales para lograr el objetivo específico propuesto, con resultados satisfactorios. Logros específicos puntuales:

- Para la realización de las mediciones se fabricó un calorímetro capaz de aislar de las condiciones exteriores al conjunto de medición, con materiales existentes en el mercado nacional, siguiendo las normas ASTM C-177, NCh of850, BS 874, ISO 8302.
- Para deshidratar los materiales de fabricó una cámara de secado al vacío preparada especialmente. La cámara de secado funciona a una presión máxima de vacío de aproximadamente 20 in Hg satisfactoria conforme a las bibliografías especificadas.
- Se han realizado las mediciones de la transmitancia térmica considerando la variación de la humedad de los materiales. Los errores de medición obtenidos fueron menores al 1%, las bibliografías establecen como valor admisible menor o igual al 2%.
- Se ha verificado que la resistencia térmica disminuye con el contenido de humedad, la transmitancia térmica y la conductividad térmica aumenta con el contenido de humedad del material.

REFERENCIAS

[1] Andrade, R. M. (2007). VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA CON LA HUMEDAD. Santiago de Chile: Tesis-Universidad de Chile- Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas.

[2] Agüero, Delgado (2014). Determinación de la Transmitancia Térmica en Diversos Materiales de Construcción. San Lorenzo Paraguay.

[3] Rolon, R. C. (2012). Diseño, elaboracion y calibracion de un Prototipo de Equipo de Placa Caliente Guardada.San Lorenzo.

[4] ASTM D2216-71 “Standard Method of Laboratory Determination Of Moisture Content Of Soil”

[5] ASTMC-177-04“Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus”.

[6] ISO 8302 “Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Guarded hot plate apparatus”

[7] BS 874 “Methods for determining thermal insulating properties. Tests for thermal transmittance and conductance. Calibrated hot-box method”

[8] AFNOR NFX10-021 “Matériaux faiblement conducteurs - Détermination de la conductivité thermique - Méthode de la plaque chaude gardée avec échantillons symétriques”

[9] NCh 850/2008. Aislación térmica - Determinación de resistencia térmica en estado estacionario y propiedades relacionadas.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Laboratorio de Mecánica y Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción, Paraguay, por el apoyo en la realización de este trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE VIGAS CONSTITUIDAS POR MATERIAL FUNCIONALMENTE GRADUADO

Gonzalo J. Gilardi [1,2], Ignacio H. Díaz Valdez [1], Diana V. Bambill [1,2], Carlos A. Rossit [1,2] y Federico Romero [1,2]

[1] Departamento de Ingeniería - Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
correo-e: gonzalo.gilardi@uns.edu.ar, hi.vd84@gmail.com, dbambill@criba.edu.ar, carossit@criba.edu.ar,federico.romero@uns.edu.ar
[2] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

RESUMEN

En los últimos años, se ha producido un notable avance en el estudio y utilización, en elementos resistentes, de materiales avanzados cuyas propiedades varían gradualmente con alguna de sus dimensiones (FGM por sus siglas en inglés). Las características del material adquieren mayor importancia, cuando el elemento se encuentra en entornos vibratorios (maquinarias, vehículos) considerando la influencia del efecto inercial. En particular, en el elemento estructural de utilización más difundida, la viga, puede resultar conveniente que las propiedades del material varíen a lo largo del eje. En ese caso, el problema dinámico de la viga vibrante conduce a que las ecuaciones que representan el problema posean coeficientes variables dificultando sobremanera su tratamiento matemático. Es por ello que, en general, para la determinación de los parámetros que caracterizan su comportamiento dinámico es necesario recurrir a métodos aproximados.

En el presente trabajo se utilizan el Método de Cuadratura Diferencial Generalizada y el Método de Ritz para analizar el comportamiento dinámico de vigas constituidas por materiales (combinación de acero y alúmina) cuyas propiedades varían funcionalmente a lo largo de su directriz. Las ecuaciones que representan el movimiento de la viga son formuladas en base a principios energéticos. Se evalúan variados ejemplos numéricos con distintas condiciones de borde y diversos tipos de materiales de propiedades variables. Se analiza el efecto de rigidización dinámica que se logra en algunos casos. Los resultados concuerdan con situaciones particulares del modelo, disponibles en la literatura científica. Se demuestra que los métodos utilizados constituyen herramientas eficientes y precisas en la solución de un problema de moderna aplicación tecnológica y de singular complejidad analítica.

Palabras Claves: *Material funcionalmente graduado, FGM, vibración vigas, Método de Cuadratura Diferencial Generalizada, Método de Ritz.*

1. INTRODUCCIÓN

Las vigas son, quizás, el componente más difundido en la generalidad de las estructuras resistentes; y particularmente cuando se encuentran en entornos vibratorios adquiere esencial importancia el conocimiento de sus parámetros dinámicos. En las últimas dos décadas, ha adquirido particular trascendencia la utilización de materiales avanzados cuyas propiedades varían gradualmente con alguna de sus dimensiones (Funtionally Graded Materials –FGM-).

Los FGM fueron utilizados por primera vez por investigadores japoneses a mediados de la década del ochenta, Niino et al. [1]. A diferencia de los materiales compuestos, en estos materiales las interfaces abruptas son eliminadas y reemplazadas por una interfaz graduada que produce una transición suave entre un material y el próximo. Una de sus características propia y distintiva, es la capacidad de adaptarse a una aplicación específica.

Estos materiales se pueden fabricar mediante la variación del contenido en porcentaje de dos o más materiales, para que el nuevo material tenga propiedades con un gradiente deseado en las direcciones espaciales establecidas. En consecuencia, las tensiones térmicas y residuales, y los factores de concentración de tensiones que se hallan en los compuestos laminados, se reducen.

En virtud de las características favorables señaladas anteriormente, se han realizado numerables estudios sobre el comportamiento estático y dinámico de las estructuras resistentes con FGM. Inicialmente, la tarea investigativa estableció un gran avance en el campo de la Teoría de la Elasticidad y el estudio de placas y láminas construidas con FGM. Paradójicamente, su aplicación a vigas (Functionally Graded Beams-FGB-) trascendió posteriormente.

Sankar [2], estableció un modelo de FGB Euler–Bernoulli para tratar un problema estático en una viga simplemente apoyada. El correspondiente caso de vibraciones transversales libres fue estudiado por Aydogdu y Taskin [3]. Adicionalmente, Chabraborty et al. [4], desarrollaron un elemento finito para estudiar el comportamiento termoelástico de FGB. En los trabajos de Lu y Chen [5] y de Zhong y Yu [6] se desarrollan complejos procedimientos analíticos para resolver en forma exacta FGB dentro del marco de la Teoría de la Elasticidad. Todos los estudios citados se realizaron sobre la base de la teoría de Euler-Bernoulli, la cual describe la deformación de la viga y predice adecuadamente las frecuencias de vibración de los modos más bajos de vigas esbeltas.

Una revisión de la literatura revela que la mayoría de los primeros trabajos sobre FGB han considerado la gradación de las propiedades del material en la dirección transversal al eje de la viga. Siendo, muchos menos investigadores los que han considerado la variación de las propiedades del material en la dirección del eje (Axially Functionally Graded -AFG-). Probablemente, debido a que el problema se vuelve más complicado de resolver cuando aparecen coeficientes variables en las ecuaciones gobernantes. Algunas soluciones analíticas se han obtenido y para gradientes

específicos arbitrarios. Por ejemplo, Elishakoff et al. [7] mediante el método semi-inverso, trataron diversos casos particulares de vibraciones en vigas AFG. Huang y Li [8], resolvieron el problema mediante la transformación de la ecuación gobernante con coeficientes variables en una ecuación integral de Fredholm. Alshorbgy et al. [9] investigaron las características dinámicas de vigas no uniformes con gradación del material axialmente o transversalmente a la altura. Shahba y Rajasekaran [10] estudiaron las vibraciones y el pandeo de vigas Euler-Bernoulli AFG utilizando el método de elementos finitos. Çetin y Şimşek [11] en 2011, obtuvieron frecuencias de vibración libre de vigas AFG embebidas en un medio elástico. Gilardi et al. [12] estudiaron las vibraciones transversales libres de una viga Euler-Bernoulli AFG en voladizo con una masa concentrada en su extremo libre, empleando el método de Rayleigh-Ritz.

En el presente trabajo se estudian las vibraciones transversales libres de vigas AFG, aplicando los métodos aproximados de Rayleigh-Ritz [13] y cuadratura diferencial generalizada (Generalized Differential Quadrature Method-GDQM-)[14], con el objetivo de analizar el efecto de rigidización que genera el hecho de considerar dos materiales en una la ley de distribución axial, con o sin variación de la sección transversal, y como sus coeficientes de frecuencia se ven alterados en relación a una viga de material homogéneo.

2. MODELO DE ANÁLISIS

El modelo analizado corresponde a una viga de material AFG, de sección transversal A de doble simetría (rectangular) y variable en la dirección de su directriz. Se considera al eje $\bar{x}$ coincidente con el eje de la viga en la posición sin flexionar y al eje $\bar{y}$ perpendicular al eje $\bar{x}$ y con origen en el baricentro de la sección transversal inicial. En la Figura 1, se denota como L a la longitud de la viga, h a su altura y b a su ancho. Las características geométricas en la sección inicial se referencian con el subíndice "0" (b_0 y h_0) y para el extremo derecho con el subíndice "1" (b_1 y h_1).

3. GEOMETRÍA DE LA VIGA Y GRADACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

El hecho de considerar una viga de sección transversal variable y constituida por materiales con propiedades elásticas que varían gradualmente en la dirección axil, como E el módulo de Young y ρ la densidad de masa por unidad de longitud, requiere definir una expresión genérica $T(\bar{x})$ que contemple tanto la variación de la sección como la distribución de los materiales constituyentes.

$$T(\bar{x}) = T_0 \; f_T(\bar{x}) \tag{1}$$

Además, para el desarrollo de los cálculos, se adimensionaliza la coordenada espacial $\bar{x}$ respecto a la longitud L de la viga:

$$x = \bar{x} / L \quad \rightarrow \quad L.dx = d\bar{x} \tag{2}$$

Las propiedades del material y características geométricas pueden expresarse como:

$$E(x) = E_0 \; f_E(x) \; ; \; \rho(x) = \rho_0 \; f_\rho(x)$$
$$I(x) = I_0 \; f_I(x) \; ; \; A(x) = b(x)h(x) = A_0 \; f_A(x) \; ; \; b(x) = b_0 \; f_b(x) \; ; \; h(x) = h_0 \; f_h(x) \tag{3}$$

I es el momento de inercia de la sección transversal A.

Se consideraran dos leyes de variación axial para estudiar el comportamiento de la viga.

Ley de variación asimétrica:

$$T(x) = T_0 \left\{1 + \left[\left(T_1 / T_0\right) - 1\right] x^n\right\} \text{ con } \; f_T(x) = 1 + \left[\left(T_1 / T_0\right) - 1\right] x^n \tag{4}$$

Sean "a" y "b" los materiales que componen la viga, en $x = 0$, A es totalmente constituida por el material "a", $T_0 = T_a$, mientras que para $x = 1$ A es constituida por el material "b", $T_1 = T_b$.

Ley de variación simétrica:

$$T(x) = T_0 \left\{1 + 4\left(T_1 / T_0\right) - 1\right)\left(x - x^2\right)\right\} \text{ con } \; f_T(x) = 1 + 4\left(T_1 / T_0\right) - 1\right)\left(x - x^2\right) \tag{5}$$

En este caso, para $x = 0$ y $x = 1$, A es totalmente constituida por el material "a" mientras que para $x = 0.5$ es constituida por el material "b".

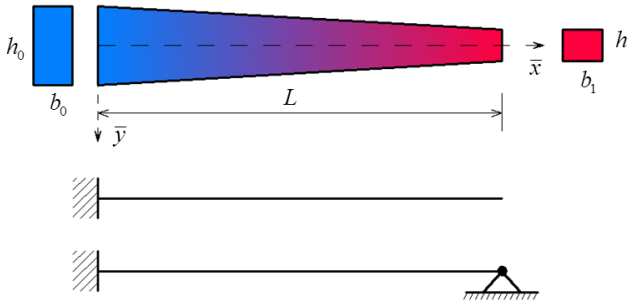


Figura 1. Esquema general

4. MÉTODOS APROXIMADOS

4.1. Método de Rayleigh-Ritz

Con el objetivo de encontrar los coeficientes de frecuencias naturales del sistema, la deflexión de la viga puede expresarse, para sus modos normales de vibración, como:

$$v(x,t) = V(x)\cos(\omega t) \tag{6}$$

donde $V(x)$ es la amplitud de desplazamiento y ω es la frecuencia natural de vibración transversal de la viga. Para aplicar el método es necesario aproximar el desplazamiento como:

$$V(x) \cong V_a(x) = \sum_{j=1}^{P} C_j \, \varphi_j \tag{7}$$

donde φ_j son las funciones coordenadas que satisfacen las condiciones de borde, C_j son constantes arbitrarias y P el número de términos a sumar.

El funcional de energía J para el problema de vibración de vigas en términos de la energía máxima de deformación $U_{máx}$ y de la energía cinética máxima $T_{máx}$ según la teoría de vigas de Euler-Bernoulli.

$$J = U_{máx} - T_{máx} \tag{8}$$

$$U_{máx} = \frac{1}{2}\int_0^1 \frac{E(x)\,I(x)}{L^3}\left[\frac{d^2V_a(x)}{dx^2}\right]^2 dx \;\; ; \;\; T_{máx} = \frac{1}{2}\omega^2 \int_0^1 \rho(x)\,A(x)\,L\left[V_a(x)\right]^2 dx \tag{9}$$

Se reemplaza la Ecuación (3) en la Ecuación (9) y posteriormente en la Ecuación (8), entonces:

$$J\left(V_a\right) = \frac{1}{2}\frac{E_0\,I_0}{L^3}\left\{\int_0^1 f_E\; f_I\left[\frac{d^2V_a}{dx^2}\right]^2 dx - \Omega^2 \int_0^1 f_\rho\; f_A\, L\left[V_a\right]^2 dx\right\} \tag{10}$$

donde $\Omega = \omega L^2\sqrt{\rho_0 A_0 / E_0 I_0}$ son los coeficientes de frecuencia. Luego el funcional se minimiza con respecto a cada constante arbitraria, y se llega a un sistema de ecuaciones lineales, el cual se traduce finalmente en la resolución del siguiente problema de autovalores $\lambda = \sqrt{\Omega}$:

$$\left|\mathbf{K}\mathbf{M}^{-1} - \Omega^2\,\mathbf{I}\right| = \left|\mathbf{B} - \lambda\mathbf{I}\right| = 0 \tag{11}$$

donde $\mathbf{I}$ es la matriz identidad, $\mathbf{K}$ es la matriz de rigidez y $\mathbf{M}$ la matriz de masa.

4.2. Método de Cuadratura Diferencial Generalizada

Partiendo de la ecuación diferencial gobernante de vibraciones trasversales libres para una viga Euler-Bernoulli AFG de sección transversal variable, el método consiste en transformar dicha ecuación en un sistema de ecuaciones lineales equivalente, denominadas ecuaciones análogas de cuadratura diferencial.

$$\kappa_1(x)\frac{d^2V(x)}{dx^2} + \kappa_2(x)\frac{d^3V(x)}{dx^3} + \kappa_3(x)\frac{d^4V(x)}{dx^4} = \Omega^2\,V(x) \tag{12}$$

Donde $\kappa_1(x)$, $\kappa_2(x)$ y $\kappa_3(x)$ son los coeficientes de forma.

$$\kappa_1 = \frac{f_E''\; f_I + 2.f_E'\; f_I' + f_E\; f_I''}{f_\rho\; f_A};\kappa_2 = \frac{2\left(f_E'\; f_I + f_E\; f_I'\right)}{f_\rho\; f_A}, \kappa_3 = \frac{f_E\; f_I}{f_\rho\; f_A} \text{ con } \; f_j' = \frac{df_j}{dx} \tag{13}$$

Siguiendo con el GDQM, la viga Euler-Bernoulli no homogénea es discretizada en una grilla de N puntos de prueba del tipo Chebyshev–Gauss–Lobato [15]:

$$x_i = \left\{1-\cos\left[(i-1)\pi/(N-1)\right]\right\}/2 \quad \text{con} \quad i=1,2,...N \tag{14}$$

Con x_i como la coordenada que ubica al nodo i .La derivada de orden (q) del desplazamiento V en el nodo i de la grilla, de acuerdo con las reglas del método [16], se expresa como:

$$\left.\frac{d^{(q)}V}{dx^q}\right|_{x_i} = \sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(q)} V_j \tag{15}$$

donde V_j es el desplazamiento del nodo j ,y $D_{ij}^{(q)}$ los coeficientes de ponderación obtenidos a través de las funciones de interpolación de Lagrange [17]:

$$\prod(x_i) = \prod_{j=1\ j\neq 1}^{N} (x_i - x_j) \quad \text{con} \quad i,j=1,2,...,N \tag{16}$$

$$D_{ij}^{(1)} = \frac{\prod(x_i)}{(x_i - x_j)\prod(x_j)},\ q=1 \ ;\ D_{ij}^{(q)} = D_{ii}^{(q-1)} D_{ij}^{(1)} - \frac{D_{ij}^{(q-1)}}{x_i - x_j},\ q>1 \text{; para } i \neq j \tag{17}$$

$$D_{ii}^{(1)} = -\sum_{j=1\ j\neq i}^{N} D_{ij}^{(1)},\ q=1 \ ;\ D_{ii}^{(q)} = -\sum_{j=1 con\ j\neq i}^{N} D_{ij}^{(q)},\ q>1; i,j=1,2,...,N \text{, para } i=j \tag{18}$$

Seguidamente, se aplica la regla definida en la Ecuación (15) para obtener la ecuación análoga de cuadratura para la ecuación diferencial gobernante, que resulta en:

$$\kappa_1(x_i)\sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(2)} V_j + \kappa_2(x_i)\sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(3)} V_j + \kappa_3(x_i)\sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(4)} V_j = \Omega^2 V_i \text{ con } i=3,4,...,N-2 \tag{19}$$

que junto con las condiciones de borde de la viga constituye el sistema diferencial del problema.

5. CASOS RESUELTOS

5.1. Viga en voladizo

De acuerdo con el método de Rayleigh-Ritz, se elige una función coordenada que satisfaga las condiciones de borde esenciales $\varphi_{(x=0)} = \varphi'_{(x=0)} = 0$.

$$\left\{\varphi_j\right\}_{j=1}^{P} = \left\{x^{j+1}\right\}_{j=1}^{P} \tag{22}$$

Con respecto a GDQM, las condiciones de bordes análogas de cuadratura son

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$V_i\Big|_{i=1}=0\ ,\ \sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(1)}\,V_j\Big|_{i=1}=0\quad ;\quad \sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(2)}\,V_j\Big|_{i=N}=0\ ,\quad \sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(3)}\,V_j\Big|_{i=N}=0 \tag{23}$$

En primer lugar se analiza un caso particular disponible en la literatura, a los efectos de corroborar la exactitud del procedimiento se modela la viga Euler-Bernoulli AFG de sección transversal rectangular ahusada, estudiada por Shaba y Rajasekaran [10].El caso corresponde a las leyes:

$$b(x)=b_0\left(1-c_b\,x\right)\ ;\ h(x)=h_0\left(1-c_h\,x\right)\ ;\ \rho(x)=\rho_0\left(1+x+x^2\right)\ ;\ E(x)=E_0\left(1+x\right) \tag{24}$$

Los coeficientes de frecuencias obtenidos se presentan en la Tabla 1 y se observa una muy buena concordancia con los valores obtenidos por los autores.

Tabla 1. Coeficientes de frecuencia $\Omega_i=\omega_i L^2\sqrt{\rho_0 A_0/E_0 I_0}$

	c_b	0.2		0.4		0.6		0.8	
	c_h	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2
M. Ritz	0.2	2.68633	17.7501	2.93357	18.2379	3.29935	18.9501	3.92194	20.2432
GDQM		2.68633	17.7501	2.93357	18.2379	3.29935	18.9501	3.92194	20.2432
Ref.[10]		2.6863	17.7501	2.9336	18.2379	3.2993	18.9501	3.9219	20.2432
M. Ritz	0.4	2.79874	16.4092	3.04857	16.8571	3.41810	17.5139	4.04714	18.7164
GDQM		2.79874	16.4092	3.04857	16.8571	3.41810	17.5139	4.04714	18.7164
Ref.[10]		2.7987	16.4092	3.0486	16.8571	3.4181	17.5139	4.0471	18.7164
M. Ritz	0.6	2.96994	14.9567	3.22368	15.3627	3.59847	15.9616	4.23553	17.0694
GDQM		2.96994	14.9567	3.22368	15.3627	3.59847	15.9616	4.23554	17.0694
Ref.[10]		2.9699	14.9567	3.2236	15.3627	3.5985	15.9616	4.2355	17.0694
M. Ritz	0.8	3.27943	13.3849	3.54015	13.7466	3.92322	14.2848	4.56946	15.2954
GDQM		3.27944	13.3850	3.54016	13.7467	3.92324	14.2849	4.56950	15.2957
Ref.[10]		3.2794	13.3849	3.5401	13.7466	3.9232	14.2848	4.5695	15.2955

En el presente trabajo, se utiliza un material AFG constituido por acero (Ac) y alúmina (Alum), propuesto por Su et al. [18].Las propiedades son $E_{Ac}=210GPa$, $\rho_{Ac}=7800kg/m^3$ y $E_{\mathrm{Alum}}=390\,GPa$, $\rho_{\mathrm{Alum}}=3960kg/m^3$ y las relaciones $E_{\mathrm{Alum}}/E_{\mathrm{Ac}}=1.857$ y $\rho_{\mathrm{Alum}}/\rho_{\mathrm{Ac}}=0.508$. Se ve que la alúmina es mucho más rígida y más liviana que el acero.

Los casos modelados corresponden a dos vigas Euler-.Bernoulli AFG, con sección transversal constante y variable, respectivamente. En primer lugar se analiza la viga con A constante y se considera la ley asimétrica para el material, Ecuación (4). En la Tabla 2, la primer fila (Ac-Alum).corresponde a la viga con sección de acero en $x=0$ y alúmina en $x=1$, variando de acuerdo a la Ecuación (4) con $n=2$; y la segunda (Alum-Ac).a una viga similar pero invirtiendo los materiales:

ISBN: 978-987-1676-63-7

alúmina en $x=0$ y acero en $x=1$ en la Ecuación (4) con $n=2$. M es la relación entre la masa de la viga analizada respecto a la masa de una viga de sección constante de acero.

$$M=\left(\rho_0/\rho_{\mathrm{Ac}}\right)\int_0^1 f_\rho(x)\, f_b(x)\, f_h(x)\, dx \tag{25}$$

Tabla 2. Coeficientes de frecuencia $\Omega=\omega L^2\sqrt{\rho_{Ac}A_0/E_{Ac}I_0}$

Var. Material	Métodos	Ω				
		Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5
Ac-Alum	M. Ritz	4.39522	26.9186	75.7360	148.515	245.538
$M=0.836$	GDQM	4.39522	26.9186	75.7360	148.515	245.538
Al-Ac	M. Ritz	5.14207	33.6746	94.2766	184.475	304.664
$M=0.672$	GDQM	5.14207	33.6746	94.2766	184.475	304.664

La Tabla 3 presenta los coeficientes de frecuencia para la viga de altura variable en forma lineal, Ecuación (4) y el material varia de forma cuadrática ($n=2$).

Tabla 3. Coeficientes de frecuencia $\Omega=\omega L^2\sqrt{\rho_{Ac}A_0/E_{Ac}I_0}$

$\frac{h_L}{h_0}$	Var. Material	Métodos	Ω				
			Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5
0.8	Alum-Ac	M. Ritz	5.26578	31.2825	85.2699	165.696	272.865
	$M=0.597$	GDQM	5.26578	31.2825	85.2699	165.697	272.865
0.6	Alum-Ac	M. Ritz	5.43948	28.7201	75.7164	145.740	239.030
	$M=0.521$	GDQM	5.43948	28.7201	75.7164	145.740	239.030
0.4	Alum-Ac	M. Ritz	5.70846	25.9275	65.3456	123.987	202.062
	$M=0.446$	GDQM	5.70846	25.9275	65.3456	123.988	202.062
0.2	Alum-Ac	M. Ritz	6.21082	22.8349	53.5622	98.9632	159.266
	$M=0.370$	GDQM	6.21087	22.8354	53.5638	98.9686	159.282

5.2. Viga empotrada-apoyada

Se modelan dos vigas Euler-Bernoulli AFG de sección trasversal constante, para la cual se analizan su las leyes de distribución del material asimétrica y simétrica, respectivamente. Los coeficientes calculados se muestran en la Tabla 4

Para aplicar el método de Rayleigh-Ritz se elige, en este caso, una función coordenada que satisfaga todas las condiciones de borde: $\varphi_{(x=0)}=\varphi'_{(x=0)}=0$ y $\varphi_{(x=1)}=\varphi''_{(x=1)}=0$.

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$\left\{\varphi_j\right\}_{j=1}^{P} = (2x^2 - 5x + 3).\left\{x^{j+1}\right\}_{j=1}^{P} \tag{25}$$

Con respecto a GDQM, las condiciones de bordes análogas de cuadratura son:

$$V_i\Big|_{i=1} = 0 \;,\; \sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(1)}\, V_j\Big|_{i=1} = 0 \quad ; \quad V_i\Big|_{i=N} = 0 \;,\; \sum_{j=1}^{N} D_{ij}^{(2)}\, V_j\Big|_{i=N} = 0 \tag{26}$$

Tabla 4. Coeficientes de frecuencia $\Omega = \omega L^2 \sqrt{\rho_{Ac} A_0 / E_{Ac} I_0}$

Var. Material		Métodos	Ω				
			Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5
Simétrica Ec.(5)	Ac-Alum-Ac	M. Ritz	25.2453	77.5621	160.062	272.557	415.124
	$M = 0.672$	GDQM	25.2453	77.5621	160.062	272.557	415.124
	Alum-Ac-Alum	M. Ritz	17.9158	59.9340	126.249	216.904	331.871
	$M = 0.836$	GDQM	17.9158	59.9340	126.249	216.902	331.863
Asimétrica $n = 0.5$ Ec.(4)	Ac-Alum	M. Ritz	23.5503	76.1715	158.911	271.753	414.696
	$M = 0.672$	GDQM	23.5520	76.1812	158.926	271.786	414.738
	Alum-Ac	M. Ritz	18.9174	61.3303	128.098	219.208	334.656
	$M = 0.836$	GDQM	18.9168	61.3278	128.093	219.199	334.643
Asimétrica $n = 1.0$ Ec.(4)	Ac-Alum	M. Ritz	20.9379	68.0893	142.275	243.450	371.612
	$M = 0.754$	GDQM	20.9379	68.0893	142.275	243.450	371.612
	Alum-Ac	M. Ritz	20.9028	68.0117	142.168	243.326	371.476
	$M = 0.754$	GDQM	20.9028	68.0117	142.168	243.326	371.476
Asimétrica $n = 2.0$ Ec.(4)	Ac-Alum	M. Ritz	18.5267	60.9005	127.561	218.473	333.634
	$M = 0.836$	GDQM	18.5267	60.9005	127.561	218.473	333.634
	Alum-Ac	M. Ritz	23.5626	76.2409	158.888	271.530	414.186
	$M = 0.672$	GDQM	23.5626	76.2409	158.888	271.530	414.186

6. CONCLUSIONES

El método de Rayleigh-Ritz y el GDQM han probado ser herramientas de gran eficiencia y precisión en la solución de un problema de elastodinámica de singular complejidad analítica.

En los casos numéricos expuestos es posible observar que el uso de los FGM en el diseño de vigas, frente a una viga de material uniforme, permite obtener coeficientes de frecuencia más altos, y se evidencia sobretodo en el coeficiente de frecuencia fundamental. Esta particularidad, además, viene acompañada de una reducción en la masa de la viga.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Si analizamos los coeficientes de frecuencia de la Tabla 2, se puede apreciar que para la distribución Alum-Ac estos son mayores frente a los de la distribución Ac-Alum. Esto se debe a que la rigidez de la alúmina aumenta la energía de deformación, a la vez disminuye el efecto de inercia con su densidad. Es decir tiene mayor incidencia, si la mayor concentración de alúmina está ubicada sobre la zona de mayor curvatura que si está en la zona de mayor desplazamiento.

Es por eso que el caso desarrollado en la Tabla 3, desea demostrar cómo se intensifica el efecto de rigidización de la alúmina a medida que la sección transversal final se reduce.

Para el caso de la viga empotada–apoyada, las zonas de mayor curvatura y mayor desplazamiento convergen alrededor de la zona central de la viga, y esto lleva a pensar que la mejor zona para colocar la alúmina es esa. Se evidencia en la Tabla 4 que realmente ocurre así si consideramos una ley de distribución simétrica. Pero, cuando la ley es asimétrica, la mejor ubicación dependerá del valor que se adopte para el exponente n de la Ecuación (4). Según los resultados, si $n \leq 1$ es más conveniente que la mayor concentración de alúmina esté entre la zona central y el apoyo, mientras que si $n > 1$ es más beneficioso que se ubique entre zona central y el empotramiento. Siempre sin perder de vista que el objetivo es obtener los mayores coeficientes de frecuencia.

7. REFERENCIAS

[1] Niino, M., Hirai, T. and Watanabe R. *The functionally gradient materials*. J Jap Soc Compos Mat., 13, 257-264, 1987.

[2] Sankar, B.V. *An elasticity solution for functionally graded beams*. Composites Science and Technology, 61,689–696, 2001.

[3] Aydogdu, M. and Taskin, V. *Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges*. Materials and Design, 28, 1651–1656, 2007.

[4] Chabraborty, A., Gopalakrishnan, S. and Reddy, J.N. *A new beam finite element for the analysis of functionally graded materials*. International Journal of Mechanical Sciences, 45,519–539, 2003.

[5] Lu, C.F. and Chen, W.Q. *Free vibration of orthotropic functionally graded beams with various end conditions*. Structural Eng. and Mech, 20, 465–476, 2005.

[6] Zhong, Z.and Yu, T. *Analytical solution of a cantilever functionally graded beam*. Composites Science and Technology, 67,481–488, 2007.

[7] Calio, I.and Elishakoff, I. *Closed-form trigonometric solutions for inhomogeneous beam-columns on elastic foundation*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 4, 139–146., 2004.

[8] Huang, Y. and Li, X.F. *A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section*. Journal of Sound and Vibration, 329, 2291–2303, 2010.

[9] Alshorbgy, A.E., Eltaher, M.A. and Mahmoud, F.F. *Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method*. Applied Mathematical Modelling, 35, 412–425, 2011.

[10] Shahba, A. and Rajasekaran, S. *Free vibration and stability of tapered Euler-Bernoulli beams made of axially functionally graded materials*. Applied Mathematical modelling, 36, 3094–3111, 2012.

[11] Çetin, D. and Şimşek, M. *Free vibration of an axially functionally graded pile with pinned ends embedded in Winkler-Pasternak elastic medium*. Structural Engineering and Mechanics, 40, 583–594, 2011.

[12] Gilardi, G.J., Bambill, D.V.,Rossit, C.A. *Free vibrations of an axially functionally graded beam with a concentrated mass,* PANACM 2015 "1st Pan-American Congress on Computational Mechanics In conjunction with the XI Argentine Congress on Computational Mechanics, MECOM 2015",ISSB: 978-84-943928-2-5, abril 2015, Bs.As.-Argentina.

[13] Ilanko, S., Monterrubio, L. E. and Mochida, Y. The Rayleigh-Ritz Method for Structural Analysis. Wiley & Sons, 1-32, 2014.

[14] Liu, G. R. and Wu, T. Y. Vibration analysis of beams using the Generalized Differential Quadrature Rule and Domain Decomposition. Academic Press, 246, 3,461-481, 2001.

[15] Zong Z. and Zhang Y.Y. Advanced differential quadrature methods. CRC Press, New York-USA, 2009.

[16] Bert, C. W. and Malik, M. Differential quadrature method in computational mechanics: A review. Applied Mechanics Review, 49, 1-28, 1996.

[17] Karami G., Malekzadeh P., and Shahpari S. A dqem for vibration of shear deformable nonuniform beams with general boundary conditions. Engineering Structures, 25, 1169–1178, 2003.

[18] Su, H., Banerjee, J.R. and Cheung, C.W. Dynamic stiffness formulation and free vibration analysis of functionally graded beams. Composite Structures, 106, 854–862, 2013.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Nacional del Sur (UNS), del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) y de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la provincia de Bs.As. para la realización del presente trabajo. Y al Dr.Felix Daniel H. por su valiosa contribución en el desarrollo de los algoritmos.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SIMULACIÓN Y ENSAYO DE RIGIDEZ TORSIONAL DE UN CHASIS DE UN VEHÍCULO TODO TERRENO

Andrés Martínez del Pezzo[1], Martín Diaz[2], Dario Noe[3], Benjamin Cavallin[1], Marcos Actis[1]

[1] UIDET – GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería de La Plata

Calle 48 y 116 La Plata. CP 1900. Contacto: amartinez.delpezzo@ing.unlp.edu.ar

[2] Dirección Nacional de Planificación y Política Industrial, Ministerio de Defensa. CABA.

[3] Comando de Arsenales. Ejército Argentino. San Isidro, Pcia de Buenos Aires

RESUMEN

El presente trabajo describe el estudio de la rigidez torsional realizado sobre el chasis jaula de un vehículo todo terreno.

En primera instancia se realizó un estudio numérico utilizando el software de elementos finitos ABAQUS (figura 1), con el objeto de establecer los parámetros a emplear para realizar el ensayo sobre la estructura real del vehículo (figura 1). En segunda instancia se realizó un ensayo sobre el chasis jaula del vehículo para determinar experimentalmente la rigidez torsional de la estructura, utilizando un sistema hidráulico para aplicar las cargas.

Palabras Claves: *Simulación, rigidez torsional, chasis, ensayo de validación.*

1. INTRODUCCIÓN

Los parámetros tales como rigidez torsional y rigidez flexional son determinantes a la hora de definir el confort de marcha y las características dinámicas de un vehículo.

Con el objeto de estimar las cargas necesarias a aplicar sobre la estructura real del vehículo durante un ensayo, y obtener deformaciones medibles, sin comprometer la integridad estructural del chasis-jaula, se realizó un estudio numérico utilizando el software de elementos finitos ABAQUS (figura 1 a 4). Dicho modelo, a su vez se utilizó posteriormente para realizar otros estudios sobre la estructura del mismo, por lo cual el ensayo de rigidez torsional sobre el vehículo real sirvió como validación del modelo.

2. SIMULACIÓN NUMÉRICA

2.1 Descripción del modelo

Para la simulación se utilizó el software de elementos finitos ABAQUS [1]. En este estudio se despreció la influencia de las chapas que conforman el piso, el parallamas, la parte trasera del habitáculo, la caja de carga y los guardabarros, con lo cual el resultado obtenido fue conservativo [2].

El modelo fue construido utilizando elementos viga lineales (de dos nodos), elementos tipo B31

según nomenclatura del software ABAQUS. Estos elementos soportan bien las tensiones de corte, por lo cual funcionan bien para vigas no esbeltas, las cuales se corresponden con la mayoría de los elementos de la estructura chasis jaula.

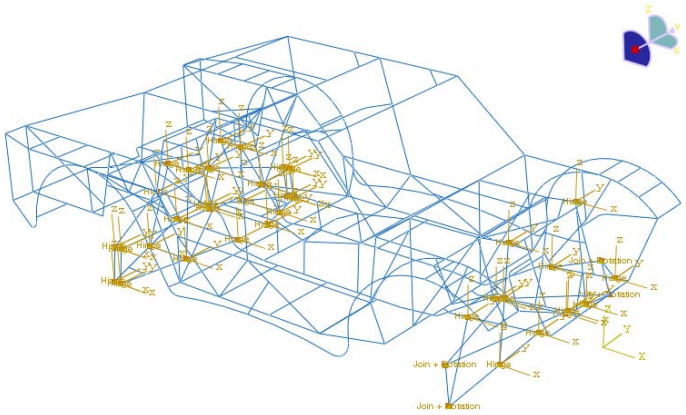


Figura 1. Estructura utilizada en el análisis, mostrando las parrillas de suspensión y sus accesorios.

Las parrillas fueron confeccionadas utilizando rótulas y juntas pasador, elementos que transmiten las cargas normales y de corte pero no los momentos. De esta forma el modelo tiende a poseer el mismo comportamiento que la estructura real. En el caso de los resortes, estos fueron situados en el mismo lugar que el vehículo real, pero por la naturaleza del estudio fueron reemplazados por vigas rígidas. Por el lado de los amortiguadores, como transfieren al chasis una carga pequeña al cargarlos de forma cuasi-estática, se desprecia su influencia en el modelo. Todas estas simplificaciones se justifican ya que lo que se busca determinar es la rigidez del chasis solamente, para lo cual todos los elementos de la suspensión deben permanecer rígidos, de forma de no contribuir al desplazamiento / rotación de la estructura, lo cual podría inducir una errónea estimación de su rigidez [3].

En cuanto a las condiciones de contorno asumidas, se vincularon las dos ruedas traseras (restringiendo los desplazamientos verticales y longitudinales pero no los transversales), y sobre cada rueda delantera se aplicó una carga vertical con sentido opuesto para cada una, de forma de crear las componentes del momento torsor (ver figura 2).

Para este estudio, por tratarse de una estructura no simétrica en el sentido longitudinal, se estimó la rigidez torsional en sentido anti-horario y en sentido horario.

Los puntos de medición se situaron sobre los largueros segundarios del chasis, los que conforman el piso del vehículo (figura 3).

ISBN: 978-987-1676-63-7

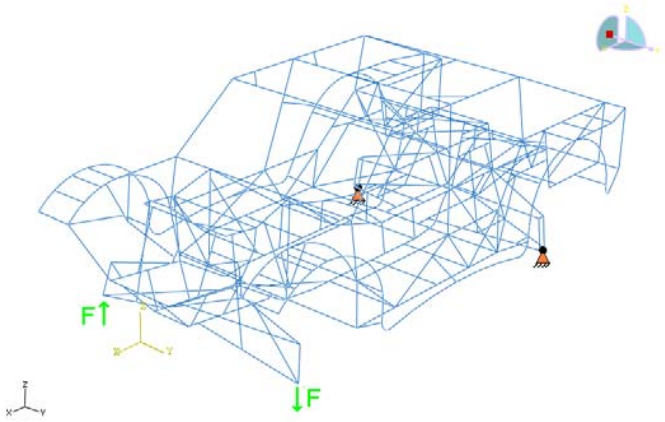


Figura 2. Ubicación de los vínculos y las cargas.

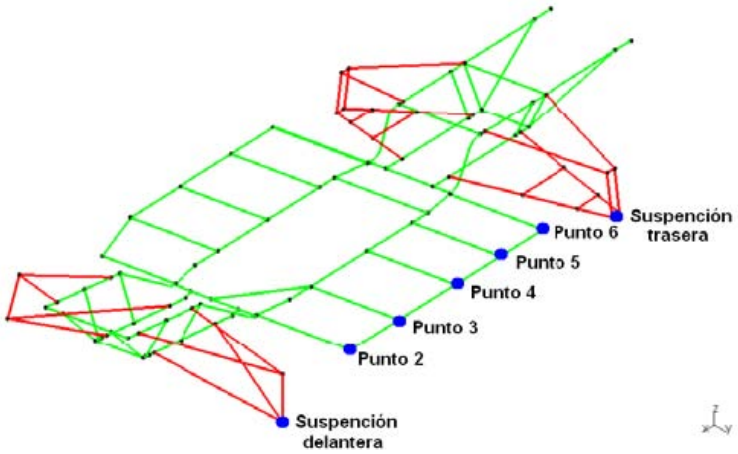


Figura 3. Puntos del lado izquierdo donde se midió la deflexión de la estructura.

2.2 Resultados del modelo numérico

En la figura 4 se observa la magnitud de los desplazamientos de cada parte de la estructura que fue sometida a torsión anti-horaria; en un gráfico donde se puede apreciar el apartamiento de la estructura deformada (en colores) respecto de la no deformada (en gris claro), con el factor de escala de la deformación aumentado 50 veces. Vale aclarar que la escala de valores de la referencia esta expresada en milímetros, siendo el valor máximo de 6,99 mm para la torsión anti horaria.

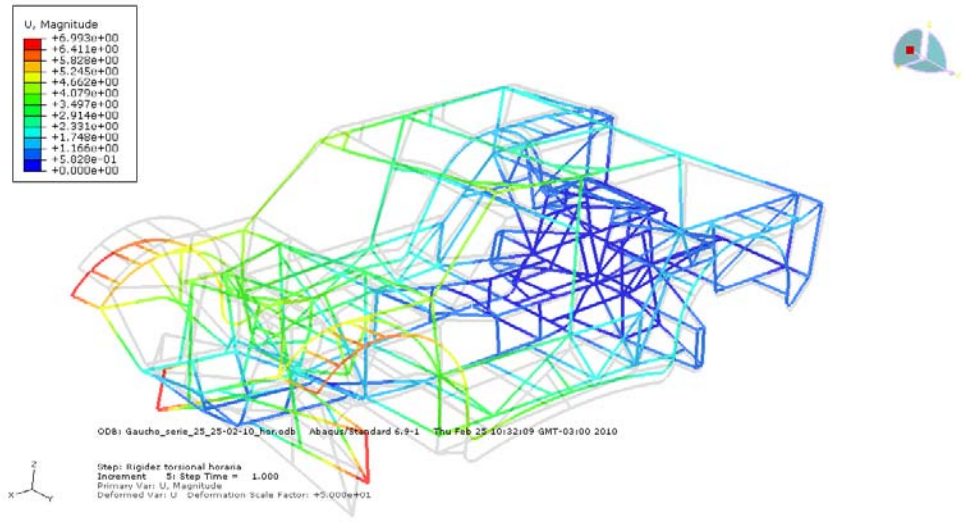


Figura 4. Superposición de la estructura deformada y la correspondiente sin deformar (gris claro).

La deformada esta escalada 50 veces.

3 ENSAYO SOBRE EL CHASIS REAL

3.1 Descripción del ensayo

Para obtener un valor de rigidez torsional del chasis del vehículo se reemplazó la suspensión del vehículo [4] (figura 5) por parrillas rígidas, portamasas rígidos y barras rígidas en lugar de los resortes, uniendo estos componentes al chasis en los mismos puntos de sujeción que posee el sistema de suspensión real del vehículo.

El ensayo consistió en aplicar al chasis el momento torsor calculado mediante el modelo de elementos finitos y medir el desplazamiento en los mismos puntos de la estructura, que en el modelo de FEM, estando ésta fija en su parte trasera, a una base rígida (figura 5).

ISBN: 978-987-1676-63-7

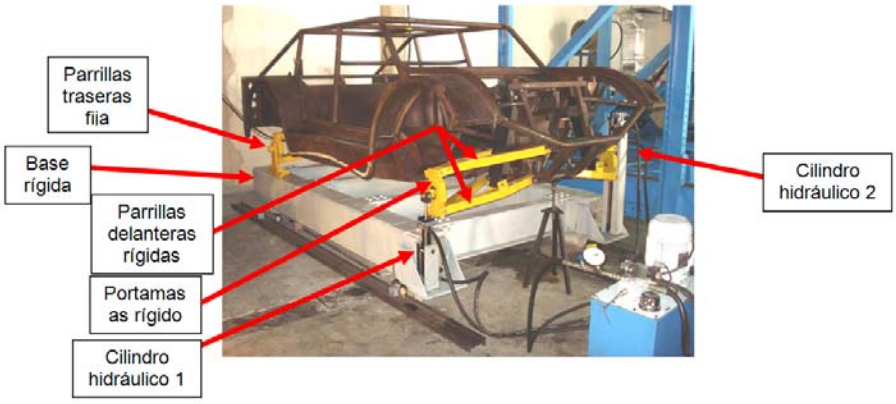


Figura 5. Vehículo montado sobre la base rígida previo a la puesta a punto del ensayo.

La carga máxima aplicada fue de aproximadamente 920 daNm. En la simulación de rigidez torsional realizada mediante elementos finitos, se comprobó que estos valores de carga no generaban tensiones excesivas sobre la estructura (tensiones menores a 100 MPa, siendo la tensión de fluencia del acero utilizado 220 MPa).

Mediante la utilización de cilindros hidráulicos (figura 5 y 6), sobre los portamasas delanteros rígidos se aplicó la carga que generó el momento torsor. Los portamasas traseros rígidos se vincularon a la base rígida, restringiendo los desplazamientos verticales y horizontales en el sentido de avance del vehículo (Uz = Ux = 0) pero no fue restringido el desplazamiento de los portamasas rígidos, y por ende del vehículo, en el eje Y (eje transversal a la dirección de avance del vehículo) de forma de permitirle a la estructura deformarse libremente en ese sentido.



Figura 6. Comparadores montados en los puntos de medición para el ensayo de torsión sentido horario

Para dotar al sistema de suspensión rígido de los mismos grados de libertad que el sistema

ISBN: 978-987-1676-63-7

real, las parrillas de suspensión fueron vinculadas al chasis, a los portamasas rígidos y a los reemplazos de los resortes, mediante pernos pasantes.

Previo al ensayo, se comprobó la rigidez de la base del banco de ensayo, a la cual se sujetaba el chasis, midiendo su deformación mediante comparadores mecánicos, sobre cuatro puntos cercanos a cada vínculo entre el chasis y la base. De este estudio se concluyó que la base resultaba suficientemente rígida, ya que la deflexión máxima medida al aplicar la carga máxima a emplear en el ensayo fue de 0,4 mm, contra los 13 mm de deformación medidos entre la estructura y la base, durante el ensayo ante la misma carga aplicada.

Para comprobar el comportamiento de la estructura ante la carga de torsión se midió la deflexión para cinco valores de momento torsor aplicado, partiendo de un valor de precarga de aproximadamente 170 daNm, utilizado para eliminar cualquier posible juego.

$$K = \frac{Momento \quad torsor}{ángulo\ de\ rotación} \tag{1}$$

3.2 Resultados del ensayo

La rigidez torsional de cualquier estructura está dada por el cociente entre el momento torsor aplicado y el ángulo de rotación medido ante la aplicación de dicha carga (Ecuación 1).

En la figura 7 se muestran las curvas con los valores de los ángulos de rotación medidos en cada punto analizado sobre la estructura real. En este gráfico podemos observar una leve diferencia entre la rotación en el sentido horario y el anti-horario, producto de la asimetría de la estructura analizada. También podemos observar que la estructura posee tres zonas donde la variación de la rigidez es lineal, presentando dos puntos de cambio de tendencia, lo cual indica dos zonas de transición entre partes de la estructura con diferente rigidez, la zona intermedia representa la jaula del vehículo y resulta más rígida que la torreta de suspensión delantera, zona izquierda de las curvas, y menos rígida que la zona derecha del gráfico que representa la parte de la torreta trasera y caja del vehículo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

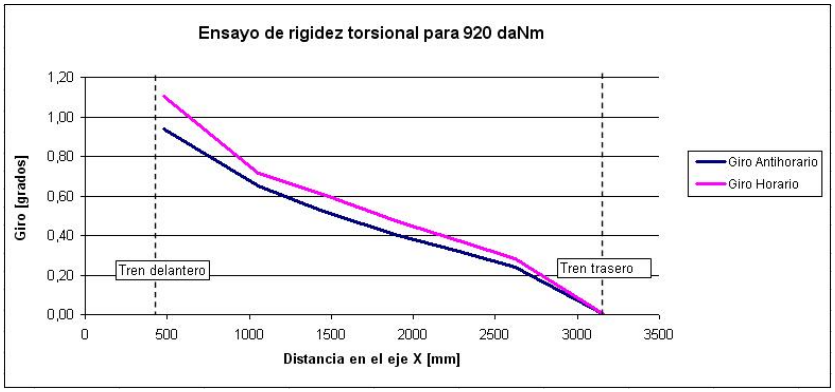


Figura 7. Ángulos de rotación del chasis a lo largo de la estructura.

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 1 se detallan los resultados obtenidos en la simulación numérica y del ensayo sobre el chasis real. Se puede apreciar en esta tabla que la correlación entre ambos resultados es cercana al 5 %, lo cual es más que aceptable para un estudio de este tipo.

Tabla 1. Valores de rigideces obtenidas

Rigidez torsional obtenida en el ensayo [Nm/grado]	Rigidez torsional obtenida en la simulación [Nm/grado]
9800	9370

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se calculó la rigidez del chasis de un vehículo todo terreno mediante el método de elementos finitos, valor que luego fue contrastado con el resultado obtenido de la estructura chasis jaula real.

A través del estudio realizado se comprobó una adecuada correlación entre el valor de la rigidez obtenida en el ensayo y la obtenida en la simulación.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] *Abaqus Analysis User's Manual (7.1.1 Solving nonlinear problems)*

[2] Cook,Robert; Malkus, Davis - *Concepts & Applications of Finite Element Analalysis* – Impreso en EE.UU. 4a. ed. 2002

[3] Milliken, William, Milliken, Douglas *Race Car Vehicle Dynamics. SAE*. Impreso en EE.UU. 1995.

[4] Heisler, Heinz. *Advanced Vehicles technology*. Butterworth Heinemann. Impreso en Gran Bretaña 2002.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

VIBRACIONES LIBRES DE MICROVIGAS CANTILÉVER CON MICRO PARTÍCULAS ADOSADAS

Federico Romero [1,3], **Diana V. Bambill** [1,3], **Sergio Vera** [2,3] **y Gonzalo J. Gilardi** [1,3]

[1] Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina
federico.romero@uns.edu.ar
[2] Departamento de Física – Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina
[3] CONICET
Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN

Este artículo presenta las vibraciones transversales libres de microvigas, comúnmente denominadas MEMS, que llevan adosadas micropartículas. La presencia de micropartículas puede deberse a un microsensor adosado o también a causas accidentales. Una micropartícula unida a la estructura de una microviga, en general cambiará las frecuencias naturales de la microviga desnuda o sin masas adosadas. El modelo que se desarrolla en el trabajo permite analizar el efecto de diferentes lugares de ubicación de la masa concentrada y diferentes relaciones de la masa en sí con respecto a la masa propia de la viga así como diferentes tipos de materiales del tipo de los funcionalmente graduados. El trabajo se basa en la teoría modificada de tensión de cupla, una de las teorías de elasticidad no clásica, que tiene en cuenta el efecto de las microdimensiones del sistema mecánico de vigas esbeltas del tipo Euler-Bernoulli. El Método de Ritz se aplica para obtener una solución aproximada para frecuencias naturales de microvigas cantiléver que llevan una masa concentrada solidaria a la viga. Se estima que el desarrollo analítico planteado será útil en el diseño de sensores de masa basados en microvigas en voladizo. Los mismos utilizan el principio de cambio de frecuencia causado por una masa añadida mientras operan en oscilación libre. Un ejemplo de aplicación de microvigas con micromasa adosada es el nuevo biosensor que sirve para detectar distintos tipos de bacterias o incluso diferentes cepas de la misma bacteria en el que están trabajando Científicos de la Universidad de Rice**.** El microsensor visto bajo una lupa es un conjunto de microvigas cantiléver. Estos microsensores podrían agilizar y simplificar la detección de patógenos para plantas procesadoras de alimentos.

.

Palabras Claves: *microviga, Euler-Bernoulli, teoría modificada de tensión de cupla, microsensor, vibración libre.*

1. INTRODUCCIÓN

Con los avances tecnológicos de la última década y las mejoras en los procesos de fabricación de micro elementos, se ha avanzado mucho en el uso de la tecnología de MEMS. Éstos elementos electro mecánicos de escala microscópica, tienen como característica el actuar como sensores y responder ante un estímulo, traduciendo un impulso eléctrico en un movimiento o viceversa.

La tecnología de materiales funcionalmente graduados (conocidos por la sigla FGM), es una nueva tecnología de generación de materiales diseñados para combinar las propiedades de dos materiales constituyentes, uniéndolos de tal manera que no se generen concentraciones de tensión. Son varios los análisis realizados en macro estructuras compuestas de materiales funcionalmente graduados, para conocer su comportamiento dinámico, pero son pocos los casos en escala microscópica de estructuras de materiales funcionalmente graduados que estudien el funcionamiento dinámico de los mismos. En el año 2012 Bekir Akgöz, Ömer Civalek [1], estudiaron las vibraciones libres de una microviga Euler-Bernoulli cuyo material tiene una composición funcionalmente graduada, con sección variable, basándose en la teoría modificada de tensión de cupla (conocida como MCST por sus siglas en inglés). En el 2014 Hossein Rokni, Abbas S. Milani, Rudolf J. Seethaler [2], realizaron investigaciones sobre microvigas Euler-Bernoulli funcionalmente graduadas de material epoxi, con nano tubos de carbono, variando la composición de los mismos de forma gradual en la dirección axial.

En el estudio de micro estructuras, la teoría de la elasticidad clásica no es de utilidad ya que no tiene en cuenta el efecto de la micro escala en el cálculo de la energía necesaria para la deformación de un elemento. En 1909 Cosserat and Cosserat [3] analizan el concepto de “no localidad” y en los años 60 cuando Mindlin [4] introduce el concepto de micro estructura el concepto toma relevancia. La teoría desarrollada es compleja y de difícil aplicación. En el año 2002, Yang et al. [5] presentan un desarrollo simplificado de la teoría que se conoce como teoría modificada de tensión de cupla (MCST). En esta simplificación solo se considera una única constante de longitud de escala del material y permite resolver una serie de situaciones estructurales en microestructuras. En los últimos quince años se publicaron numerosos estudios sobre análisis de vibraciones libres en microvigas utilizando la MCST (Park et al. 2006 [6], Asghari et al. 2010[7], Nateghi et al. 2012 [8]; Ma et al. 2008 [9]; Wang et al. 2013 [10]; Ghayesh et al. 2012 [11]; Şimşek et al. 2013 [12]; Sahmani et al. 2013 [13]; Rezazadeh et al. 2012 [14]; Kong et al. 2009 [15]; Bambill et al. 2016 [16]).

2. DESARROLLO

2.1. Materiales funcionalmente graduados (FGM)

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las propiedades de los materiales funcionalmente graduados, como la masa, la densidad, el módulo de Young, el módulo de corte, varían en forma continua según alguna ley constitutiva. En este trabajo se analizarán casos donde la variación se produce en el sentido longitudinal de la viga (en la dirección X), Figura 1, de acuerdo a la ley indicada a continuación:

$$P(X) = P_0\, f_P(X) = P_a\left[1+\left(P_b/P_a - 1\right)X^n\right] \tag{1}$$

donde con P se representa una propiedad cualquiera genérica del material funcionalmente graduado. Los dos materiales constituyentes se denominan genéricamente como a y b. Por ello $P_0 = P_a$ es la propiedad del material a en el extremo derecho ($X = 0$) y P_b es la del material b. Según la ley de variación (Ecuación 1) en su extremo derecho la viga está construida totalmente (100%) de material a y en el izquierdo ($X = L$) totalmente de material b. Las secciones intermedias, para $X = L$, están hechas de un material compuesto generado por la combinación de los materiales a y b en distintas proporciones, según la expresión la Ecuación 1.

2.2 Modelo de microviga

El estudio de las microvigas con micropartículas adosadas se realizará mediante la aplicación de la MCST y se resolverá utilizando el método de Ritz. Se analizará un modelo de microviga de sección transversal rectangular $A(X)$, de altura y ancho variable, (h, b), construida de material funcionalmente graduado. La altura de la sección se considera suficientemente pequeña frente a la longitud L como para representar una viga esbelta, Figura 1, por lo que es adecuado representar el modelo de viga con la teoría de vigas de Euler-Bernoulli.

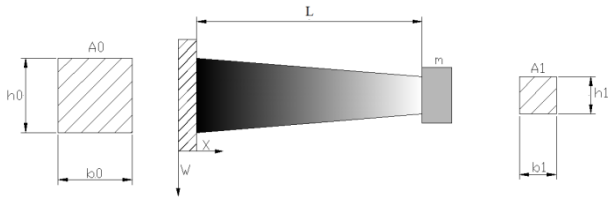


Figura 1: Microviga AFG cantiléver de sección variable

2.2.1 Teoría modificada de tensión de cupla (MCST)

La MCST es una teoría relativamente sencilla que permite analizar los efectos de la micro escala en estructuras. La teoría clásica no sirve para explicar el comportamiento de las estructuras a escala micro. La MCST considera el incremento de la energía necesario para deformar un elemento cuando éste tiene tamaño micrométrico, pues contempla en su análisis las micro rotaciones que ocurren en los elementos de volumen contenidos en el diferencial de volumen seleccionado. Estas micro rotaciones son independientes a la rotación clásica, y son

dependientes de la escala, digamos que si el elemento en estudio tiene escala macroscópica las micro rotaciones existen pero no afectan al cálculo de la energía de deformación, cosa que no ocurre cuando se analizan comportamientos en escalas micrométricas.

La energía de deformación de una microviga queda determinada por la ecuación siguiente

$$U = \tfrac{1}{2}\int_V \left(\sigma_{ij}\varepsilon_{ij} + m_{ij}x_{ij}\right)dV \tag{2}$$

donde $dV = dA.dX$ es el diferencial de volumen de la viga igual al diferencial de área por el diferencial de longitud y

$$\sigma_{ij} = \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}\ ;\ \varepsilon_{ij} = \tfrac{1}{2}\left(u_{ij} + u_{ij}\right);\ m_{ij} = 2l^2\mu\chi_{ij}\ ;\ \chi_{ij} = \tfrac{1}{2}\left(\theta_{ij} + \theta_{ji}\right);$$
$$\lambda = Ev \Big/ \left[(1+v)(1-2v)\right];\ \mu = \tfrac{1}{2}\, E \Big/ (1+v). \tag{3}$$

donde σ_{ij} y ε_{ij} son las componentes del tensor de tensiones y de deformaciones respectivamente, δ_{ij} el Delta de Kronecker, m_{ij} es la parte desviadora del tensor de tensiones de cupla, χ_{ij} corresponde al tensor simétrico de curvatura, u son las componentes del vector deformación, y θ_i las componentes del vector rotación. Con respecto al material, l es el parámetro de longitud de escala, μ y λ son las constantes de Lamé, v es el coeficiente de Poisson y E es el módulo de elasticidad.

De esta manera podemos expresar la energía interna de una microestructura aplicando la MCST.

En el caso de la viga se asume que la deflexión en un instante t cualquiera es del tipo

$$w(X,t) = w^*(X)\, e^{i\omega t} \tag{4}$$

donde $w^*(X)$ es una función continua, que satisface las condiciones de borde de la viga y representa aproximadamente la deformación transversal de la viga al vibrar; ω es la frecuencia circular natural de vibración del sistema. Bajo esta teoría las expresiones de las energías de deformación y cinética del sistema estructural (viga con masa adosada) pueden escribirse como:

$$U = \frac{e^{i2\omega t}}{2}\int_0^L \left[\frac{EI(1-v)}{(1+v)(1-2v)} + \frac{EA}{2(1+v)}l^2\right]\left(w^{*\prime\prime}\right)^2 dX \tag{5}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$T = \frac{1}{2} e^{i2\omega t} \omega^2 \left\{ \int_0^1 \rho A L \left[w^*(X) \right]^2 dx + \sum_{i=1}^{N} m_i \left[w^*(X) \right]^2 + \sum_{i=1}^{N} \frac{m_i r_{gi}^2}{L^2} \left[\left. \frac{dw^*}{dX} \right|_{X=X_i} \right]^2 \right. \tag{6}$$

donde X es la coordenada longitudinal $[0, L]$, A es la sección transversal de la viga, I es el momento de inercia de la sección de la viga y ρ la de densidad por unidad de longitud del material, m_i y r_{gi} corresponden a la masa y al radio de giro de la masa adosada i

2.2.2 Método de Ritz

Las frecuencias naturales de la viga se determinan usando el método de Ritz. La expresión de la deformación de la viga se asume como:

$$W_a(x) = {w^*}/{L} = \sum_{j=1}^{N} C_j \, \varphi_j \text{ ; con } x = X/L \text{ ; } \in [0, 1] \tag{7}$$

donde las φ_j, son N funciones denominadas funciones admisibles, que cumplen con las condiciones de borde esenciales del sistema y las C_j son constantes arbitrarias. En este trabajo analizaremos únicamente vigas en voladizo, por lo cual es suficiente usar polinomios como funciones admisibles

$$\left\{ \varphi_j \right\}_{j=1}^{N} = \left\{ x^{j+1} \right\}_{j=1}^{N} \tag{8}$$

que satisfacen las condiciones de borde esenciales, $\varphi_j(0) = \varphi_j'(0) = 0$, de la microviga cantiléver.

El funcional de energía de la microviga con una sola micromasa m adosada en posición x_m es:

$$J = U_{Max} - T_{Max} \tag{9}$$

$$U_{Max} = \int_0^1 \left[E(x) I(x) + \frac{E(x) A(x)}{2} l(x)^2 \right] \frac{1}{L^3} \left(W_a''(x) \right)^2 dx \tag{10}$$

$$T_{Max} = \frac{1}{2} \omega^2 \left\{ \int_0^1 \rho(x) A(x) L \left[W_a(x) \right]^2 dx + m \left[W_a(x) \right]^2 + \frac{r_g^2}{L^2} \left[\left. \frac{dW_a(x)}{dx} \right|_{X=X_i} \right]^2 \right\} \tag{11}$$

con

$$E(x) = E_0 f_E(x), \; I(x) = I_0 f_I(x), \; \rho(x) = \rho_0 f_\rho(x), \; A(x) = A_0 f_A(x) = b(x)\, h(x), \\ b(x) = b_0 f_b(x), h(x) = h_0 f_h(x) \tag{12}$$

en el extremo x=0 se indican con $\rho_0 = \rho_a$ a la densidad, A_0 a la sección, $E_0 = E_a$ al módulo de elasticidad, I_0 al momento de inercia. Remplazando las Ecuaciones (10 y 11) en la Ecuación (9), teniendo en cuenta las Ecuaciones (12) llegamos a la siguiente expresión del funcional

$$J(W_a) = \frac{1}{2}\frac{E_0 I_0}{L^3}\left[\int_0^1 \left[f_E(x) f_I(x) + \frac{f_E(x) A(x)}{I_0 2} l(x)^2 \right] \left(W_A''(x)\right)^2 \right] - \\ -\frac{1}{2}\Omega^2 \left[\int_0^1 f_\rho(x) f_A(x) \left[W_A(x)\right]^2 dx + M\left[W_a(x_m)\right]^2 + Mc^2 \left(\frac{dW_a}{dx}(x_m)\right)^2\right] \tag{13}$$

donde $\Omega = \omega L^2 \sqrt{\rho_0 A_0 / E_0 I_0}$, $M = m / \rho_0 A_0 L$, $c = r_g / L$.

En el método de Ritz se debe minimizar el funcional con respecto a las constantes arbitrarias C_j

$$\frac{\partial J\left[W_a(x)\right]}{\partial C_j} = 0, j = 1, 2, ..., N \tag{14}$$

Se obtiene un sistema de N ecuaciones lineales de la forma:

$$Q\left\{C_j\right\} = 0 \tag{15}$$

con el determinante de la matriz Q se llega a la ecuación de frecuencias del sistema

$$Q = K - \Omega^2 O \tag{16}$$

Las matrices K (de rigidez) y O (de masa) tienen elementos indicados a continuación

$$k_{ij} = \int_0^1 \left[\frac{f_E(x) f_I(x)(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} + f_E(x) f_A(x) f_l(x)^2 \left(\frac{l_0}{h_0}\right)^2 \frac{6}{(1+\nu)} \right] \varphi_i \varphi_j dx \tag{17}$$

$$o_{ij} = \int_0^1 f_\rho(x) f_A(x) \varphi_i \varphi_j dx + M\left[\varphi_i(1)\varphi_j(1) + c^2 \varphi_i'(1)\varphi_j'(1)\right] \tag{18}$$

Los autovalores del problema son determinados resolviendo el siguiente sistema

$$\left|KO^{-1} - \Omega^2 D\right| = \left|B - \gamma D\right| = 0 \tag{19}$$

donde $B = KO^{-1}$ es la matriz rigidez multiplicada por la inversa de la matriz de masa y siendo $\gamma = \Omega^2$ los autovalores de la matriz B y D es la matriz identidad. Resolviendo el problema de

los autovalores, obtenemos los $\gamma = \Omega^2$, coeficientes de frecuencias naturales del sistema. El proceso detallado de la aplicación del método de Ritz puede verse en el libro de Ilanko, de 2014 [17].

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

En la bibliografía revisada no se encontraron resultados numéricos de frecuencias naturales de microvigas funcionalmente graduadas con masas adosadas y sección rectangular variable, por esto para comprobar la confiabilidad del procedimiento, se comparan los resultados con otros casos particulares encontrados en la literatura estudiada.

Tabla 1. Coeficientes de frecuencias naturales de microvigas en voladizo homogéneas de sección constante con ν=0,3

	$l = 0h_0$			$l = 0,5h_0$			$l = h_0$		
	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_1	Ω_2	Ω_3
Actual	3,5160	22,0345	61,6972	5,1601	32,3378	90,5468	8,3318	52,2147	146,2030
[1]	3,5160	22,0345	61,6972	5,1601	32,3378	90,5468	8,3318	52,2147	146,2027

En la Tabla 1 los resultados obtenidos en nuestros cálculos son comprados con los obtenidos por Akgöz y Civalek [1], donde obtienen las primeras tres frecuencias para microvigas homogéneas de sección variable, sin masas adosadas. Puede observarse que con N=10 términos en la solución aproximada es posible obtener resultados que concuerdan hasta la cuarta cifra decimal con los resultados publicados por Akgöz y Civalek [1]. En la Tabla 2 para vigas de altura constante $h(x) = h_0$ y ancho $b(x) = b_0\left[\left(b_1/b_0 - 1\right)x + 1\right]$ variable se observan los valores de los coeficientes de frecuencias de la literatura citada (por Akgöz y Civalek [1]) y los calculados en este trabajo, se observa una muy buena concordancia entre ambos grupos de resultados. Lo que permite demostrar que el método propuesto resulta ser adecuado para resolver el problema del título.

En la Tabla 2 para vigas de altura constante $h(x) = h_0$ y ancho $b(x) = b_0\left[\left(b_1/b_0 - 1\right)x + 1\right]$ variable se observan los valores de los coeficientes de frecuencias de la literatura citada (por Akgöz y Civalek [1]) y los calculados en este trabajo, se observa una muy buena concordancia entre ambos grupos de resultados. Lo que permite demostrar que el método propuesto resulta ser adecuado para resolver el problema del título.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2. Coeficiente de frecuencias naturales de microvigas cantiléver homogéneas (ν =0,3) con sección variable, con altura constante.

b_1/b_0		$l=0$			$l=0,5h_0$			$l=1h_0$		
		Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_1	Ω_2	Ω_3
0,2	Actual	3,7629	22,5018	62,1525	5,5224	33,0236	91,2150	8,9168	53,3221	147,2820
	[1]	3,7629	22,5018	62,1525	5,5224	33,0236	91,2150	8,9168	53,3221	147,2816
0,4	Actual	4,0970	23,1186	62,7763	6,0127	33,9289	92,1304	9,7085	54,7838	148,7600
	[1]	4,0970	23,1186	62,7763	6,0127	33,9289	92,1304	9,7085	54,7838	148,7598
0,6	Actual	4,5853	24,0211	63,7515	6,7294	35,2533	93,5616	10,8657	56,9223	151,0710
	[1]	4,5853	24,0211	63,7515	6,7294	35,2533	93,5616	10,8657	56,9223	151,0706
0,8	Actual	5,3976	25,6558	65,7470	7,9215	37,6525	96,4902	12,7906	60,7961	155,7990
	[1]	5,3976	25,6558	65,7470	7,9215	37,6525	96,4902	12,7906	60,7961	155,7993

Los ejemplos numéricos que se presentan a continuación corresponden a vigas cantiléver construidas con materiales funcionalmente graduados según la Ecuación 1, en particular el coeficiente de Poisson se adopta constante ν =0,3. En los extremos la viga es de un solo material constituyente a ó b y en las secciones intermedias el material es una combinación de los materiales constituyentes a y b según la ley dada en la Ecuación 1.

$$E(0)=E_0=E_a;\ E(1)=E_b;\ \rho(0)=\rho_0=\rho_a;\ \ \rho(1)=\rho_b. \tag{20}$$

Tabla 3. Coeficientes de frecuencia natural de microvigas cantiléver de materiales funcionalmente graduados, sección constante, y una masa adosada en el extremo libre. ν =0,3

		M	c	l =0,5		l =1	
E_b/E_a	ρ_b/ρ_a			Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2
0,5	0,3	0,5	0,1	3,1513	24,3202	5,1851	40,9323
		1	0,2	2,2543	12,7191	3,7146	21,7319
	0,6	0,5	0,1	3,0133	22,4597	4,9566	37,7843
		1	0,2	2,2029	12,3668	3,6290	21,1116
0,75	0,3	0,5	0,1	3,2002	25,1629	5,2139	41,4202
		1	0,2	2,2921	13,3244	3,7368	22,0826
	0,6	0,5	0,1	3,0594	23,2293	4,9838	38,2309
		1	0,2	2,2394	12,9461	3,6504	21,4471

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de frecuencia de una micro viga cantiléver de sección rectangular contante, con una partícula adosada en el extremo libre de masa menor a la masa de la viga o igual a ella, y se considera el efecto de la inercia rotatoria de la partícula.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 4. Coeficientes de frecuencia natural de microvigas cantiléver con materiales funcionalmente graduados, variación lineal de altura, y masa adosada en su extremo ν=0,3

h_1/h_0	E_b/E_a	ρ_b/ρ_a	$M=0,5 \quad c=0,1$				$M=1 \quad c=0,2$			
			$l=0,5h_0$		$l=h_0$		$l=0,5h_0$		$l=h_0$	
			Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2
0,2	0,5	0,3	2,6271	16,5887	31,3402	31,3402	1,7923	6,8414	13,0985	13,0985
		0,6	2,5898	15,9275	29,9702	29,9702	1,7808	6,7789	12,9706	12,9706
	0,75	0,3	2,6551	16,7206	31,4115	31,4115	1,8117	6,8915	13,1251	13,1251
		0,6	2,6173	16,0574	30,0405	30,0405	1,8000	6,8288	12,9971	12,9971
0,4	0,5	0,3	2,7880	19,4299	35,5769	35,5769	1,9309	8,5620	16,0224	16,0224
		0,6	2,7260	18,3193	33,4343	33,4343	1,9105	8,4392	15,7777	15,7777
	0,75	0,3	2,8297	19,7979	35,7700	35,7700	1,9611	8,7315	16,1116	16,1116
		0,6	2,7665	18,6649	33,6161	33,6161	1,9402	8,6062	15,8656	15,8656
0,6	0,5	0,3	2,9238	21,3601	37,9721	37,9721	2,0493	10,0137	18,2218	18,2218
		0,6	2,8365	19,9246	35,3501	35,3501	2,0192	9,8226	17,8545	17,8545
	0,75	0,3	2,9645	21,8564	38,2355	38,2355	2,0796	10,2870	18,3681	18,3681
		0,6	2,8755	20,3811	35,5933	35,5933	2,0488	10,0891	17,9970	17,9970
0,8	0,5	0,3	3,0436	22,9274	39,6286	39,6286	2,1561	11,3800	20,0766	20,0766
		0,6	2,9309	21,2516	36,6949	36,6949	2,1156	11,1123	19,5835	19,5835
	0,75	0,3	3,0889	23,6050	40,0020	40,0020	2,1905	11,8126	20,3162	20,3162
		0,6	2,9739	21,8705	37,0373	37,0373	2,1490	11,5299	19,8147	19,8147

La Tabla 4 presenta casos de micro viga cantiléver con una micromasa concentrada en el extremo y tiene variación lineal de la altura de la sección transversal y ancho constante. Se calcularon dos casos de partículas adosadas $M=0,5$ y $M=1$

La Tabla 5 presenta un caso similar de coeficientes de frecuencia pero para una sección que tiene variación cuadrática de la altura $f_h(x)=\left(h_1/h_0-1\right)x^2+1$ y ancho constante.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 5. Coeficientes de frecuencia natural de microvigas cantiléver con materiales funcionalmente graduados con variación cuadrática de altura. ν=0,3.

h_1/h_0	E_b/E_a	ρ_b/ρ_a	$M=0,5 \quad c=0,1$				$M=1 \quad c=0,2$			
			$l=0,5h_0$		$l=h_0$		$l=0,5h_0$		$l=h_0$	
			Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2	Ω_1	Ω_2
0,2	0,5	0,3	2,9971	17,8980	5,0816	33,2103	2,0624	7,5184	3,5208	14,2624
		0,6	2,9417	17,0830	4,9833	31,5271	2,0448	7,4371	3,4887	14,0946
	0,75	0,3	3,0387	18,1145	5,1045	33,3341	2,0921	7,5961	3,5371	14,3056
		0,6	2,9822	17,2981	5,0057	31,6502	2,0741	7,5147	3,5048	14,1380
0,4	0,5	0,3	3,0516	20,3027	5,1261	36,5268	2,1260	9,0918	3,5883	16,8385
		0,6	2,9748	19,0891	4,9923	34,2097	2,1001	8,9507	3,5426	16,5553
	0,75	0,3	3,0962	20,7074	5,1508	36,7463	2,1589	9,2739	3,6064	16,9370
		0,6	3,0172	19,4719	5,0162	34,4180	2.1323	9,1304	3,5603	16,6526
0,6	0,5	0,3	3,0928	21,9328	5,1545	38,4728	2,1761	10,3917	3,6390	18,7452
		0,6	2,9943	20,4414	4,9873	35,7733	2,1417	10,1863	3,5798	18,3489
	0,75	0,3	3,1395	22,5089	5,1808	38,7848	2,2112	10,7055	3,6585	18,9156
		0,6	3,0389	20,9740	5,0125	36,0630	2,2108	11,7519	3,6279	20,0717
0,8	0,5	0,3	3,1253	23,2232	5,1732	39,8516	2,2181	11,5843	3,6801	20,3334
		0,6	3,0065	21,5243	4,9744	36,8925	2,1752	11,3085	3,6076	19,8248
	0,75	0,3	3,1734	23,9453	5,2008	40,2531	2,2548	12,0434	3,7010	20,5891
		0,6	3,0521	22,1855	5,0007	37,2618	2,2108	11,7519	3,6279	20,0717

Observados los valores presentados en las Tablas 4 y 5, se puede observar el aumento del valor de los coeficientes de frecuencia natural debido a la consideración del efecto de la microescala $(l=h_0)$. Por otro lado se puede ver como el cambio de materiales genera un cambio en los coeficientes de frecuencia, siendo más altos sus valores conforme disminuye la densidad en dirección al extremo libre.

4. CONCLUSIONES

Se puso a prueba como la variación del material puedes ser utilizada de manera ventajosa logrando el cambio de su frecuencia natural según sea la necesidad requerida. Por otro lado se vieron los efectos de las masas adosadas en los micro elementos, como una partícula puede cambiar las frecuencias naturales de la viga, por último se determina que los efectos de la micro escala hacen que las frecuencias naturales de la viga sean superiores a los que predice la teoría clásica, siendo la menor posible de una situación determinada la de macroescala.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. REFERENCIAS

[1] Akgöz B., Civalek O., *Free vibration analysis of axially functionally graded tapered Bernoulli–Euler microbeams based on the modified couple stress theory*, Composite Structures, 98, 314–322, 2012.

[2] Rokni H., Milani A., Seethaler R., *Size-dependent vibration behavior of functionally graded CNT-Reinforced polymer microcantilevers: Modeling and optimization,* European Journal of Mechanics A/Solids, 49, 26-34, 2015.

[3]Cosserat E. and Cosserat F., Tehory of deformable bodies, Paris: Scientific Library, Hernan and Sons.

[4] Mindlin R.D., Eshel N.N., *On First Strain-gradient theories in linear Elasticity*. International Journal of Solids and Structures, 4, 109-124, 1968.

[5] Yang F., Chong A.C.M., Lang D.C.C. and Tong P., *Couple stress based strain gradient theory for elasticity*. International Journal of Solids and Structures, 39, 2731-2743, 2002.

[6] Park S. K, Gao X.L., *Bernoulli-Euler beam model based on a modified couple stress theory*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 223, 2355-2359, 2006

[7] Asghari M., Ahmadian M.T., Kahrobaiyan M.H., Rahaeifard M., *On the size-dependent behavior of functionally graded micro-beams,* Materials & Design, 31, 2324-2329, 2010.

[8] Nateghi A., Salamat-talab M., Rezapour J., Daneshian B., *Size dependent buckling analysis of functionally graded micro beams on modified couple stress theory*, Applied Mathematical Modelling, 36, 4971-4987, 2012.

[9] Ma H.M., Gao X.L., Reddy J.N., *A microstructure-dependent Timoshenko beam model based on a modified couple stress theory*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 56, 3379-3391, 2008.

[10] Wang Y.G., Lin W.H., Liu N., *Nonlinear free vibration of a microscale beam based on modified couple stress theory*, Physica E. Low Dimensional Systems and nanostructures, 47, 80-85, 2013.

[11] Ghayesh M. H., Farokhi H., Amabili M., *Nonlinear dynamics of a microscale beam based on the modified couple stress theory*, Composites: Part B, 50, 318-324, 2013.

[12] Simsek M., *Reddy J.N., Bending and vibration of functionally graded microbeams using a new higher order beam theory and the modified couple stress theory*, Int. Journal of Engineering Science, 64, 37-53, 2013.

[13] Sahmani S., Ansari R., Gholami R., Darvizeh A., *Dynamic stability analysis of functionally graded higher-order shear deformable microshells based on the modified couple stress elasticity theory*, Composites: Part B, 51, 44-53, 2013.

[14] Rezazadeh G., Vahdat A.S., Tayefeh-rezaei S., Cetinkaya C., *Thermoelastic damping in micro-beam resonator using modified couple stress theory*, Acta Mechanica, 223, 1137-1152, 2012.

[15] Kong S., Zhou S., Nie Z., Wang K., *Static and dynamic analysis of micro beams based on strain gradient elasticity theory*, 46, Int. J. Eng. Sci.,487-498, 2009.

[16] Bambill D., Guerrero G., Felix D., *Natural vibrations of micro beams with nonrigid supports*, Journal of Vibration and Control, 1-14, 2016.

[17] Ilanko S, Monterrubio LE, Morris R. *The Rayleigh-Ritz method for structural analysis*. Wiley & Sons, Londres, 2014.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS) así como al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la provincia de Buenos Aires bajo cuyo auspicio se desarrolló el presente trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE MODELOS NUMERICOS TÉRMICOS PARA SOLDADURA POR FRICCION-AGITACION (FSW)

Luciano Buglioni[1], Leonardo Tufaro[1,2] y Hernán G. Svoboda[2,3]

[1] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, San Martín, Buenos Aires, Argentina. buglioni@inti.gob.ar, ltufaro@inti.gob.ar
[2] Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Materiales y Estructuras, INTECIN, GTSyCM3, Ciudad de Buenos Aires, Argentina. hsvobod@fi.uba.ar
[3] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

La soldadura por fricción y agitación (FSW) es un proceso en estado sólido con un fuerte impacto en los últimos años, particularmente en la construcción de elementos estructurales con aleaciones de aluminio, específicamente en las industrias aeronáutica, aeroespacial, naval y automotriz, entre otras. La soldadura FSW utiliza una herramienta la cual es insertada en la junta y se mueve a través de ella produciendo la unión. El calor es generado entre el material y la herramienta produciendo la plastificación de la zona que circunda esta última. Los modelos numéricos de FSW son de gran interés debido a la complejidad del fenómeno y la dificultad de medir diferentes magnitudes del proceso. Ellos pueden ser formulados por diferentes aproximaciones: desde modelos térmicos sencillos, a modelos acoplados que resuelven las ecuaciones térmicas y elásticas mediante elementos finitos (FEM); o modelos de dinámica de fluidos (CFD) que incluyen tanto las ecuaciones de Navier Stokes como las térmicas.
Debido a la influencia de las temperaturas del proceso en las tensiones residuales de la junta, interesa conocer sus variaciones en la chapa, en particular a lo largo del espesor de ésta. Por otra parte, interesa conocer las diferencias existentes en estos perfiles de temperaturas obtenidos por diferentes métodos numéricos. En el presente trabajo, se comparan los perfiles de temperatura obtenidos por dos métodos diferentes, para un proceso FSW realizado experimentalmente en probetas de AA5083 de 3 mm de espesor, en diferentes condiciones de velocidad de giro y de avance. Los métodos numéricos son: un modelo CFD acoplado térmicamente y estacionario que considera la agitación del material; que sirve como entrada del otro modelo, térmico FEM transitorio; ambos fueron ajustados y analizados en trabajos anteriores, siendo el último una versión mejorada. Finalmente, los perfiles de temperaturas fueron comparados con el fin de analizar la influencia de introducir numéricamente el fenómeno de agitación.

Palabras Claves: *FSW, FEM, CFD, Modelado numérico, AA5083.*

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción y agitación (FSW) es un proceso de en estado sólido que ha producido un gran impacto en los últimos años, en particular en lo referente a la construcción de elementos estructurales con aleaciones de aluminio, específicamente en las industrias aeronáutica, aeroespacial, naval y automotriz, entre otras. Su mayor aplicación se ha producido en las aleaciones de aluminio, aunque hoy en día se utiliza para múltiples aleaciones. Una de las ventajas que presenta este proceso es el menor aporte térmico que introduce debido a que se produce en estado sólido, resultando en campos de temperaturas menores a los generados mediante los procesos convencionales de fusión [1].

Los modelos FSW son de gran interés debido a la complejidad del fenómeno físico involucrado y la dificultad de medir diferentes variables de éste. A lo largo de los años ha sido desarrollada una amplia variedad de modelos de análisis. Éstos pueden ser agrupados en analíticos [2] y numéricos. Dentro de los últimos, existen modelos térmicos [3], térmicos-estructurales con diferentes materiales y formulaciones [4-6], fluido-térmicos [4], entre otros, y se enfocan principalmente en el cálculo del flujo de calor, tensiones residuales y deformaciones, carga axial de la herramienta, ciclos térmicos, transferencia de calor y flujo de material. Los modelos puramente térmicos aplican como entrada una distribución de calor que en muchos casos es superficial [3-4]. Estos son a su vez en algunos casos son combinados con otros para una vez obtenido el campo térmico realizar el cálculo de resultados más complejos como tensiones residuales. Asimismo, el valor neto de calor (potencia) es difícil de medir, y para esto pueden utilizarse otros modelos numéricos, como por ejemplo CFD [5], que asume ciertas condiciones de la interfaz herramienta-chapa; o modelos estructurales [6], considerando este contacto. Estos modelos más complejos introducen el calor por los mecanismos de fricción y arrastre de manera volumétrica, es decir, copiando el perfil de la superficie de la herramienta. Interesa entonces conocer el error que conlleva utilizar un modelo de calor distribuido superficialmente en el plano de la chapa, y con una función de distribución simplificada, frente a un modelo más complejo CFD, ambos con el mismo calor total aplicado.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la influencia de distribución de la fuente de calor en el proceso FSW, y estudiar qué supone introducir una fuente de calor de distribución superficial simplificada frente a otra volumétrica. Para esto se utilizaron los resultados de un modelo CFD, previamente desarrollado en trabajos anteriores [7] y se mejoró por otra parte otro modelo térmico transitorio tridimensional de FSW [8], con una fuente de calor móvil de distribución simplificada, cuyo valor de potencia es obtenido a partir del primer modelo, para finalmente obtener los campos térmicos producidos en la chapa por ambas aproximaciones y comparar los resultados evaluando las ventajas y desventajas de cada uno de éstos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Diferentes aleaciones de aluminio AA5083 de dimensiones 150 x 75 x 3 mm fueron soldadas a tope bajo diferentes condiciones, usando una fresadora adaptada, de acuerdo a [9]. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de soldadura utilizados. La velocidad de avance VA y la de rotación VR fueron variadas mientras que el ángulo de inclinación o *tilt* fue mantenido constante.

Tabla 1. Designación y parámetros de cada condición de soldadura FSW

Id	VR [rpm]	VA [mm/min]	Tilt [º]	Pitch $= VR/VA$ [rev.mm^{-1}]
680-73	680	73	1.5	9.3
680-98	680	98	1.5	6.9
903-73	903	73	1.5	12.4
903-98	903	98	1.5	9.2

En la Figura 1 se muestra la disposición de las chapas a soldar con su dispositivo de fijación (a) y las posiciones de las termocuplas respecto a la línea central (b).

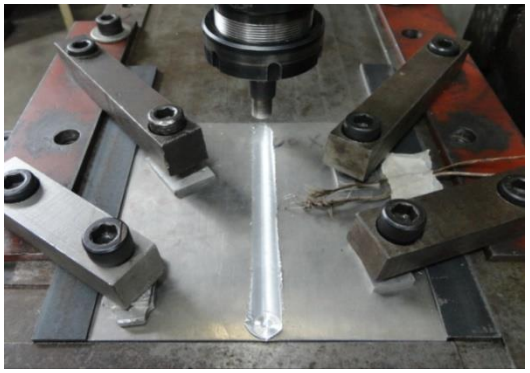
a  b 

Figura 1. a. Dispositivo utilizado y montaje, b. Ubicación de las termocuplas (TCs)

La herramienta tiene un pin cónico y un hombro cóncavo, y está hecha con acero H13. El diámetro del hombro es de 12 mm y los diámetros mayor y menor del pin son, respectivamente, 4 y 3 mm. El largo del pin es de 2.8 mm. Durante el proceso fueron medidas diferentes variables del proceso utilizando una placa de adquisición de 4 canales. Los ciclos térmicos fueron obtenidos con 2 termocuplas (TCs) tipo K, las cuales fueron ubicadas de la siguiente forma respecto al cordón: TC1 entre 7 y 8 mm y TC2 entre 11 y 12 mm, dentro de agujeros de 1mm de diámetro a una profundidad de 2 mm.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. MODELOS NUMÉRICOS

En este trabajo, se compararon los resultados de dos aproximaciones numéricas diferentes. Se desarrolló un modelo CFD representativo del proceso FSW en ANSYS® Fluent y luego este fue comparado con un modelo puramente térmico, transitorio, de elementos finitos.

Con respecto al modelo CFD, éste es el modelo número 3 desarrollado en [5]. Consiste en un volumen de control de 150 mm x 150 mm x 3 mm (incluye ambas piezas soldadas a tope), el cual se representa en la Figura 2. El borde ha sido dividido en: *inlet, outlet, lados, superior, herramienta* (esta última con diferentes partes), e inferior.

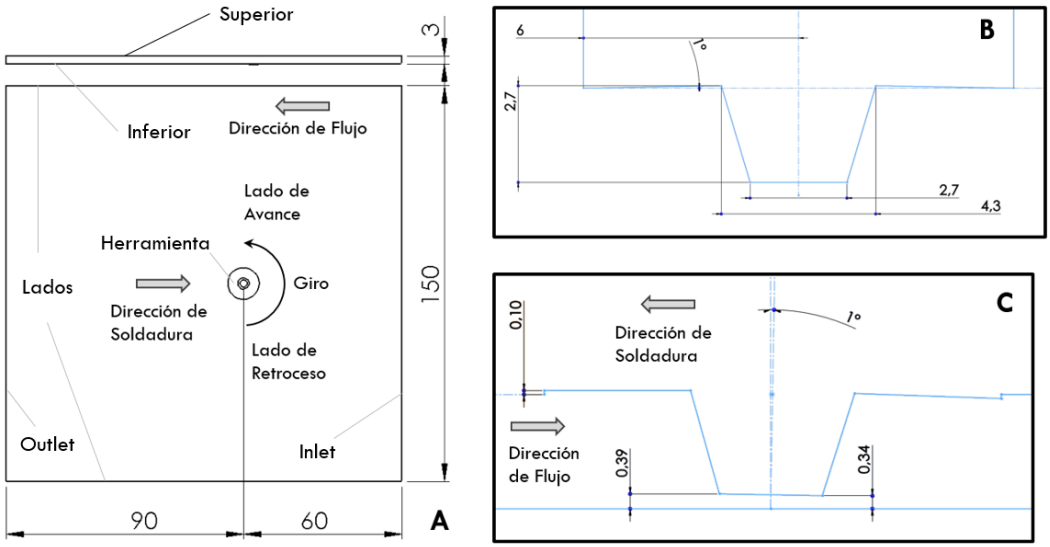


Figura 2. Modelo CFD. Dominio (A), Herramienta (B) y posicionamiento de ésta (C)

El dominio tiene una zona central cilíndrica que ha sido removida, a 60 mm de la entrada (inlet) en dirección longitudinal (fig. 2a), la cual representa la herramienta. Sus dimensiones se representan en la Fig. 2b. El ángulo de tilt (inclinación lateral) se adoptó de 1º a partir de su posición original calculando la deflexión a partir de la proyección de la carga axial medida. Las condiciones de borde del modelo son paredes móviles con condiciones de deslizamiento (tensión de corte nula) en la zona superior y condiciones de adherencia en los costados. En la zona inferior se asumió la chapa con velocidad nula y condiciones de adherencia. La zona de salida se fijó con presión nula mientras que la zona de entrada se fijó con velocidad y temperatura de 300 °K. La disipación de calor inferior es igual que en el modelo 3 del trabajo [5].

La malla se muestra tiene alrededor de 200,000 celdas. El modelo de material está gobernado por la ley de Zener-Hollomon propuesta por [10], la cual describe la relación entre temperatura, tasa de

ISBN: 978-987-1676-63-7

deformación $\dot{\varepsilon}$ y tensión de flujo. Este modelo de material se describe en detalle en como se muestra en la Ec. (1).

$$\sigma = \sigma_r \operatorname{asinh}\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{A}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right) \quad (1)$$

Las propiedades térmicas de la aleación 5083AA se obtuvieron de [12]. Respecto a los mecanismos de generación de calor [3], este trabajo incluye tanto la adherencia o arrastre como el de deslizamiento o fricción. El flujo de calor generado puede ser representado por la Ec. (2).

$$q = \eta_c\left((1-\delta)U_q\tau_w\eta_{pl} + \delta\mu p U_q\right) \quad (2)$$

El primer término de la Ec. (2) representa el calor generado por adherencia (sticking) mientras que el último es el calor generado por deslizamiento (sliding). En esta ecuación, δ es el deslizamiento, η_c representa la porción del flujo de calor generado que efectivamente afecta a las chapas (ya que parte se pierde en el cabezal de la máquina), U_q es la velocidad tangencial, τ_w la tensión de corte en la interfaz, η_{pl} es la fracción de energía plástica convertida en calor, μ es el coeficiente de fricción y p es la presión. Los valores de deslizamiento se detallan en [5]. En lo concerniente a ajuste entre el modelo numérico y las medidas experimentales, continuando trabajos anteriores [3] el parámetro más significativo a ser ajustado es la temperatura pico en la termocupla más cercana al cordón (TC1), con lo cual se modificó el valor del coeficiente de disipación hasta obtener un ajuste en este valor. Se verificó que las restantes condiciones de soldadura ajusten de forma correcta.

Por otra parte se desarrolló un modelo térmico transitorio tridimensional en elementos finitos. El mismo se muestra en la Figura 3. En este modelo se aplica un valor de flujo de calor igual al obtenido por el modelo CFD que difiere con cada condición de soldadura.

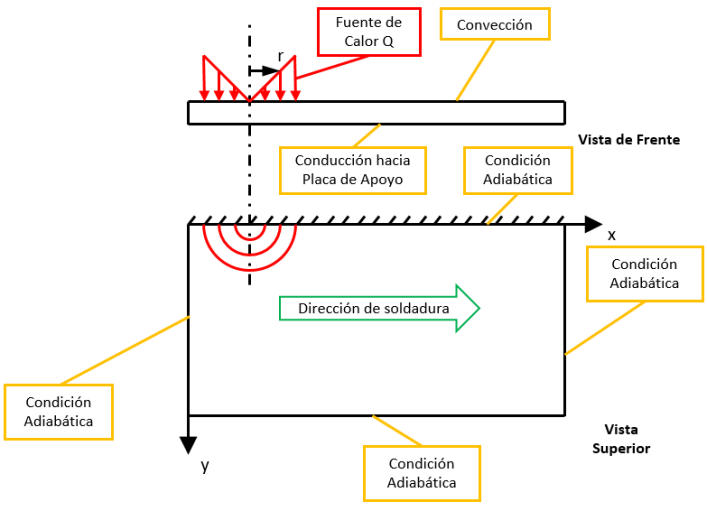
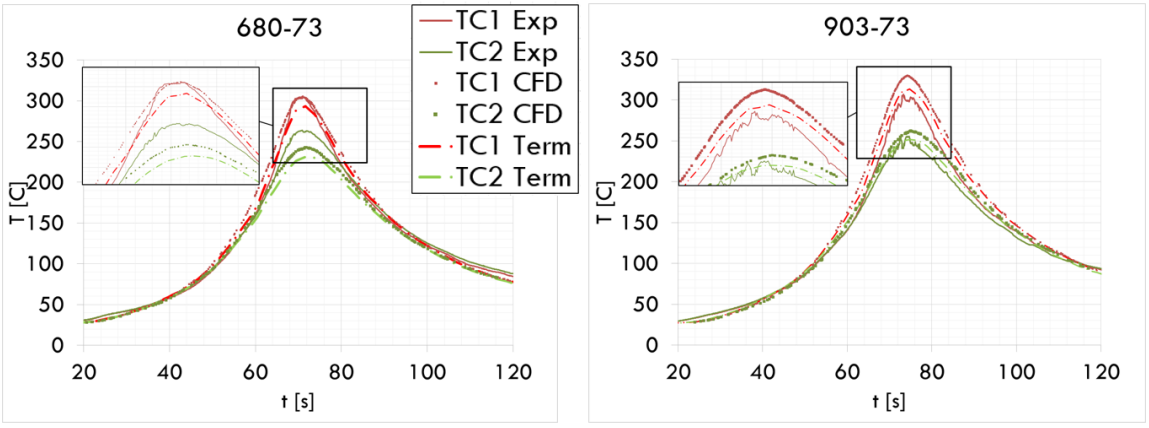


Figura 3. Descripción modelo térmico.

Este modelo está relacionado con [8], con la mejora introducida de tener varios elementos en el espesor en lugar de sólo uno como se tenía en los modelos anteriores. Se introduce el calor mediante una fuente móvil con velocidad de avance de soldadura, y se efectúa un enfriamiento por convección en la zona inferior debida a la placa de apoyo y en la parte superior debida al aire. La malla utilizada la cual tiene un total de 35000 elementos hexaédricos de 20 nodos cada uno, densificados en la zona de la herramienta, con unos 10 en el espesor. Por cuestiones de simetría se modela solamente la mitad del dominio (sólo una chapa), considerándose el plano de simetría el Y ó XZ, siendo X la coordenada longitudinal, Y la transversal y Z la vertical, al igual que en el modelo CFD. Con respecto a la integración temporal, el paso de tiempo fue de 1s para todos los parámetros de soldadura.En este modelo se introdujo un material térmico cuyas propiedades varían con la temperatura de la misma forma que el modelo CFD. Asimismo, valores de coeficientes de convección serán los mismos y los valores de calor aportado serán tomados de este, variando éstos para cada condición de soldadura.

RESULTADOS

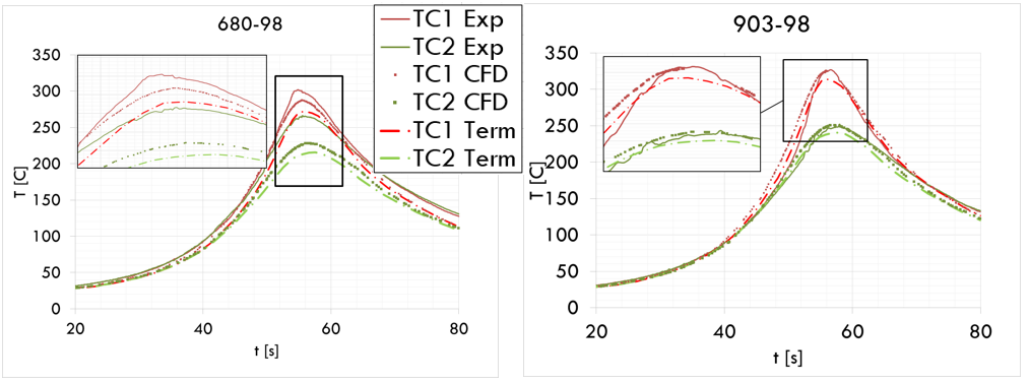
En esta sección se muestran los resultados obtenidos por los modelos numéricos. La Figura 4 muestra los ciclos térmicos obtenidos por éstos para las condiciones de 73mm/min (4a) y 98 mm/min (4b), comparados con los obtenidos por las mediciones experimentales. Se puede ver una gran concordancia entre valores experimentales y numéricos principalmente en la TC1, con la excepción de la condición 903-73 en el cual la temperatura calculada tanto por el modelo CFD como por el térmico es algo mayor. Sin embargo, en la TC2 los ciclos de alta rotación presentan un muy buen ajuste en ambos casos, dando algo menores que los experimentales para 680 rpm. Entre ambos modelos los picos de temperaturas para ambas TCs son bastante similares.



a)

Figura 4 a. Ciclos térmicos, 73mm/min. Mediciones vs. Modelos CFD y Térmico.

ISBN: 978-987-1676-63-7



b)

Figura 4 b. Ciclos térmicos 98 mm/min. Mediciones vs. Modelos CFD y Térmico.

En la Figura 5 se muestra una comparación entre las temperaturas máximas de cada punto de la mitad del dominio respecto a la dirección de soldadura entre ambos modelos. Cabe aclarar que la temperatura máxima obtenida para el modelo CFD, dado que es transitorio, se obtiene trazando diferentes líneas coordenadas sobre el eje de dirección de soldadura (en el lado de retroceso) y tomando el valor máximo alcanzado. A modo de referencia se colocan los valores de las TCs medidos (si bien éstas están en el lado de avance). En la figura se traza una línea punteada de color gris en la posición correspondiente al radio del hombro de la herramienta. Puede verse en primer lugar que las isotemperaturas son más horizontales para el modelo térmico de distribución triangular, mostrando que hay un mayor gradiente térmico en el espesor. Esto se debe a que la distribución de la fuente, al estar aplicada en el plano superior solamente, afecta a la zona superior de la chapa, estando la inferior más influenciada por el enfriamiento inferior. En este gráfico y en los subsiguientes de este tipo, el lado de avance se encuentra a la izquierda y el de retroceso a la derecha.

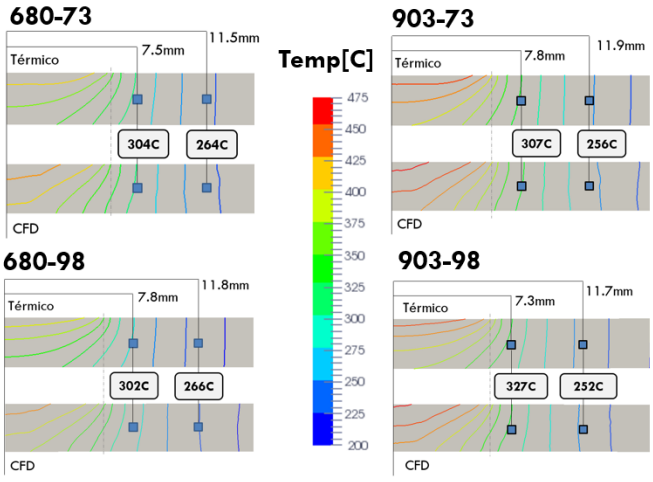


Figura 5. Temperaturas Máximas para las diferentes condiciones de soldadura. Modelo CFD vs. térmico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Figura 6 se muestra un diagrama con las diferencias de temperaturas máximas mostradas anteriormente. En primer lugar se ve que la zona de mayores diferencias se encuentra en el pin, que es justamente donde no se aplica calor en el modelo térmico antedicho, sumado a esto, se ve que las diferencias se hacen más notables para números de pitch bajos. Esto se verá en detalle más adelante. Por otra parte, se ve que las diferencias son más notables en la zona de la herramienta decreciendo hacia los bordes de la chapa. Esto indica tanto que la solución transitoria simplificada del modelo CFD es aceptable, como que la ditribución superficial no afecta demasiado el comportamiento de temperaturas máximas.



Figura 6. Diferencias de temperaturas máximas modelo térmico triangular y modelo CFD

La Figura 7 (izquierda) muestra una línea de isoviscosidad ($7 \times 10^6\ Pa.s$) obtenidas para el modelo CFD superpuestas sobre las macrografías obtenidas experimeintalmente, mostrando el Welding Nugget (WN) que es la zona recristalizada en color más claro [5].

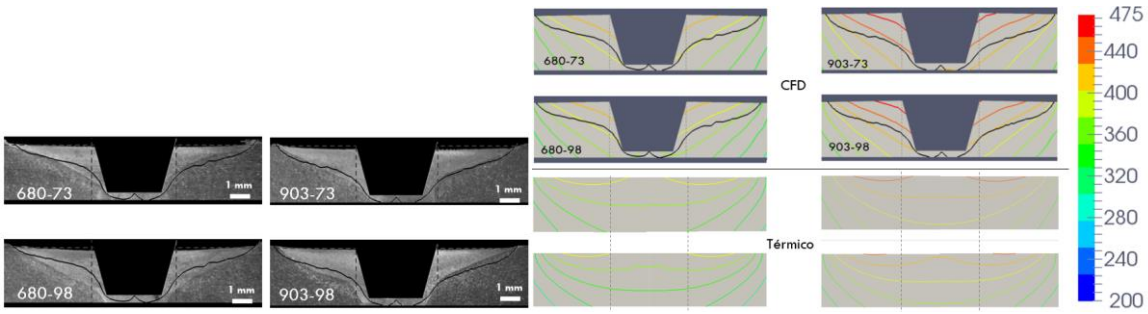


Figura 7. Perfiles de isoviscosidad vs. macrografías (izquierda), y temperaturas CFD (derecha), plano de la herramienta (arriba), y térmico plano central (abajo).

Los ajustes son muy buenos exceptuando la condición 680-98 en su lado de avance, que puede deberse a una gran indentación en el caso experimental. A la derecha se muestra la diferencia entre iso temperaturas en un instante de tiempo, tomado en el mismo plano (plano de la herramienta, modelo CFD) y el plano central en el caso del modelo transitorio FEM. En el caso CFD se superpone esta línea a la de isoviscosidad de la izquierda dada la relación entre las temperaturas y el WN. Se ve que temperaturas en el caso térmico se aplanan hacia el centro, producto de la condición adiabática de simetría, y son bastante superficiales las temperaturas máximas. El modelo CFD por

ISBN: 978-987-1676-63-7

otra parte reproduce mejor estando más similares las líneas con aquella correspondiente a la isoviscosidad.

En la Figura 8 se muestra una comparación de la diferencia entre temperaturas máximas vistas en la Figura 6 y el calor aplicado a cada una de las condiciones de soldadura. Se ve que las diferencias máximas disminuyen claramente con el pitch. Esto puede deberse a que cuanto más alto es éste, es decir más lento es el avance o mayor son las revoluciones (por consiguiente mayor es el calor aportado), la distribución de temperaturas superficial puede llegar más uniformemente a la chapa (teniendo mayor tiempo la difusión), por consiguiente, puede parecerse más a la distribución volumétrica de temperatura (CFD).

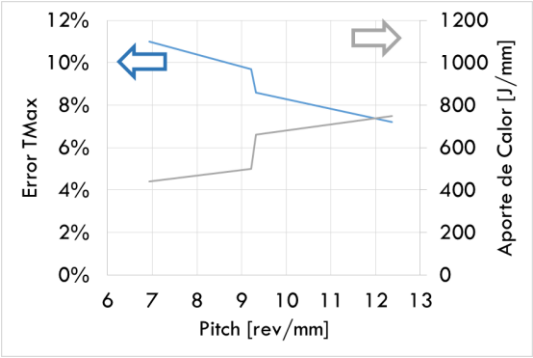


Figura 8. Influencia del pitch en el error de temperaturas máximas obtenidas por ambos modelos

En la Figura 9 se muestran una comparación de las temperaturas en el plano superior obtenidas para ambos modelos.

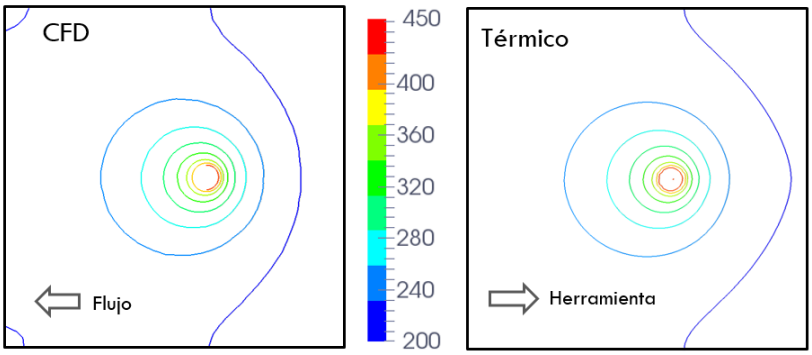


Figura 9. Temperaturas en plano superior. Modelos CFD (izquierda) y térmico (t=57s), 680-73

Para el caso del modelo térmico, se muestran las temperaturas en el momento en el cual la fuente se encuentra a 90 mm del borde inicial de la chapa, es decir a la misma distancia en la que se encuentra al del modelo CFD. Se ha reflejado la solución obtenida con respecto a la linea horizontal central dado que es simétrico. Se ve que las temperaturas en el modelo CFD son muy similares

ISBN: 978-987-1676-63-7

aunque son menores que en el modelo térmico, específicamente en el borde inicial de la chapa (borde derecho, inlet en el dominio CFD). Esto se debe a que en este modelo las condiciones de temperatura de 27C son impuestas a la entrada, mientras que en el modelo térmico, este borde se calienta cada vez más a medida que la herramienta se acerca, es decir, en este caso el modelo transitorio es más correcto que el modelo CFD.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia del flujo de calor en las temperaturas en el espesor y en la totalidad de la chapa obtenidas por dos aproximaciones numéricas diferentes. En primer lugar se ve que en la zona de termocuplas, las temperaturas son similares para ambos modelos.

Se puede ver que con respecto a las las temperaturas máximas respecto a la dirección de soldadura, éstas no varían significativamente fuera de la zona de la herramienta. Con respecto a las diferencias en la zona agitada, puede verse que las temperaturas máximas en esta zona tienen un máximo de aproximadamente un 10%. Se ve que la diferencia de temperaturas en un instante determinado cercano a la zona central, en un plano transversal, tiene una forma similar a las temperaturas máximas, siendo el modelo CFD el que copia mejor la línea de la zona recristalizada, mientras que en el modelo térmico se ve que estas temperaturas son inferiores conforme se aleja de la fuente hacia el plano inferior, evidenciando un mayor gradiente térmico.

Respecto a las temperaturas instantáneas en todo el dominio, en el borde superior de la chapa, muestra al modelo CFD algo más frío aguas arriba de la herramienta. Esta diferencia se debe a la limitación del modelo estacionario de CFD por imponer una temperatura en una zona cercana a la herramienta, y se hará más significativa a medida que la fuente llegue al borde de la chapa, sin embargo a fines de estudiar la distribución en el plano central, estas diferencias no son significativas.

Puede concluirse que si los campos térmicos obtenidos por ambos modelos fueran utilizados para calcular tensiones residuales, los gradientes de temperatura mayores en el espesor del modelo térmico podrían dar mayores tensiones en esta zona, y debería estudiarse cuál es el efecto en el conjunto.

Como futuros trabajos, puede proponerse para el modelo térmico una fuente volumétrica considerando las zonas de pin y no sólo la del hombro de la herramienta, y analizando cual es la diferencia de temperaturas resultante en el espesor de la chapa.

5. REFERENCIAS

[1] Mishra R., Mahoney, M. *Friction Stir Welding and Processing.* ASM International, USA, 2007.

[2] Schmidt H., Hattel J., Wert J. *An analytical model for the heat generation in friction stir welding.* Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 12, p. 143–157, 2004.

[3] Tufaro L. N., Svoboda H. G*. Estudio de los Ciclos Térmicos Adquiridos durante FSW mediante Modelos Analíticos y Numéricos.* CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 38º, 2012, Ouro Preto.

[4] Buglioni L.; Tufaro L.N.; Svoboda H.G. *Thermal Cycles and Residual Stresses in FSW of Aluminum Alloys: Experimental Measurements and Numerical Models*. Procedia Materials Science, 9, p. 87-96, 2014.

[5] Soundararajan V., Zekovic S., Kovacevic R. *Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, p. 1577-1587, Abr. 2005.

[6] Grujicic M. et. al. *Fully coupled thermomechanical finite element analysis of material evolution during friction-stir welding of AA5083*. Proc. IMechE Vol. 224 Part B: J. Engineering Manufacture, 224, 2009.

[7] Arora A. et al. *Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments*. Scripta Materialia, 60, p.13-16, 2009.

[8] Buglioni L., Tufaro L.N., Svoboda H.G. *CFD numerical model development for friction stir welding of aluminum alloys.* CILAMCE (Ibero Latin American Congress on Computational Methods in Engineering), 36, 2015, Rio de Janeiro, Brasil.

[9] Wang H., Colegrove P.A., Dos Santos, J.F. *Numerical investigation of the tool contact condition during friction stir welding of aerospace aluminium alloy*. Computational Materials Science, 71, p. 101-108, Feb. 2013.

[10] Tufaro L.N., Buglioni, L.; Svoboda H.G. *Análisis de Carga Axial y Potencia Consumida durante la Soldadura por Fricción-Agitación (FSW) de Aleaciones de Aluminio*. CONSOLDA CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 40, 2014, San Pablo.

[11] Sheppard T., Wright D. *Determination of flowstress. Part 1: Constitutive equation for aluminium alloys at elevated temperature*. Metals Technology, 6, 215-23, 1979.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a INTI-Mecánica y a la Universidad de Buenos Aires por el financiamiento y la utilización de sus instalaciones para el desarrollo del presente trabajo. Así también al personal de INTI-Mecánica y del Laboratorio de Materiales y Estructuras de FIUBA por la asistencia brindada.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL TIEMPO DE RESPUESTA EN SISTEMAS DE FRENOS NEUMÁTICOS EN VEHÍCULOS REMOLCADOS

Cazzola Gustavo José, Arias Rubén Eduardo, Mirassou Horacio Martín, Dusau Juan Ulises.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional General Pacheco, Departamento de Ingeniería Mecánica.
Hipólito Irigoyen 288, General Pacheco (B1617FRP), Buenos Aires, Argentina
Correo-e: gjcazzola@gmail.com

RESUMEN

El sistema primario que garantiza la seguridad de los vehículos en la ruta corresponde al sistema de frenos. El mismo debe detener el vehículo en la mínima distancia posible, sin perder capacidad de control y operar con el menor esfuerzo para el conductor.

El tiempo de reacción del conductor y el tiempo de respuesta del sistema de frenos influyen en la distancia de frenado. En vehículos equipados con sistemas de frenos neumáticos, tales como ómnibus, camiones y remolques, el tiempo de respuesta del sistema de frenos es un parámetro determinante en la distancia de frenado, el cual se ve influenciado por la longitud de los vehículos, siendo crítico en vehículos combinados, tales como camiones con acoplados o unidades tractor con semirremolques.

Este trabajo utiliza un modelo detallado de un subsistema neumático, cuyas ecuaciones diferenciales no lineales describen la evolución transitoria de la presión en una cámara de freno de vehículos remolcados durante la fase de aplicación. En respuesta a la solicitud de entrada del pedal de frenos llevada a cabo por el conductor y mediante la resolución numérica de dicho sistema de ecuaciones diferenciales, se obtiene la representación del fenómeno transitorio de la presión en función del tiempo en la cámara de freno para una determinada presión de suministro.

La simulación se corrobora experimentalmente a través de transductores de presión y un sistema electrónico de adquisición de datos que permite registrar los parámetros presión y tiempo en el circuito de freno neumático.

Como resultado de este trabajo se concluye que el modelo ha permitido determinar con claridad la influencia de longitudes y diámetros de cañerías, volúmenes de depósitos de almacenaje de aire y válvulas en las distintas fases de aplicación de los frenos.

Palabras Claves: *frenos neumáticos, tiempo de respuesta, vehículos remolcados, simulación*

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de frenos en los vehículos constituye el principal sistema de seguridad activa. En el caso particular de los semirremolques (peso bruto total mayor a 10.000 kg), el sistema de frenos es neumático (Figura 1). El mismo se compone básicamente de dos subsistemas: el subsistema neumático y el subsistema mecánico.

En los vehículos remolcados de gran porte los principales componentes del subsistema neumático son: una válvula relé de servicio, una válvula de liberación rápida, un compresor de aire (que carga un depósito de almacenamiento), cámaras de frenos, entre otros. El subsistema mecánico (Figura 2) comienza a partir de la cámara del freno e incluye la varilla de empuje que, a través del tensor de ajuste, transforma la fuerza de la cámara (o actuador) en una fuerza de torsión sobre el eje de levas del freno S-CAM. Así genera el movimiento de la zapata, que provoca el contacto del material de fricción sobre la campana de freno, esto produce la desaceleración del vehículo.

Se debe evaluar la distancia de frenado para cumplir con los criterios definidos en el Reglamento número 13 de Naciones Unidas, normativa que se aplica en nuestro país a través del anexo A del Decreto Reglamentario 779 / 95 de la Ley Nacional de Tránsito y Seguridad Vial 24449. La distancia de frenado depende de dos características principales. La primera consiste en la capacidad del subsistema mecánico para generar la fuerza necesaria para detener la marcha del vehículo. La segunda corresponde al tiempo de respuesta del sistema, que es el tiempo que transcurre desde que se acciona el comando de frenos hasta que comienza a actuar el sistema de frenos para detener al vehículo. Esta última característica es el objeto de nuestro estudio.

Subramanian S.C. [1] propuso un modelo matemático para la predicción de transitorios de presión en la cámara de freno con el modelado de una válvula de pedal. Natarajan S.V. [2] propuso el modelado de una válvula relé, que complementa al trabajo [1]. En los estudios [3, 4] se demuestra cómo en los semirremolques de gran porte (con longitudes de 8 a 15 m) el tiempo de respuesta del sistema de frenos está influenciado por la longitud de las tuberías (que depende de la longitud de los vehículos) y la posición de los ejes en los mismos. En el trabajo [5] se corroboran experimentalmente los tiempos de respuesta calculados con las ecuaciones de Limpert R. [3].

Este trabajo propone una simulación numérica -que se corrobora experimentalmente en un laboratorio con un banco de pruebas- para la obtención del tiempo de respuesta -en la fase de aplicación del sistema de frenos neumáticos de servicio en vehículos remolcados de gran porte- a partir de un modelo matemático basado en los trabajos de Limpert [3], Subramanian [1] y Natarajan [2]. En la primer sección de esta publicación se presenta una breve descripción de los sistemas de frenos neumáticos de servicio en vehículos remolcados de gran porte. En la siguiente sección se explican los fundamentos del análisis del tiempo de respuesta realizado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Luego se analizan los detalles del modelo matemático principal y del método de cálculo numérico utilizado. Posteriormente se describe la corroboración experimental del modelo propuesto. En las dos secciones siguientes se analizan los resultados y se exponen las conclusiones.

2. SISTEMA DE FRENOS NEUMATICOS DE SERVICO EN VEHICULOS REMOLCADOS

Los sistemas de frenos de los vehículos remolcados (Figura 1) deben poseer tres funciones básicas: el freno de servicio, el freno de estacionamiento y el freno automático. Este último se utiliza en los casos de avería en el sistema de alimentación neumático o separación mecánica entre el vehículo tractor y el semirremolque. El análisis de tiempos se centra en el sistema de freno de servicio. El mismo debe procurar detener al vehículo, en forma segura, manteniendo el control del mismo y permitiendo la graduación de la acción de frenado ante distintas condiciones de velocidad y de carga del vehículo. El sistema de freno de servicio del semirremolque es comandado por medio de una válvula relé, la cual tiene como finalidad producir el accionamiento de las cámaras de freno. La misma recibe la señal de frenado desde la unidad tractora. Esta señal es previamente modulada por una válvula, cuya modulación depende del estado de carga del vehículo. Posteriormente, la señal de presión modulada ingresa a la válvula relé. Esta se encarga de entregar el aire almacenado en los reservorios a las cámaras de freno (Figura 3), en forma proporcional a la señal de entrada que ingresa. Por lo tanto, da inicio a la presurización de dichas cámaras que contienen un diafragma de hule. Entonces, el aire empuja contra el diafragma, venciendo al resorte retractor y moviendo la varilla de empuje hacia adelante para producir el frenado del vehículo. Una vez que la señal de freno deja de actuar, se produce la descarga del aire que se encuentra en las cámaras de freno, a través de las válvulas de descarga rápida. La fase de presurización del aire dentro de la cámara de freno de servicio es modelada por los trabajos de Subramanian S.C. [1], Natarajan S.V. [2] y Subramanian S.C. et al [6].

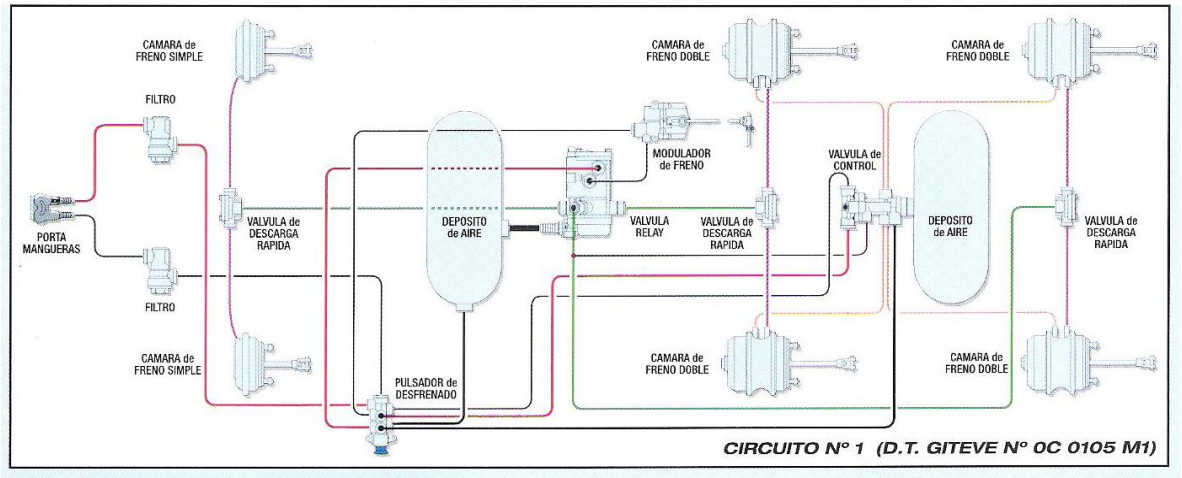


Figura 1. Esquema circuito de freno correspondiente a vehículo semirremolque.

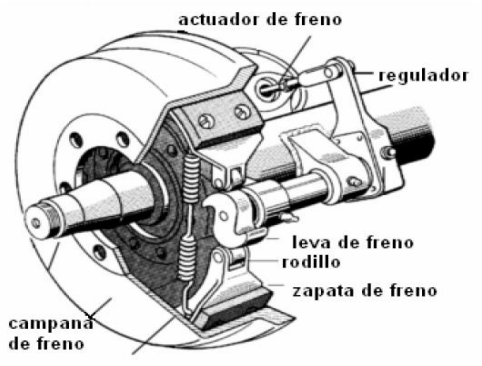


Figura 2

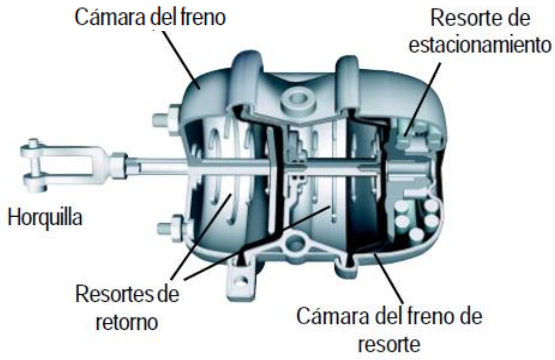


Figura 3

3. TIEMPO DE RESPUESTA

En la bibliografía consultada, Limpert R. [3] establece que el tiempo de respuesta puede estar compuesto de tres partes (Figura 4). La primera parte del tiempo de retardo proviene de la velocidad con que la onda de freno se desplaza en una longitud determinada, este retardo de tiempo indica cuanto tiempo le llevará a la señal de presión recorrer la distancia desde la válvula de aplicación de freno hasta la válvula relé. La segunda parte del tiempo de respuesta está dada por el movimiento del pistón de la cámara de freno requerido para eliminar el juego entre la cinta de frenos y la campana de freno, este tiempo es proporcional al volumen desplazado de la cámara de freno, para mover la zapata contra la campana. El tercer tiempo de retardo es el tiempo requerido para que la línea de presión alcance un máximo especificado, generalmente un 90 % de la presión del tanque de aire. Este tiempo es proporcional al volumen total y a la resistencia a la circulación del aire del sistema de freno. Para las dos últimas partes de tiempo, desde la válvula relé hasta el pulmón de freno, se utiliza una adecuación del modelo matemático desarrollado por Subramanian S.C. [1] y Natarajan S.V. [2], que se explica en detalle en la siguiente sección.

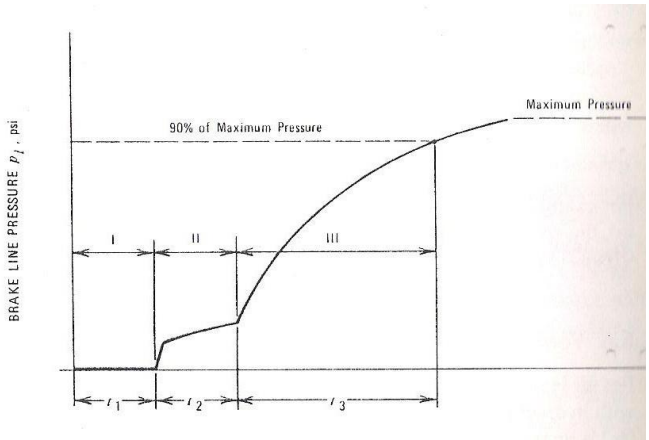


Figura 4. Esquema de la curva de tiempo respuesta.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para simplificar el análisis, se puede considerar al circuito de la siguiente manera (Figura 5):

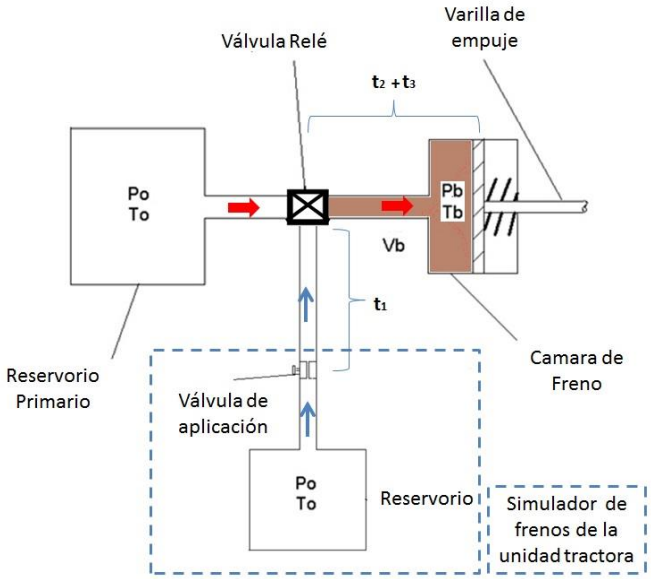


Figura 5. Esquema simplificado del circuito de frenos

El tiempo t_1 requerido para que la onda de presión recorra la distancia entre la válvula de aplicación del simulador de frenos y la válvula relé del remolque, se obtiene con la siguiente expresión:

$$t_1 = \frac{l_2}{c} \tag{1}$$

donde: $c =$ velocidad del sonido en aire [m/s]

$l_2 =$ longitud de la línea de freno entre la válvula de aplicación y la válvula relé [m]

La velocidad del sonido es una función de la densidad del aire. Para condiciones atmosféricas: $c = 333$ [m/s]. El tiempo es levemente afectado por curvas y accesorios típicos que habitualmente se encuentran en un sistema de frenos. El tiempo requerido por la onda de presión para viajar entre la válvula de aplicación del simulador y la válvula relé del remolque es aproximadamente 0,02 a 0,05 [s] para una combinación de tractor con acoplado. El tiempo de retardo t_2 y t_3 sumados se obtienen cuando la simulación numérica (ver explicación en la siguiente sección) de la presión transitoria en la cámara de freno alcance el 90% de la máxima presión del reservorio.

Entonces el tiempo total de retardo es:

$$t_{total} = (t_1 + t_2 + t_3)(s) \tag{2}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. MODELADO MATEMÁTICO

El modelo propuesto fue desarrollado por Subramanian S.C. [1] para el sistema con la válvula de pié. Las consideraciones empleadas en este modelo son: el aire se asume perfectamente elástico descartando su viscosidad, la apertura de la válvula es considerada como una tobera, el flujo a través de la válvula es asumido unidimensional y adiabático, las propiedades del fluido son uniformes en todas las secciones transversales de la tobera, los efectos de compresibilidad del aire en las mangueras se suponen despreciables, se supone que la presión de suministro actuante sobre el pistón de la válvula no tiene transitorios.

Si la relación de presiones es menor que un valor crítico, se suponen las condiciones de flujo de estrangulación. La relación de la presión crítica está dado por:

$$\left(\frac{P_b}{P_0}\right)_{cr} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right)} \tag{3}$$

Con las consideraciones anteriores Subramanian [1] propone la siguiente ecuación diferencial de primer orden no-lineal en términos de Pb (ecuación 4). Esta es la ecuación que gobierna la presión transitoria en la cámara de frenos durante la fase de aplicación donde el término P_0 corresponde a la presión de suministro. Los coeficientes de esta ecuación son función de P_b y A_p. Esta ecuación es resuelta con la condición inicial que para el inicio de la fase de aplicación es: $P_b = P_{atm}$.

$$\left(A_p.C_D.\left(\left(\frac{2.\gamma}{\gamma-1}\right).\frac{1}{R.T_0}\left[\left(\frac{P_b}{P_0}\right)^{\left(\frac{2}{\gamma}\right)}-\left(\frac{P_b}{P_0}\right)^{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)}\right]\right)^{\frac{1}{2}}\operatorname{sgn}(P_0-P_b)\right).P_0 = \tag{4}$$

$$\begin{cases}\left(\dfrac{V_{01}.P_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\gamma.R.T_0.P_b^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}\right).\dot{P}_b & si \quad P_b < P_t \\ \left(\dfrac{V_b.P_0^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}{\gamma.R.T_0.P_b^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}+\dfrac{P_b^{\frac{1}{\gamma}}.A_b^{\,2}.P_0^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}{R.T_0.K_b}\right).\dot{P}_b & si \quad 0 \le x_b < x_{b\max} \\ \left(\dfrac{V_{02}.P_0^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{\gamma.R.T_0.P_b^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}}\right).\dot{P}_b & si \quad x_b = x_{b\max}\end{cases}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con la ecuación de la presión crítica se puede expresar el lado izquierdo de la ecuación (4) como:

$$f(P_b, A_p) = \begin{cases} A_p.C_D.P_0 \left(\left(\frac{2.\gamma}{\gamma-1} \right). \frac{1}{R.T_0} \left| \left[\left(\frac{P_b}{P_0} \right)^{\left(\frac{2}{\gamma}\right)} - \left(\frac{P_b}{P_0} \right)^{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)} \right] \right| \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(P_0 - P_b) \\ si \quad \frac{P_b}{P_0} > \left(\frac{P_b}{P_0} \right)_{cr} \\ A_p.C_D.P_0 \left(\left(\frac{2.\gamma}{\gamma+1} \right). \frac{1}{R.T_0} . \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\left(\frac{2}{\gamma-1}\right)} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(P_0 - P_b) \\ si \quad \frac{P_b}{P_0} \leq \left(\frac{P_b}{P_0} \right)_{cr} \end{cases} \quad (5)$$

La ecuación (4) fue resuelta numéricamente aplicando el método de Euler. Se empleó un incremento de tiempo de 0,0001 segundos. La simulación de la fase de aplicación comienza cuando el valor de Rxpv es mayor a cero que corresponde a la apertura de la válvula relé. Dos condiciones determinan la finalización de la fase de aplicación: el valor de Rxpv es menor o igual a cero (que corresponde al cierre de la válvula) y la otra es que la presión en la cámara de frenos se iguala a la presión de suministro. La simulación finaliza cuando alguna de estas dos condiciones es satisfecha [1,2]. Los datos de los componentes del banco de pruebas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos del conjunto del banco de pruebas:

Parámetro	P_{atm}	P_o	V_{o1}	V_{o2}	γ	x_{bmax}
Valor	101.356 N/m²	717.356 N/m²	0,000280 m³	0,0005742 m³	1,4	0,019 m
Parámetro	F_{kbi}	K_b	A_b	R	R_{rp}	T_o
Valor	154 N	445.000 N/m	0,015484 m²	287 J/kgK	0,0122 m	298 °K

C_D es el coeficiente de descarga, su valor varía en función de la forma geométrica y terminación superficial de la boquilla y su asiento en la válvula relé, se adoptó C_D = 0,52. Para este tema se consultaron los trabajos de Beater P. [7], Szente V., Vad. J. [8], Hassan J. et al [9], y Mithun. S. et al [10] como antecedentes en relación con la aplicación del coeficiente C_D. Rxpv es la distancia entre la boquilla y su asiento. Ap es el área de la superficie cilíndrica imaginaria a través de la cual pasa el caudal de aire entre la boquilla y su asiento. La ecuación para calcular Ap [1,2,6] es:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$Ap = 2 \pi Rrp Rxpv \quad (6)$$

donde Rrp es el radio del orificio en el asiento por donde pasa el caudal de aire. Cuando la boquilla está cerrada el valor de Rxpv es cero, entonces el valor de Ap es cero. Esto se muestra en la Figura 6.

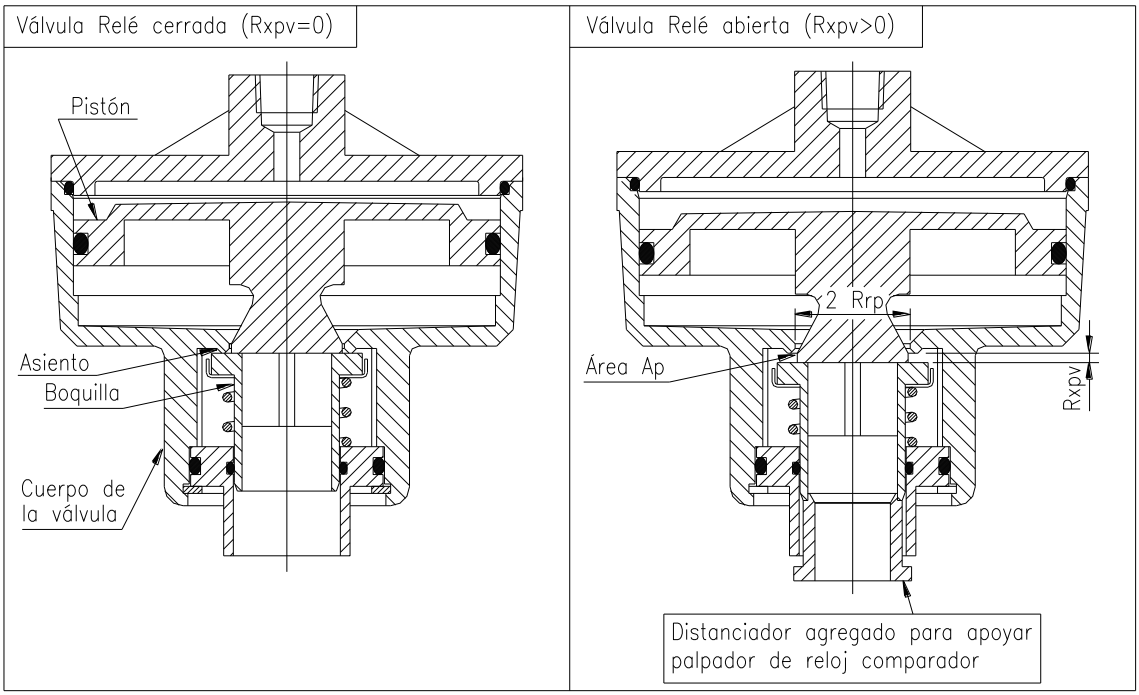


Figura 6. Vista en corte de la Válvula Relé

5. MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE Ap EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Para la simulación numérica se debe disponer como dato de ingreso al valor del área Ap en función del tiempo. Ap es función lineal de la coordenada Rxpv según la ecuación (6). En el laboratorio se midió la coordenada Rxpv en función del tiempo. Para realizar la medición se colocó un reloj comparador sujetado a un tanque del banco de pruebas con una base magnética. El palpador del reloj comparador se apoyó normal a la cara plana del distanciador indicado en la Figura 6. La Figura 7 es una fotografía de este montaje. Se utilizó una cámara filmadora (120 cuadros por segundo) para filmar el movimiento de la aguja del reloj comparador sobre la escala con menor división de 0,01 mm y rango de medición 10 mm. Se accionó el banco de pruebas varias veces, se relevaron pares de valores de tiempo y Rxpv para registrarlos en una planilla electrónica, con esto se graficó la Figura 8: Rxpv en función del tiempo.

ISBN: 978-987-1676-63-7

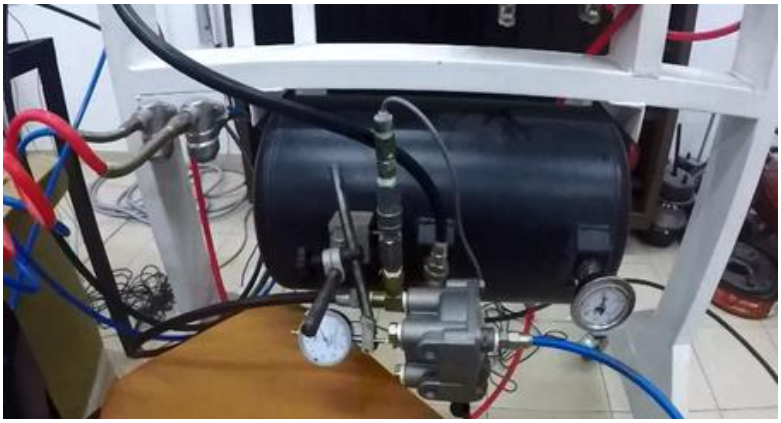


Figura 7. Banco de pruebas: reloj comparador instalado para medir Rxpv.

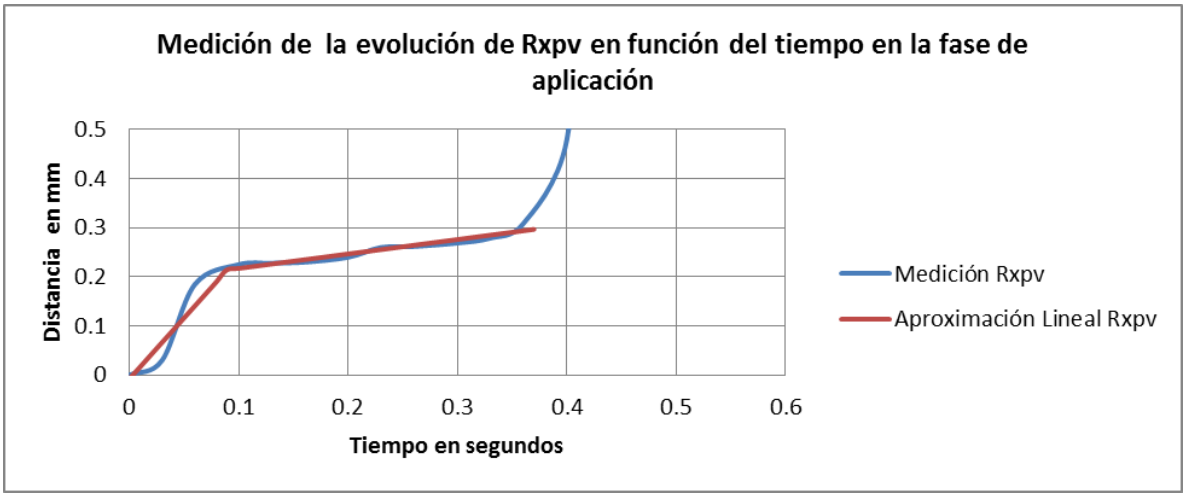


Figura 8. Evolución de Rxpv

La aproximación lineal del grafico Rxpv se realizó mediante el método de los cuadrados mínimos. Es oportuno aclarar que dicha aproximación lineal se extiende solamente hasta los 0,37 segundos porque se ha corroborado experimentalmente que la duración del fenómeno transitorio en la cámara de frenos -para alcanzar la presión de suministro máxima- no supera los 0,35 segundos.

6. CORROBORACIÓN EXPERIMENTAL

La corroboración del modelo matemático se realizó empleando un simulador de frenos, el cual está compuesto por un reservorio de aire y una válvula que es la encargada de enviar la señal de activación a la válvula relé del circuito de frenos. La válvula relé está conectada a un reservorio de aire, el cual, a través de la apertura de la válvula relé, envía el aire a la cámara de frenos. Para determinar la curva del tiempo de respuesta en la cámara de frenos se emplearon dos transductores de presión, uno se instaló en la salida de la válvula de aplicación del simulador de freno y otro en la entrada de la cámara de frenos. La señal de los transductores de presión es

ISBN: 978-987-1676-63-7

enviada a un osciloscopio, para registrar la presión en función del tiempo. P_b=f(t). Las Figuras 9 a 12 son fotografías del conjunto del banco de pruebas utilizado en el laboratorio.

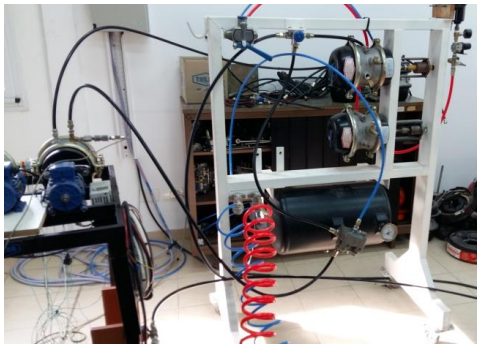


Figura 9



Figura 10

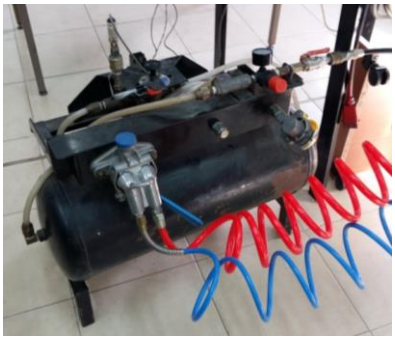


Figura 11

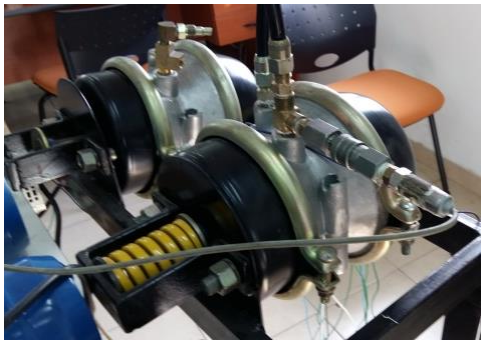


Figura 12

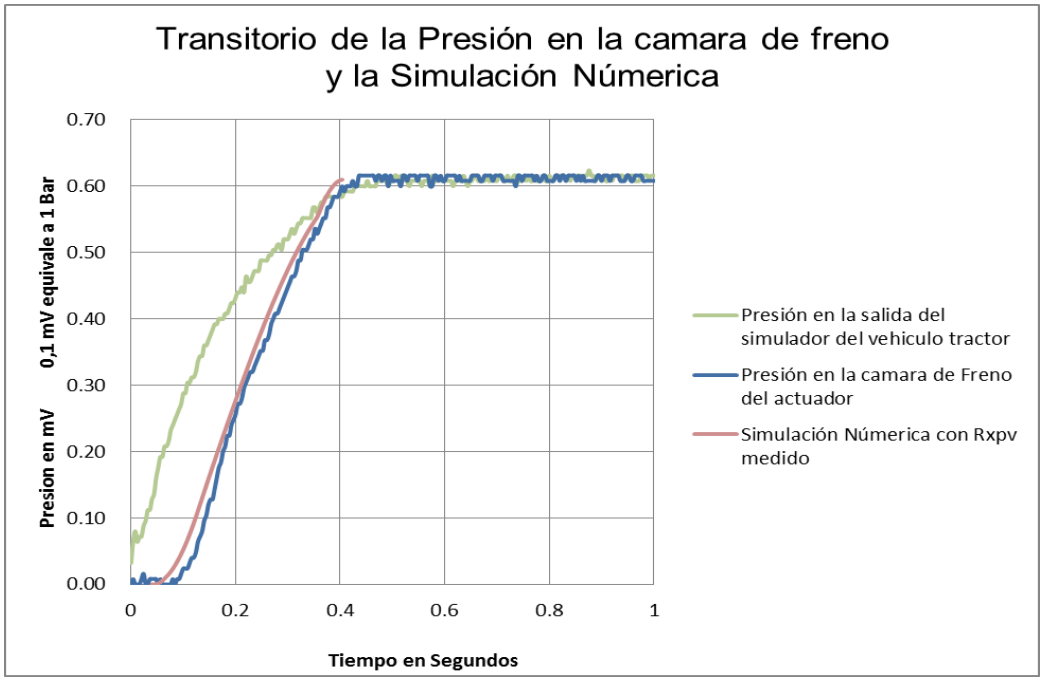


Figura 13. Mediciones experimentales de Pb comparadas con resultado de simulación numérica.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la figura 13 se muestra la comparación entre el resultado obtenido mediante el modelo matemático y la validación experimental del transitorio de la presión en función del tiempo en la cámara de freno para una determinada presión de suministro.

7. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Se puede observar analizando la figura 13, que el resultado de la simulación numérica presenta notable aproximación a la evolución de la presión Pb en el interior de la cámara de freno respecto a la medida experimentalmente. Se observa también en la figura 13 que el intervalo de tiempo del transitorio de presión en la cámara de freno medido es inferior a los 0,35 segundos, que es coherente con la hipótesis asumida al recortar el intervalo de tiempo de Rxpv (Figura 8).

En la tabla 2 se evalúan los resultados de los tiempos de respuesta obtenidos con el modelo matemático y los medidos experimentalmente.

Tabla 2. Resultado de los tiempos medidos y obtenidos con el modelo matemático:

	Modelo	Ensayo	Error porcentual
Tiempo t_1	0,041 s	0,04 s	2,5 %
Tiempos $t_2 + t_3$	0,366 s	0,40 s	8,5 %
Tiempo Total ($t_1+t_2+t_3$)	0,407 s	0,440 s	7,5 %

Como se observa en la tabla 2, el error porcentual del tiempo total del tiempo de respuesta del modelo matemático respecto al ensayo es de un 7,5 %.

8. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el modelo matemático reproduce con un error aceptable (7,5%) el tiempo de respuesta medido en un sistema de frenos.

Se pudo comprobar que los resultados de la simulación numérica son sensibles con respecto al valor del coeficiente de descarga C_D que deba adoptarse, el cual está relacionado con la forma geométrica de la boquilla y su asiento (en la válvula relé) y la terminación superficial de esas piezas. Esto parece indicar que mejorando la calidad de esas superficies (en esa microzona) se podrá mejorar el tiempo de accionamiento en las cámaras de los frenos reales. Esto puede ser el objeto de otra investigación que se enfoque principalmente en esa característica de la válvula relé.

ISBN: 978-987-1676-63-7

9. REFERENCIAS

[1] Subramanian S.C. *Modeling the Pneumatic Subsystem of a S-cam Air Brake System*. Texas A&M University, Thesis 2003.

[2] Natarajan S.V. *Modeling the Pneumatic Relay Valve of an S-cam Air Brake System*. Texas A&M University, Thesis 2005.

[3] Limpert R. *Brake Design and Safety*. Society of Automotive Engnieers, Inc. 400 Commonwealth Drive. Warrendale, PA 15096-0001. ISBN 1-56091-261-8, 1992.

[4] Arias R., Cazzola G., García J. *Estudio teórico - experimental del comportamiento de sistemas de frenos de vehículos remolcados de gran porte*. Congreso Nacional de Ingenieria Mecánica y Eléctrica, Buenos Aires 24 y 25 de Agosto 2006.

[5] Cazzola G., Arias R., García J., Mirassou H., Ramos A. *Estudio del tiempo de respuesta de los sistemas de frenos neumáticos en vehículos remolcados*. Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica “IV CAIM 2014”, Resistencia, Provincia de Chaco, 2, 3, 4, 5 de Septiembre 2014.

[6] Subramanian S.C., Darbha S., Rajagopal K.R. *Modeling the Pneumatic Subsystem of an S-cam Air Brake System* (2004) Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, 126 (1), pp. 36-46

[7] Beater P. *Pneumatic Drives. System Design, Modelling and Control*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2007. ISBN-10 3-540-69470-6.

[8] Szente V., Vad J. *A Semi-empirical Model for Characterisation of Flow Coefficient for Pneumatic Solenoid Valves.* Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. Vol. 47, No 2, pp. 131-142, 2003.

[9] Hassan J., Oleiwi. M., Mansour. A., Hashim. W., *Improving Energy Saving in Conventional Pneumatic Systems by Using Air Booster Experimentally*, Eng. & Tech. Journal, Vol.33, Part (A), No.8, pp. 2012-2026, 2015.

[10] Mithun S., Mariappa S., Gayakwad S. *Modeling and Simulation of Pneumatic Brake System Used in Heavy Commercial Vehicle,* IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 11, Issue 1 Ver. II, pp 01-09, Jan. 2014.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, el CIDIV y el Departamento de Ingeniería Mecánica de UTN FRGP por el apoyo brindado para llevarlo a cabo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

TEORÍA DE VIGA TIMOSHENKO PARA EL ANÁLISIS DE FRECUENCIAS DE NANOTUBOS SIMPLEMENTE APOYADOS CON BIOMOLÉCULA CONCENTRADA

M. A. De Rosa[1], M. Lippiello[2], C. Ceraldi[3] y H. D. Martín[4]

[1] School of Engineering, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza, Italy
correo-e: maria.derosa@unibas.it.
[2] Department of Structures for Engineering and Architecture
Via Forno Vecchio 36, 80134 Naples, Italy, correo-e: maria.lippiello@unina.it.
[3]Department of Structures for Engineering and Architecture, University of Naples "Federico II", Via Forno Vecchio 36, 80134 Naples, Italy, carla.ceraldi@unina.it, http://www.unina.it
[4]Facultad Regional Reconquista UTN. Parque Industrial Reconquista,
(3560) Reconquista, Santa Fe, Argentina. correo-e: hmartin@frrq.utn.edu.ar

RESUMEN

Los nanotubos de carbono (CNT) constituyen un ejemplo destacado de los nanomateriales y nanoestructuras ya que poseen extraordinarias propiedades mecánicas y físicas, que conducen a una gran variedad de aplicaciones en muchos campos diferentes como nano-osciladores, nanoelectrónica, nanocompuestos y nanosensores. Varias investigaciones han mostrado que los nanotubos de carbono poseen una fuerza extraordinaria, además de superiores conductividades eléctricas y térmicas. Por otra parte, este tipo de propiedades destacadas hacen de los CNT candidatos prometedores para sensores de masas de alta resolución.

Muchos investigadores han implementado modelos continuos para el estudio del comportamiento vibratorio de los CNT. Aunque los métodos continuos clásicos son eficientes en la realización de análisis mecánico de los CNT, es cuestionable su aplicabilidad para identificar los efectos en el comportamiento mecánico a pequeña escala de los nanotubos. Los nanosensores son simples dispositivos de ingeniería diseñados para detectar y transmitir información acerca de las nanopartículas y biomoléculas. Los sensores de masa de tamaño nanométrico se basan en el hecho de que la frecuencia de resonancia es sensible al resonador y a la masa adherida. El cambio de la masa unida al resonador provoca que la frecuencia de resonancia se desvíe de su valor original.

Varios autores han realizado análisis de frecuencia de los sensores de masa basados en CNT, utilizando la teoría no local de viga Euler-Bernoulli y la teoría no local de viga Timoshenko.

El presente trabajo trata sobre el análisis dinámico, basado en la teoría de Timoshenko no local, del nanotubo de carbono de pared simple (SWCNT) con vínculos simples y una masa ubicada en una posición genérica. Se arriba a la expresión de frecuencia no local; se calculan las frecuencias naturales y se realizan resultados numéricos para diferente posición de la biomolécula.

Palabras Claves: *Nanotubos, Frecuencias Naturales, Teoría Timoshenko, Biomolécula adherida.*

1. INTRODUCCIÓN

Los nanotubos de carbono (CNT), descubiertos en 1991 por Sumio Iijima [1], constituyen un ejemplo destacado de los nanomateriales y nanoestructuras que han inspirado extensas actividades de investigación en el campo de la ciencia y la ingeniería debido a sus notables propiedades mecánicas, físicas y eléctricas. Como resultado de estas actividades de investigación existe una amplia gama de aplicaciones, como nanoosciladores, la nanoelectrónica, nanocompuestos y nanosensores, en el que son significativas las características de vibración de los nanotubos de carbono. Por otra parte, estas características hacen de los CNT candidatos prometedores para sensores de masas de alta resolución y existen varios estudios al respecto. Desde el punto de vista teórico, la nanoescala de estas estructuras sugiere un modelo atomista, pero este enfoque resulta ser muy caro. Por otro lado, las teorías de vigas habituales (Euler-Bernoulli, Timoshenko) no reflejan la influencia del tamaño-efecto, ya que son inherentes a la escala libre, por lo que es habitual adoptar la teoría no local de la elasticidad, como lo desarrollado por Eringen en [2-3]. En [4] Reddy informa de un desarrollo completo de las teorías clásicas y considerando la deformación por corte en vigas, utilizando las ecuaciones diferenciales constitutivas no locales y derivó las soluciones de flexión, pandeo y frecuencias naturales en vigas simplemente apoyadas. Otras aplicaciones de la teoría de la elasticidad no local han sido empleadas en CNT, en el estudio del problema de pandeo [5-6] y los problemas de vibración, mediante la aplicación de las teorías de corte, de la cáscara de Euler-Bernoulli y teoría de la viga Timoshenko [7].

Los nanosensores son dispositivos simples de ingeniería diseñados para detectar y transmitir información sobre las nanopartículas y biomoléculas. Los sensores de masa de tamaño nanométrico se basan en el hecho de que la frecuencia de resonancia es sensible al resonador y la masa unida. El cambio en la masa unida en el resonador hace desviarse de su valor original a la frecuencia de resonancia. El desafío clave en la detección de masas es en la cuantificación de los cambios en las frecuencias de resonancia debido a los pesos añadidos. Recientemente, la detección de masas basado en las herramientas nanomecánicas resonantes, ha sido objeto de creciente interés. Por ejemplo para explorar la idoneidad de los nanotubos de carbono de pared simple como un dispositivo sensor de masa en muchas aplicaciones de detección, los resultados de la simulación, con el Método de los Elementos Finitos para la frecuencia de resonancia, se compararon con los resultados numéricos obtenidos por el método de Rayleigh Ritz en vigas que no tiene nanopartículas y con una nanopartícula en la punta, o bien en distintas posiciones intermedias a lo largo de su longitud [8].

ISBN: 978-987-1676-63-7

El uso de nanotubos de carbono de pared simple como biosensores ha sido examinado recientemente por Chowdhury et al. [9] utilizando el enfoque de la mecánica del continuo. En este sentido, varios autores han realizado el análisis de frecuencia de los CNT basado en sensores de masa, utilizando las teorías no locales de vigas Euler-Bernoulli [9-10] y Timoshenko [11-12].

En el presente trabajo se realiza el análisis dinámico, basado en la teoría no local de Timoshenko, de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT), simplemente apoyado con una masa unida, ubicada en una posición genérica. Considerando la teoría no local de vigas Timoshenko se calculan las frecuencias naturales, resolviendo un sistema de ecuaciones de movimiento en SWCNT con una masa añadida.

Por otra parte, se define el cambio de frecuencia como la divergencia entre las frecuencias fundamentales de SWCNT con y sin la masa concentrada agregada y considerando el efecto no local. Lo antes dicho ayuda como índice para evaluar cualitativamente el comportamiento de vibración de la nanosensor, se calcula el cambio de frecuencia relativa y luego es posible determinar el valor de la masa no dimensional. Se ilustran resultados numéricos y se comparan con los obtenidos en la literatura.

En los análisis numéricos, se evalúan los efectos de los parámetros no locales, la masa y la posición de las biomoléculas en la variación de la frecuencia natural del nanosensor.

2. TEORÍA

Se considera un nanotubo (Figura 1) con longitud L, área de la sección transversal A, momento de inercia I, módulo de Young E, módulo transversal G, factor de corte κ, densidad de masa ρ, masa concentrada ubicada en γL, con $0 \leq \gamma \leq 1$.

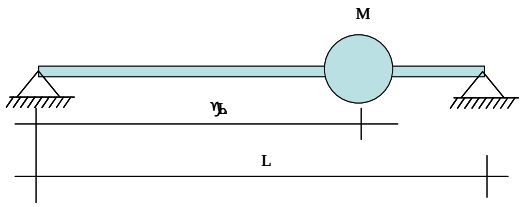


Figura 1: nanotubo simplemente apoyado con masa M ubicada en γL

Se muestra el sistema de ecuaciones de movimiento de Timoshenko, que gobierna la vibración libre de nanotubos en presencia de masas, con $0 < z < \gamma L$, en (1) y para $\gamma L < z < L$ en (2):

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$-\rho A\frac{\partial^2 v_1(z,t)}{\partial t^2}+\left((e_0a)^2\rho A\frac{\partial^4 v_1(z,t)}{\partial t^2\partial z^2}\right)+G\kappa A\left(\frac{\partial^2 v_1(z,t)}{\partial z^2}+\frac{\partial\phi_1(z,t)}{\partial z}\right)=0,$$
$$-\rho I\frac{\partial^2\phi_1(z,t)}{\partial t^2}+EI\frac{\partial^2\phi_1(z,t)}{\partial z^2}+\left((e_0a)^2\rho I\frac{\partial^4\phi_1(z,t)}{\partial t^2\partial z^2}\right)-G\kappa A\left(\frac{\partial v_1(z,t)}{\partial z}+\phi_1(z,t)\right)=0 \quad (1)$$

$$-\rho A\frac{\partial^2 v_2(z,t)}{\partial t^2}+\left((e_0a)^2\rho A\frac{\partial^4 v_2(z,t)}{\partial t^2\partial z^2}\right)+G\kappa A\left(\frac{\partial^2 v_2(z,t)}{\partial z^2}+\frac{\partial\phi_2(z,t)}{\partial z}\right)=0,$$
$$-\rho I\frac{\partial^2\phi_2(z,t)}{\partial t^2}+EI\frac{\partial^2\phi_2(z,t)}{\partial z^2}+\left((e_0a)^2\rho I\frac{\partial^4\phi_2(z,t)}{\partial t^2\partial z^2}\right)-G\kappa A\left(\frac{\partial v_2(z,t)}{\partial z}+\phi_2(z,t)\right)=0 \quad (2)$$

Junto con las siguientes condiciones de borde:

$$v_1(z,t)=0, \qquad z=0 \quad (3)$$

$$\left((e_0a)^2\rho A\frac{\partial^2 v_1(z,t)}{\partial t^2}\right)+\left((e_0a)^2\rho I\frac{\partial^3\phi_1(z,t)}{\partial t^2\partial z}\right)+\left(EI\frac{\partial\phi_1(z,t)}{\partial z}\right)=0, \qquad z=0 \quad (4)$$

$$v_1(z,t)-v_2(z,t)=0, \qquad z=\gamma L \quad (5)$$

$$\phi_1(z,t)-\phi_2(z,t)=0, \qquad z=\gamma L \quad (6)$$

$$\left(-(e_0a)^2\rho A\frac{\partial^2 v_1(z,t)}{\partial t^2}\right)-\left((e_0a)^2\rho I\frac{\partial^3\phi_1(z,t)}{\partial t^2\partial z}\right)-\left(EI\frac{\partial\phi_1(z,t)}{\partial z}\right)+$$
$$\left((e_0a)^2\rho A\frac{\partial^2 v_2(z,t)}{\partial t^2}\right)+\left((e_0a)^2\rho I\frac{\partial^3\phi_2(z,t)}{\partial t^2\partial z}\right)+\left(EI\frac{\partial\phi_2(z,t)}{\partial z}\right)=0, \quad z=\gamma L \quad (7)$$

$$\left(-(e_0a)^2\rho A\frac{\partial^2 v_1(z,t)}{\partial t^2\partial z}\right)-G\kappa A\left(\frac{\partial v_1(z,t)}{\partial z}+\phi_1(z,t)\right)-M\frac{\partial^2 v_1(z,t)}{\partial t^2}+$$
$$\left((e_0a)^2\rho A\frac{\partial^2 v_2(z,t)}{\partial t^2\partial z}\right)+G\kappa A\left(\frac{\partial v_2(z,t)}{\partial z}+\phi_2(z,t)\right)=0, \quad z=\gamma L \quad (8)$$

$$v_2(z,t)=0, \qquad z=L \quad (9)$$

$$\left(-(e_0a)^2\rho A\frac{\partial^2 v_2(z,t)}{\partial t^2}\right)-\left((e_0a)^2\rho I\frac{\partial^3\phi_2(z,t)}{\partial t^2\partial z}\right)-\left(EI\frac{\partial\phi_2(z,t)}{\partial z}\right)=0, \qquad z=L \quad (10)$$

Se efectúa una separación de variables, en el sistema de ecuaciones diferenciales (1-2), del tipo:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$v_i(z,t) = v_i(z)\cos(\omega t), \qquad \phi_i(z,t) = \phi_i(z)\cos(\omega t) \tag{11}$$

con *i* = 1,2, el sistema de ecuaciones (1-2) se convierten en:

$$\begin{aligned} &\omega^2 m_0 v_i(z) - \omega^2 (e_0 a)^2 m_0 \frac{\partial^2 v_i(z)}{\partial z^2} + G\kappa A\left(\frac{\partial^2 v_i(z)}{\partial z^2} + \frac{\partial \phi_i(z)}{\partial z}\right) = 0, \\ &\omega^2 m_2 \phi_i(z) + EI\frac{\partial^2 \phi_i(z)}{\partial z^2} - \omega^2 (e_0 a)^2 m_2 \frac{\partial^2 \phi_i(z)}{\partial z^2} - G\kappa A\left(\frac{\partial v_i(z)}{\partial z} + \phi_i(z)\right) = 0 \end{aligned} \tag{12}$$

Adimensionalizando de acuerdo a los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} &m_2 = \rho I; \quad \varsigma = \frac{z}{L}; \quad \Omega^2 = \frac{\omega^2 m_0 L^4}{EI}; \quad \eta = \frac{e_0 a}{L}; \; \alpha^2 = \frac{m_2}{m_0 L^2}; \quad \beta^2 = \frac{EI}{G\kappa A L^2}; \quad \lambda_M = \frac{M}{m_0 L}; \\ &g_1 = (1-\Omega^2\eta^2\alpha^2); \quad g_2 = (1-\Omega^2\eta^2\beta^2); \quad g_3 = (1-\Omega^2\beta^2\alpha^2). \end{aligned} \tag{13}$$

El sistema de ecuaciones (12) se convierten en:

$$g_2\frac{\partial^2 v_i(\zeta)}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial \phi_i(\zeta)}{\partial \zeta} + \Omega^2\beta^2 v_i(\zeta) = 0, \quad \beta^2 g_1\frac{\partial^2 \phi_i(\zeta)}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial v_i(\zeta)}{\partial \zeta} - g_3\phi_i(\zeta) = 0 \tag{14}$$

Para i =1 $0<\zeta<\gamma$, y para i=2 $\gamma<\zeta<1$, se asume la solución en la forma:

$$\mathbf{U}(z) = \begin{bmatrix} v_i(z) \\ \phi_i(z) \end{bmatrix} = \mathbf{A}e^{\lambda z} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} e^{\lambda z}. \tag{15}$$

Que sustituida en las ecuacione (14):

$$\mathbf{U}(z) = \begin{bmatrix} \Omega^2\beta^2 + g_2\lambda^2 & \lambda \\ -\lambda & -g_3 + \beta^2 g_1\lambda^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} e^{\lambda z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{16}$$

Resolviendo

$$\beta^2\lambda^4 g_1 g_2 + (1 + \beta^4\Omega^2 g_1 - g_2 g_3)\lambda^2 - \beta^2\Omega^2 g_3 = 0. \tag{17}$$

O bien:

$$p\lambda^4 - q\lambda^2 - r = 0. \tag{18}$$

Las raíces de las ecuación (17):

$$\lambda_{1,2} = \pm ia; \quad \lambda_{3,4} = \pm b \tag{19}$$

Con

$$a = \sqrt{\frac{1}{2p}\left(q + \sqrt{q^2 + 4pr}\right)}; \quad b = \sqrt{\frac{1}{2p}\left(-q + \sqrt{q^2 + 4pr}\right)} \tag{20}$$

Que sustituida en la ecuación (15) proporcionan:

$$\begin{aligned} \mathrm{v}_i(\zeta) &= \mathrm{A}_{i1}e^{i\alpha z} + \mathrm{A}_{i2}e^{-i\alpha z} + \mathrm{A}_{i3}e^{\beta x} + \mathrm{A}_{i4}e^{-\beta x} \\ \phi_i(\zeta) &= \mathrm{B}_{i1}e^{i\alpha z} + \mathrm{B}_{i2}e^{-i\alpha z} + \mathrm{B}_{i3}e^{\beta x} + \mathrm{B}_{i4}e^{-\beta x} \end{aligned} \tag{21}$$

La constante de integración de la rotación modal $\phi_i(\zeta)$ están relacionadas con las constantes de integración de $\mathrm{v_i}(\zeta)$, por lo que, de la primera fila de la ecuación (15) se tiene

$$\mathrm{B} = \frac{-\Omega^2\beta^2 - g_2\lambda^2}{\lambda}\mathrm{A} = -\left(g_2\lambda + \frac{\Omega^2\beta^2}{\lambda}\right)\mathrm{A} \tag{22}$$

Sustituyendo las raíces (22) en la ecuación (21), una a la vez, la solución general toma la forma:

$$\begin{aligned} \mathrm{v}_i(\zeta) &= \mathrm{A}_{i1}\cos(a\zeta) + \mathrm{A}_{i2}\sin(a\zeta) + \mathrm{A}_{i3}\cosh(b\zeta) + \mathrm{A}_{i4}\sinh(b\zeta) \\ \phi_i(\zeta) &= \mathrm{B}_{i1}g_\alpha\sin(a\zeta) - \mathrm{B}_{i2}g_\alpha\cos(a\zeta) + \mathrm{B}_{i3}g_\beta\sinh(b\zeta) + \mathrm{B}_{i4}g_\beta\cosh(b\zeta) \end{aligned} \tag{23}$$

que tiene lugar:

$$g_\alpha = \left(g_2 a - \frac{\Omega^2\beta^2}{a}\right), \quad g_\beta = \left(\frac{-\Omega^2\beta^2 - g_2 b^2}{b}\right). \tag{24}$$

Para el nanotubo doblemente apoyado con masa intermedia las condiciones de contorno (3-10), adimensionalizado de acuerdo con las ecuaciones (13), se convierten en:

$$\mathrm{v}_1(\zeta) = 0, \quad g_1\frac{\partial\phi_1(\zeta)}{\partial\zeta} - \Omega^2\eta^2\mathrm{v}_1(\zeta) = 0, \qquad \zeta = 0 \tag{25}$$

$$\mathrm{v}_1(\zeta) - \mathrm{v}_2(\zeta) = 0, \quad \phi_1(\zeta) - \phi_2(\zeta) = 0, \qquad \zeta = \gamma \tag{26}$$

$$-g_1\frac{\partial\phi_1(\zeta)}{\partial\zeta} + \Omega^2\eta^2\mathrm{v}_1(\zeta) + g_1\frac{\partial\phi_2(\zeta)}{\partial\zeta} - \Omega^2\eta^2\mathrm{v}_2(\zeta) = 0, \ \zeta = \gamma \tag{27}$$

$$-g_2\frac{\partial\mathrm{v}_1(\zeta)}{\partial\zeta} - \phi_1\Omega^2\beta^2\lambda_M\mathrm{v}_1(\zeta) + g_2\frac{\partial\mathrm{v}_2(\zeta)}{\partial\zeta} + \phi_2(\zeta) = 0, \ \zeta = \gamma \tag{28}$$

$$\mathrm{v}_2(\zeta) = 0, \quad -g_1\frac{\partial\phi_2(\zeta)}{\partial\zeta} + \Omega^2\eta^2\mathrm{v}_2(\zeta) = 0, \qquad \zeta = 1 \tag{29}$$

Para la búsqueda de la frecuencia libre de vibración, Ω_i (i=1,...∞), se imponen las ocho condiciones de contorno (25 – 29), obteniendo un sistema de ocho ecuaciones homogéneas, en el cual la solución trivial se logra solamente si el determinante de la matriz de coeficientes es distinto de cero. Es posible así obtener los infinitos valores propios Ω_i asociados con los correspondientes vectores propios.

2.1. Cambios relativos en la frecuencia

ISBN: 978-987-1676-63-7

Una vez que se han obtenido las frecuencias adimensionales, en particular con el primer valor de frecuencia Ω_1, es posible encontrar la primera frecuencia natural:

$$f_{n1} = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{\Omega_1^2}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{m_0 L^4}} \tag{30}$$

El objetivo es obtener el valor de la masa adicional, el cambio relativo de frecuencia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f_{n1}}{f_0} \tag{31}$$

Donde f_0 es la frecuencia natural del nanotubo sin masa añadida y despreciando el efecto no local. Conocida la frecuencia natural en ausencia de la masa y el efecto no local, y la frecuencia natural en presencia de la masa y el efecto no local, es posible obtener el cambio relativo de frecuencia y las curvas teóricas (λ_M, $\Delta f / f_0$), la masa adimensional λ_M se determina para obtener M.

3. EJEMPLOS NUMÉRICOS

En esta sección se analizan los efectos del parámetro no local, la ubicación de la micromasa, las diversas relaciones entre la longitud y el diámetro en las frecuencias naturales de un SWCNT simplemente apoyado. La resolución del sistema de ecuaciones diferenciales se determina de una manera exacta. Los parámetros básicos que se utilizan en los cálculos para el sistema se dan en la Tabla 1, basados en [11]. Mientras que el valor de la luz se calcula en base a la relación adimensional L /d.

Tabla 1. Parámetros básicos del nanotubo [11].

Propiedades SWCNT	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad	ρ	2240	kg/m^3
Diámetro	d	1.1×10^{-9}	m
Espesor	t	0.342×10^{-9}	m
Área transversal	A	1.18187×10^{-18}	m^2
Momento de inercia	I	1.96037×10^{-37}	m^4
Módulo de Young	E	1	TPa
Coeficiente Poisson	ν	0.28	-
Módulo de corte	G	E/2(1+ ν)	TPa
Factor de corte	κ	5(1+ ν)/(6+5 ν)	-

ISBN: 978-987-1676-63-7

3.1. Comparación numérica

A los fines de evaluar la precisión del método se realiza una comparación numérica de las frecuencias de vibración libres de una viga Timoshenko, utilizando la fórmula exacta para un nanotubo doblemente apoyado como propone Leissa [13], incluyendo el efecto no local, con los datos de la Tabla 1.

Se parte de la hipótesis de que, por un nanotubo doblemente apoyado se puede suponer el desplazamiento y rotación igual a:

$$\mathrm{v}(\mathrm{z},\mathrm{t}) = C\sin\left(\frac{n\pi}{L}z\right)\sin(\omega\mathrm{t}), \quad \phi(\mathrm{z},\mathrm{t}) = D\cos\left(\frac{n\pi}{L}z\right)\sin(\omega\mathrm{t})\cos(\omega\mathrm{t}) \tag{32}$$

con n = 1, 2, ..., y C, D, constantes arbitrarias. Las relaciones (32) satisfacen las condiciones de contorno en z = 0 y z = L. Adimensionalizando se llega a la siguiente solución:

$$\Omega = \sqrt{\frac{\left(1+n^2\pi^2\left(\alpha^2+\beta^2\right) - \sqrt{1+n^4\pi^4\left(\alpha^2-\beta^2\right)+2n^2\pi^2\left(\alpha^2+\beta^2\right)}\right)}{2\alpha^2\beta^2\left(1+n^2\pi^2\eta^2\right)}}. \tag{33}$$

Una primera comparación numérica se realiza entre este método exacto y la fórmula (33) sin la masa añadida. Como se puede observar en la Tabla 2, los resultados que se derivan en ambos casos son coincidentes.

Tabla 2. Comparaciones numéricas. Cálculo de las tres primeras frecuencias libres adimensional una viga de Timoshenko doblemente apoyada, para distintos η y L/d =10.

η	Ω_1 (33)	Ω_1 (exacta)	Ω_2 (33)	Ω_2 (exacta)	Ω_3 (33)	Ω_3 (exacta)
0	9.6337	9.6337	36.1321	36.1321	74.4517	74.4517
0.05	9.5170	9.5170	34.4710	34.4710	67.3484	67.3484
0.1	9.1908	9.1908	30.5942	30.5942	54.1806	54.1806
0.15	8.7145	8.7145	26.2943	26.2943	42.9948	42.9948
0.2	8.1571	8.1571	22.4986	22.4986	34.8918	34.8918
0.25	7.5763	7.5763	19.4040	19.4040	29.0870	29.0870
0.3	7.0107	7.0107	16.9333	16.9333	24.8250	24.8250

3.1.1 Efecto de la masa añadida en el cambio de la frecuencia

Se considera, ahora la Tabla 3 con los datos geométricos y físicos de la Tabla 1. Se fija el valor adimensionalizado de la masa λ_M=1, colocando la masa en el medio de los nanotubos, γ = 0.5 y se calcula el cambio relativo de la frecuencia $\Delta f / f_0$ al variar el coeficiente adimensionalizado no local

η en el rango entre η=0, para el caso de nanotubos en ausencia de efectos no locales, y η=0.5 para tres valores de la relación L/d.

Tabla 3. Cálculo del cambio relativo de la frecuencia ($\Delta f / f_0$) para λ_M=1 y estableciendo γ = 0.5.

η	L/d=5	L/d=10	L/d=20
0	0.4207	0.4232	0.4242
0.1	0.4299	0.4324	0.4333
0.2	0.4552	0.4575	0.4583
0.3	0.4908	0.4928	0.5533
0.4	0.5308	0.5325	0.5331
0.5	0.5706	0.5721	0.5726

Se observa el aumento en el cambio relativo de la frecuencia ($\Delta f / f_0$) al aumentar el valor del efecto no local η.

3.1.2 Influencia del efecto no local sobre el cambio relativo de la frecuencia

En general, se observa que para los nanotubos de carbono, el parámetro no local (e_0 a) se encuentra en un intervalo 0.0 nm ≤ e_0 a ≤ 2.0 nm. En nuestro caso, se corresponde con un intervalo del factor adimensional del efecto no local de $0 \leq \eta \leq 0.234742$ para una luz L=8.52 nm. Sin embargo, es posible tomar valores más altos que η = 0.5, para las tres curvas ilustradas en la Figura 2 con η = 0; 0.3; 0.5 correspondientes a valores de λ_M comprendidos entre 0 y 1. Los dos casos extremos son λ_M=0, en ausencia de masa y λ_M=1 cuando la masa añadida es igual a la del nanotubo.

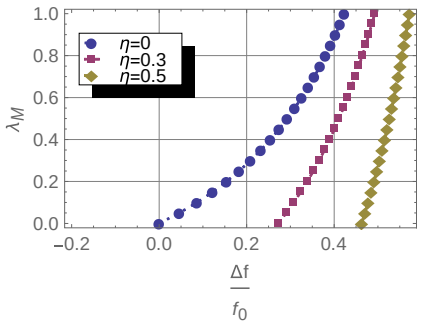


Figura 2: Cambio relativo de la frecuencia para distintos valores de la masa unida, usando la fórmula aproximada, con η = 0; 0.3; 0.5.

De la Figura 2 se observa que al introducir el efecto no local, el cambio relativa de frecuencia aumenta al igual que λ_M y por lo tanto las curvas están colocadas a la derecha de la que se obtiene

ISBN: 978-987-1676-63-7

mediante la colocación de $\eta = 0$. Este comportamiento está en línea con lo que sucede con el nanotubo que sigue la teoría de la de Euler-Bernoulli.Esto significa que para el mismo valor de la masa adimensionalizada, el cambio relativo de frecuencia se reduce con la disminución de efecto no local η.

Cuando la masa adimensionalizada se hace muy grande, el cambio relativo en las frecuencias tienden a coincidir y el efecto no local pierde su importancia.

3.1.3 Influencia de la posición de la masa en el cambio relativo de la frecuencia

La posición de la masa concentrada puede influir en el cambio relativo de la frecuencia al variar el efecto del factor adimensional no local. En la Figura 3 se muestra el cambio relativo de las frecuencias para valores del coeficiente adimensional del efecto no local entre 0 y 0.5. Las cuatro curvas se obtuvieron para posiciones de la masa $\gamma = 0.15$; 0.25; 0.35 y 0.5, naturalmente por simetría será el mismo con $\gamma = 0.65$; 0.75 y 0.85.

A partir de λ_M=1, cuando la masa concentrada está más cerca del apoyo, menor es el cambio relativo de frecuencia y aumenta a medida que la masa se desplaza hacia el centro del nanotubo. Además, al aumentar η, las cuatro curvas crecen y se acercan. Esto significa que cuando el efecto no local se incrementa, la posición de la masa se convierte en un parámetro insignificante.

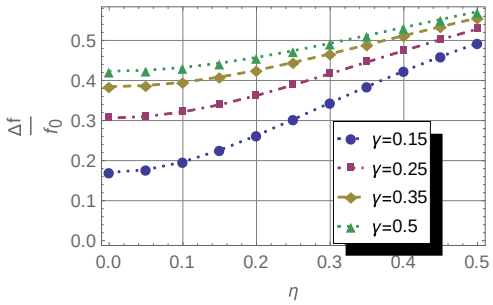


Figura 3: Cambio relativo de la frecuencia para distintos valores η y γ

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado los nanosensores. El concepto básico consiste en considerar al nanotubo como un nanosensor del cual se conoce la frecuencia de vibración libre, en ausencia de masa y de efecto no local, luego medir las frecuencias de la vibración en presencia de efectos no locales y la masa concentrada. La definición del cambio relativo de frecuencia conduce al conocimiento del valor de la masa depositada.

El patrón de diseño es un nanotubo doblemente apoyado en sus extremos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Se observaron los siguientes resultados: a) El cambio relativo de frecuencia ($\Delta f / f_0$) aumenta al aumentar el efecto no local (η) y la relación adimensional de la masa (λ_M), b) Cuando aumenta la relación adimensional de la masa, los cambios relativos de la frecuencia tienden a coincidir y comienza a perder importancia el efecto no local. c) A partir de un valor de λ_M, cuando aumenta la relación L/d, el cambio relativo de la frecuencia aumenta, cuando aumenta el efecto no local η.

Los autores proponen poner en práctica el método para otros casos de vinculación a tierra de los nanosensores.

5. REFERENCIAS

[1] Iijima S. *Helical microtubules of graphitic carbon*. Nature (London) 1991; 354: 56-8.

[2] A. C. Eringen, *On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and surface waves*, Journal of Applied Physics, vol. 54, no. 9, pp. 4703–4710, 1983.

[3] A. C. Eringen, *Nonlocal Continuum Field Theories,* Springer, New York, NY, USA, 2002.

[4] J.N. Reddy, *Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams*, International Journal of Engineering Science 45 (2007) 288-307.

[5] S.A.M. Ghannadpour, B. Mohammadi, J. Fazilati, *Bending, buckling and vibration problems of nonlocal Euler beams using Ritz method*, Composite Structures 96 (2013) 584-589.

[6] S.C. Pradhan, J.K. Phadicar, *Bending, buckling and vibration analyses of nonhomogeneous nanotubes using GDQ and nonlocal elasticity theory*, Struct. Eng. and Mech. an Int. Journal 33 (2) (2009) 193-213.

[7] J.N. Reddy, S.D. Pang, *Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes*, Journal of Appl. Physics 103 (2008) 023511-26.

[8] A.Y. Joshi, S.C. Sharma, S.P. Harsha, *Vibration analysis of pre-stressed single walled CNT based mass sensor*. International Journal of Electrospun Nanofibers and Applications 2(3), 161-170

[9] R. Chowdhury, S. Adhikari, J. Mitchell. *Vibrating carbon nanotube based bio-sensors*. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures 42 (2), 104-109.

[10] Murmu T. and Adhikari S., *Nonlocal frequency analysis of nanoscale biosensors*. Sensor and Actuators A, 173, 41-48, 2012.

[11] Zhi-Bin Shen, Xian-Fang Li, Li-Ping Sheng, Guo-Jin Tang., *Transverse vibration of nanotube-based micro-mass sensor via non local Timoshenko beam theory*. Comp. Mat. Sci., 53, 340-346, 2012.

[12] Zhi-Bin Shen, Li-Ping Sheng, Xian-Fang Li, Guo-Jin Tang., *Non local Timoshenko beam theory for vibration of carbon nanotube-based biosensor*. Physica E, 44 , 1169-1175, 2012.

[13] A. W. Leissa, M.S. Qatu, *Vibrations of continuous systems*, McGraw-Hill Companies, 1976.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

TEORÍA DE SEGUNDO ORDEN EN ENTRAMADOS UTILIZANDO SERIES DE POTENCIAS

Héctor D. Martín[1], Carlos P. Filipich[2], Mario J. Maurizi[3] y Maria. A. De Rosa[4]

[1] GRUDIM - Facultad Regional Reconquista UTN. Parque Industrial Reconquista, (3560) Reconquista, Santa Fe, Argentina. correo-e: hmartin@frrq.utn.edu.ar.
[2]Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253, B8000CPB Bahía Blanca, Argentina. Centro de Investigación de Mecánica Teórica y Aplicada, Facultad Regional Bahía Blanca UTN, 11 de abril 461, B8000LMI Bahía Blanca. correo-e: cfilipich@gmail.com
[3]Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Avda. Alem 1253, B8000CPB Bahía Blanca, Argentina.
[4]School of Engineering, Viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza, Italy.
correo-e: derosa@scienzadellecostruzioni.co.uk.

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el problema de segundo orden de entramados planos utilizando desarrollos de series de potencias enteras para la resolución de las ecuaciones diferenciales gobernantes.

Se parte de plantear las ecuaciones diferenciales en los desplazamientos axial y transversal, que rigen el equilibrio de cada elemento recto junto con las condiciones de vinculación a tierra y de continuidad en cada nodo (3 de tipo geométrico y 3 de equilibrio local), donde los efectos flexo-axiales se acoplan.

En lugar de trabajar con ecuaciones diferenciales no lineales, se efectúa un proceso iterativo, donde en cada paso se mantienen constantes los esfuerzos axiales que produce la linealización del proceso. Tras pocas iteraciones los esfuerzos normales en pasos sucesivos no se modifican (el error aceptado se fija) y la solución se completa.

Con un estado de cargas, se realiza la iteración hasta que se estabilizan los esfuerzos normales en las barras, en ese momento es posible concluir que, para ese estado, se ha encontrado la solución elástica utilizando la teoría de segundo orden con series de potencias.

Para acercarse a un estado más próximo al que provoca la inestabilidad del equilibrio o estado crítico, es necesario comenzar a incrementar el valor de todas las cargas externas al entramado multiplicándolas por algún factor mayor a uno.

Se presenta una solución en serie de potencias por medio de un algoritmo sistemático de recurrencia. Esto permite analizar el comportamiento estructural de entramados planos, arribando a una solución elástica teniendo en cuenta la teoría de segundo orden. La cantidad de incógnitas que resuelve el conjunto estructural es siempre muy pequeña cualquiera sea el número de barras.

Se muestran ejemplos comparando los tiempos computacionales con métodos tradicionales.

Palabras Claves: *Teoría 2do Orden, Entramados Cerrados, Series de Potencias.*

1. INTRODUCCIÓN

Cuando una estructura es analizada con teoría de segundo orden, significa que se plantea el equilibrio en su posición deformada. El problema es **no lineal**. Las restantes hipótesis del análisis lineal se mantienen: linealidad mecánica y cinemática.

Se aborda el problema de segundo orden de entramados planos, atendiendo que dentro de la ingeniería estructural puede resultar de significativa importancia en las cubiertas aporticadas planas. En la construcción metálica, especialmente para el dimensionado final, es determinante conocer la seguridad frente a la inestabilidad del sistema en estudio, potencialidad que con esta teoría puede aproximarse [1, 2, 3 y 4].

Se recuerda que, y con el propósito de aclarar el desarrollo, la teoría de segundo orden constituye la búsqueda de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones. En tanto el estudio de la inestabilidad del equilibrio propiamente dicho consiste en un problema clásico de autovalores. Por lo tanto, la teoría de segundo orden debe considerarse como un estudio indirecto de la inestabilidad estructural. En efecto, cuando el estado de cargas, al menos teóricamente, se aproxima por debajo, al crítico, la presente teoría dará lugar a deformaciones más allá de las admisibles. Como es sabido, la pieza se pandea o se comba mucho antes del estado crítico. Los ejemplos confirmarán lo expuesto.

En la resolución se parte de plantear las ecuaciones diferenciales en los desplazamientos axial y transversal, que rigen el equilibrio de cada elemento recto junto con las condiciones de vinculación a tierra y de continuidad en cada nodo (3 de tipo geométrico y 3 de equilibrio local), donde los efectos flexo-axiales se acoplan.

Vale añadir una aclaración adicional. En lugar de trabajar con ecuaciones diferenciales no lineales, ya que el esfuerzo axial de cada barra depende de la derivada del desplazamiento axial y que multiplica a la derivada segunda del desplazamiento transversal, se efectúa un proceso iterativo, donde en cada paso se mantienen constantes los esfuerzos axiales que produce la linealización del proceso. Tras pocas iteraciones los esfuerzos normales en pasos sucesivos no se modifican (el error aceptado se fija) y la solución se completa.

Cabe consignar una advertencia en la práctica profesional donde es frecuente subvalorar la siguiente cuestión: por lo antedicho la consideración de los esfuerzos axiales dentro de la ecuación diferencial del desplazamiento flexional pueden dar lugar a que se tengan desplazamientos estructurales significativos que una teoría de primer orden no detectaría.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. PLANTEO DEL PROBLEMA

El pórtico en estudio, como lo muestra la Figura 1, se encuentra en un sistema de coordenadas de referencia X-Y. Con la siguiente nomenclatura:

nb es la cantidad total de barras.

nn es el número total de nodos.

j es el subíndice que denota la barra, $j = 1, 2, \ldots, nb$.

n es el subíndice que denota el nodo, $n = 1, 2, \ldots, nn$.

Las características de cada barra son las siguientes:

E_j, ρ_j , F_j, a_j , J_j : Módulo de Young, densidad, área, longitud y momento de Inercia respectivamente de la barra *j*.

α_j Ángulo entre la barra *j* y el eje de abscisas.

$\alpha_{j,k}$ Ángulo entre la barra *j* y la barra *k*.

X-Y Sistema de coordenadas globales.

x_j Coordenada local de la barra *j*.

También son datos en el problema a tratar los valores de los esfuerzos en los nodos y en las barras. En los lugares donde existen esfuerzos concentrados es necesario crear un nodo, estos esfuerzos son, para el nodo *i*: H_i (horizontal), V_i (vertical) y μ_i (momento aplicado), considerándolos positivos cuando el sentido es el indicado en la Figura 1.

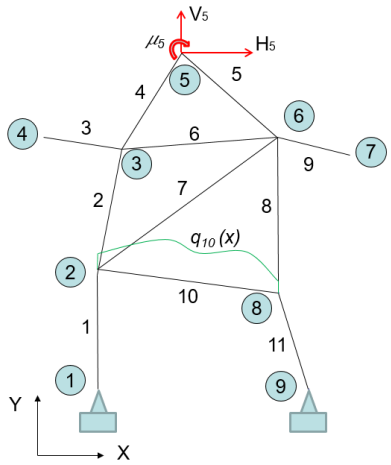


Figura 1: Esquema general de un entramado con cargas concentradas en el nodo 5, transversales distribuidas en la barra 10.

En lo que respecta a las cargas distribuidas transversales q_j (x) que se encuentran en la barra *j*, las mismas deben estar expresadas en su desarrollo con series de potencias, como se indica en la expresión (1):

$$q_j\left(x_j\right) = \sum_{i=0}^{mq} q_{j,i}\, x_j^i \qquad (1)$$

Siendo *mq* el máximo grado en el desarrollo en series de potencias de las cargas. Los valores de los coeficientes $q_{j,i}$ son datos para cada barra *j* que posea cargas distribuidas. Si la carga es una función trascendental, es posible hacer previamente el desarrollo en series de Taylor o Mc Laurin de la expresión y expresarla como series de potencias. En el caso de existir cargas parciales en un tramo de una barra, es necesario colocar un nuevo nodo de modo de dividirla en barras para cada una de las cargas parciales, de forma que cada tramo tenga carga distribuida en toda su extensión. De la misma manera que si hay esfuerzos concentrados en el medio de un tramo se debe crear un nodo en donde se ubica el esfuerzo.

3. ECUACIONES GOBERNANTES DEL PROBLEMA

Para dar generalidad al problema, se consideran todas las energías que intervienen en un entramado sometido al estudio. Entre ellas, la energía U de deformación, considerando los aportes flexional y axial para cada barra *j*:

$$U = \frac{1}{2}\left(\sum_{j=1}^{nb} \left[\int_0^{a_j} \frac{M^2\left(x_j\right)}{E_j J_j} dx_j + \int_0^{a_j} \frac{N^2\left(x_j\right)}{E_j F_j} dx_j \right] \right) \tag{2}$$

Admitimos para este desarrollo que la carga axial distribuida es nula. Eventualmente, para considerarlas, será necesario subdividir el tramo y colocar cagas nodales equivalentes.

La energía G aportada por el efecto de segundo orden, correspondiente a las cargas axiales $\boldsymbol{N}_j$ en las barras, considerado positivo de compresión:

$$G = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{nb} \boldsymbol{N}_j \int_0^{a_j} \left(v_j'\left(x_j\right)\right)^2 dx_j \tag{3}$$

A continuación la energía S debido a los esfuerzos aplicados en los nodos *i*. En esta expresión, el subíndice *j* se refiere a la barra sobre la cual se proyecta el esfuerzo, siendo α el ángulo entre la barra y el sistema global de coordenadas, C y S los correspondientes valores de coseno y seno.

$$S = \sum_{i=1}^{nn} \left\{ H_i \left[C_\alpha\, u_j\left(x_j\right) + S_\alpha\, v_j\left(x_j\right) \right] + V_i \left[S_\alpha\, u_j\left(x_j\right) - C_\alpha\, v_j\left(x_j\right) \right] + \mu_i\, v_j'\left(x_j\right) \right\} \tag{4}$$

La energía T debida a las cargas repartidas a lo largo de cada una de las barras *j*, $q_j(x)$:

$$T = \sum_{j=1}^{nb} \left(\int_0^{a_j} q_j\left(x_j\right) v_j\left(x_j\right) dx_j \right) \tag{5}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

La energía total W del conjunto estructural, es debida a los aportes de todas las energías anteriores

$$W = U - G - S - T \tag{6}$$

Debiéndose cumplir que

$$\delta\left(U - G - S - T\right) = 0 \tag{7}$$

Reemplazando (1-5) en (6), aplicando (7) y reacomodando convenientemente se llega a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema

$$E_j J_j \, v_j'''' \left(x_j\right) + \boldsymbol{N}_j \, v_j'' \left(x_j\right) = q_j \left(x_j\right) \tag{8}$$

$$E_j F_j \, u_j'' \left(x_j\right) = 0 \tag{9}$$

Las que, en coordenadas normalizadas, resultan ser:

$$v_j'''' \left(\xi_j\right) - \frac{q_j \left(\xi_j\right)}{J_{4,j}} + \frac{\boldsymbol{N}_j \, v_j'' \left(\xi_j\right)}{a_j^2 \, J_{4,j}} = 0 \tag{10}$$

$$u_j'' \left(\xi_j\right) = 0 \tag{11}$$

En las cuales:

$$\xi_j = \frac{x_j}{a_j} \quad , \quad J_{4,j} = \frac{E_j J_j}{a_j^4} \quad , \quad F_{2,j} = \frac{E_j F_j}{a_j^2} \tag{12a, b, c}$$

Se propone, para la solución de las ecuaciones diferenciales, un desarrollo en series de potencias para las funciones desconocidas de los desplazamientos transversales y axiales de cada barra, con las siguientes expresiones:

$$v_j \left(\xi_j\right) = \sum_{i=0}^{m} A_{j,i} \, \xi_j^i \; , \quad u_j \left(\xi_j\right) = \sum_{i=0}^{m} B_{j,i} \, \xi_j^i \tag{13a, b}$$

Las ecuaciones (10 -11) se transforman en:

$$\sum_{i=0}^{m-4} \varphi_{4,i} \; A_{j,i+4} \, \xi_j^i - \frac{1}{J_{4,j}} \sum_{i=0}^{m} q_{j,i} \, \xi_j^i + \frac{\boldsymbol{N}_j}{a_j^2 \, J_{4,j}} \sum_{i=0}^{m-2} \varphi_{2,i} \; A_{j,i+2} \, \xi_j^i = 0 \tag{14}$$

$$\sum_{i=0}^{m-2} \varphi_{2,i} \; B_{j,i+2} \, \xi_j^i = 0 \tag{15}$$

Las expresiones para la recurrencia se obtienen igualando los coeficientes de igual potencia:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$A_{j,i+4} = \frac{q_{j,i} - \frac{N_j}{a_j^2}\varphi_{2,i}\ A_{j,i+2}}{J_{4,j}\varphi_{4,i}} \quad , \qquad B_{j,i+2} = 0 \qquad \text{(16a, b)}$$

Es necesario plantear las condiciones y ecuaciones de compatibilidad geométricas en cada nodo. También las condiciones y ecuaciones de equilibrio, o sea dos sumatorias de esfuerzos y una de momentos. Además se consideran los vínculos a tierra, los que dan las condiciones de borde.
Se elabora un programa utilizando el Software Mathematica [5].

4. PROGRAMA

Para un estado de carga definido, se trata de un problema no lineal, llevado a una iteración de un problema lineal controlando los esfuerzos axiales.
El programa de cálculo resuelve primero la estática, luego ingresa a una subrutina que almacena los valores de los esfuerzos normales obtenidos al calcular el entramado. Se inicia el proceso con valores arbitrarios de los esfuerzos axiales en las barras, esto es lo que se utiliza como “semilla” del estado de carga fijado.
En cada iteración, se toman los esfuerzos normales de todas las barras hallados en la pasada anterior. Esos esfuerzos normales son los $\boldsymbol{N}_j$ con los que se vuelve a correr el programa, teniendo en cuenta las expresiones halladas para la recurrencia en (16 a y b). También intervienen en las expresiones de las condiciones y ecuaciones de equilibrio en los nodos y en los vínculos a tierra, las condiciones de borde.
Con un estado de cargas, se realiza la iteración hasta que se estabilizan los esfuerzos normales en las barras, en ese momento es posible concluir que se ha encontrado la solución elástica utilizando la teoría de segundo orden con series de potencias para ese estado de cargas.
Si el propósito es acercarse a un estado más próximo al que provoca la inestabilidad del equilibrio o estado crítico, es necesario comenzar a incrementar el valor de todas las cargas externas al entramado multiplicándolas por algún factor previamente ingresado (fac) mayor a uno (fac > 1). Con fines de controlar lo que sucede con las elásticas, es necesario almacenar en un vector, el valor del desplazamiento en algún punto del entramado (denominado punto D), para cada cambio en los valores de las cargas.
Se continúa con este proceso, chequeando el aumento en el valor del desplazamiento en ese punto D del entramado. En el momento en que estos valores chequeados comienzan a aumentar superando ciertos valores pre acordado, es señal que el proceso se está por terminar, ya que muy próximo se encuentran los valores críticos. Es posible continuar el acercamiento a este estado de

ISBN: 978-987-1676-63-7

inestabilidad, disminuyendo el factor que incrementa las cargas, y continuar con el proceso iterativo.

El proceso indicado puede o no ser convergente, en función de las características geométricas y mecánicas del pórtico, como así también de la magnitud del estado inicial de cargas escogidas o de los valores de incremento de carga elegidos. Cuando se superan las cargas críticas, el proceso es divergente.

5. EJEMPLO

El entramado a resolver se muestra en la Figura 2 y consta de 10 barras, 9 nodos, empotrado en los nodos 1, 7 y 8. En el esquema se observan 2 cargas puntuales, P_3 y P_4 (en N) ubicadas en los nodos 3 y 4. Además hay 4 cargas uniformemente repartidas q_2, q_3, q_4 y q_{10} (en N/m) situadas en las barras 2, 3, 4 y 10 respectivamente. Las coordenadas de los nodos se indican en un sistema global, con unidades en m. Las barras poseen las siguientes características: Momento de Inercia, I = 0,0036 m^4 y Módulo de Young E = 2.1 x 10^{11} N/m^2.

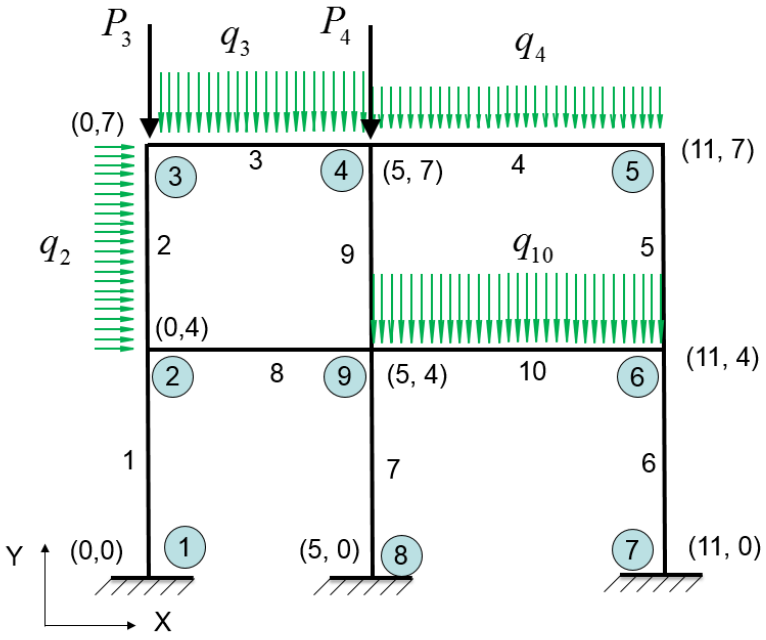


Figura 2 – Entramado de 10 barras con cargas puntuales y repartidas.

Se resuelven dos estados de cargas (caso 1 y caso 2), en cada uno de ellos, incrementando todas las cargas con un factor *f*, que toma valores 1 y 100. Se busca la solución elástica utilizando la teoría de segundo orden con series de potencias, utilizando el programa Mathematica [5], comparando los resultados con el método de los elementos finitos [6]. Algunos de los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 1 y 2. Se ha tabulado para el nodo 3, los desplazamientos

horizontal v_3 y vertical u_3, el giro θ_3 y el momento M_3. Se han utilizado 20 elementos por barra en elementos finitos, lo que hace un total de 600 incógnitas. Utilizando series de potencia, son solamente 15 incógnitas. Se ha agregado también la información referida al tiempo de cálculo computacional, observándose una diferencia muy grande entre los dos métodos, sobre todo cuando se está con cargas que provocan grandes deformaciones.

5.1. Caso 1

En este caso se consideran los siguientes valores: $P_3 = 2 \times 10^5$, $P_4 = 0$, $q_2 = 0$, $q_3 = 0$, $q_4 = 3 \times 10^4$ y $q_{10} = 0$. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 – Resultados obtenidos para el Caso 1 de cargas.

		Series (15 incógnitas)	**Mef [6] (600 ncógnitas)**
f =1	tiempo (seg)	8	32
	v_3 (m)	3.04836×10^{-5}	3.0×10^{-5}
	u_3 (m)	5.37974×10^{-5}	5.4×10^{-5}
	θ_3 (°)	1.15911×10^{-3}	1.157×10^{-3}
	M_3 (Nm)	7846.35	7835.08
f =10^2	tiempo (seg)	9	74
	v_3 (m)	3.03847×10^{-3}	2.84×10^{-3}
	u_3 (m)	5.37985×10^{-3}	5.3784×10^{-3}
	θ_3 (°)	0.117484	0.115702
	M_3 (Nm)	776643	794408.6875

Se observa que en general los valores son del mismo orden, teniendo en cuenta que los procesos son totalmente distintos para arribar a los mismos.

5.2. Caso 2

En esta ocasión se consideran para las cargas aplicadas los siguientes valores: $P_3 = 0$, $P_4 = 5 \times 10^5$, $q_2 = 2 \times 10^3$, $q_3 = 4 \times 10^4$, $q_4 = 0$ y $q_{10} = 5 \times 10^4$. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 2 – Resultados obtenidos para el Caso 2 de cargas.

		Series (15 incógnitas)	**Mef [6] (600 incógnitas)**
f =1	tiempo (seg)	9	22
	v_3 (m)	3.79216×10^{-5}	3.1×10^{-5}
	u_3 (m)	2.88023×10^{-5}	2.9×10^{-5}
	θ_3 (°)	5.45881×10^{-3}	5.531×10^{-3}
	M_3 (Nm)	72695.8	73705.8515
f =10^2	tiempo (seg)	9	144
	v_3 (m)	3.01578×10^{-3}	3.418×10^{-3}
	u_3 (m)	2.84313×10^{-3}	2.902×10^{-3}
	θ_3 (°)	0.568215	0.561578
	M_3 (Nm)	7.07154×10^{6}	7.401907×10^{6}

En la Figura 3 se muestra el diagrama de momentos que se obtiene con un valor de f =100 en el caso 2.

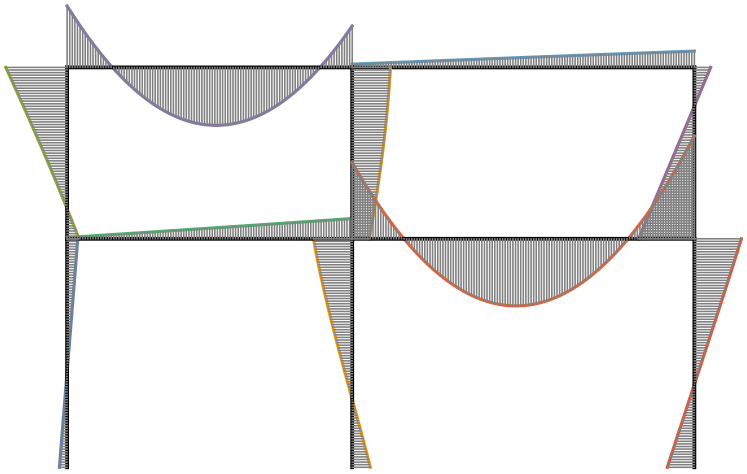


Figura 3 – Diagrama de momentos para el Caso 2 con f =100 [5].

6. CONCLUSIONES

Si bien es cierto que hoy en día existen potentes programas de elementos finitos, que permiten abordar el tema con seguridad y eficiencia, también es verdad que la manipulación de tales programas, requiere de un avezado conocimiento en el uso de los mismos. Por otro lado, el costo de dichos programas resulta demasiado oneroso para gran parte de los profesionales.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Una característica a destacar de la solución por series del problema de segundo orden en pórticos planos, es el número de incógnitas. Cualquiera sea el número de barras, es siempre muy pequeña la cantidad de incógnitas que resuelve el conjunto estructural. Como contrapartida, otros métodos, tal como el conocido de los elementos finitos, deben plantear forzosamente tres incógnitas por cada nodo. Por lo general, es necesaria la subdivisión de cada barra en pequeños elementos para garantizar un mejor resultado, obligando a la proliferación de nodos, y por ende, aumentando la cantidad de incógnitas del problema a resolver. Eso trae aparejado un mayor tiempo computacional que queda de manifiesto en el último ejemplo en donde se ha indicado la demora en llegar a la solución con cada método.

Para finalizar, algo que se ve claramente reflejado en el último ejemplo, el tiempo computacional es siempre muy bajo utilizando series de potencias. Se ha resuelto cada situación en ambos programas utilizando la misma computadora y en las mismas condiciones. A medida que el estado de cargas se va incrementando, se aumentan también las grandes deformaciones y aumenta enormemente el tiempo computacional al utilizar elementos finitos, no ocurriendo lo mismo si se utilizan series de potencias. Esto concluye en otra de las grandes ventajas del método propuesto en el presente trabajo.

7. REFERENCIAS

[1] Filipich, C. P., *Inestabilidad del Equilibrio*. Libro del Curso 813. Secretaría Argentina para el Centro Internacional de Ciencias Mecánicas. Argentina -1981.

[2] Filipich, C.P., *Inestabilidad del Equilibrio – Pandeo*. Curso de Postgrado dictado en el año 1984. Dpto. de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur.

[3] Hildebrand F.B. *Methods of Applied Mathematics*. Prentice Hall of India. Private Ltd. N. Delhi. (1968).

[4] Bazant, Z. P. y Cedolin, L. *Stability of structures*. Oxford University Press. (1991).

[5] Wolfram Mathematica © 1988-2014, Wolfram Research inc. Version n° 10.

[6] Algor FEMPRO, Copyright © 2009. Versión 23.1.

[7] Martín, H. D. *Resolución estática de entramados estructurales aplicando Series de Potencias*. III Jornadas de intercambio y difusión de los resultados de investigación de los doctorandos en ingeniería de la UTN. Programa: Estructuras civiles. Facultad Regional Mendoza de la UTN. Noviembre de 2014.

[8] Logan, D. L. *A first course in the Finite Element Method using Algor*. Thomson Learning,2001.

[9] Martín H. y Filipich, C. *Estudio Dinámico de Entramados Planos utilizando Series de Potencias* Primeras Jornadas del Programa ESTRUCTURAS Y CONSTURUCCIONES CIVILES. Facultad

Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional, 19 de octubre de 2012. ISBN: 978-987-1896-07-3.

[10] Martín H., Filipich, C.,De Rosa M. A. y Maurizi M. J. *Vibraciones naturales de entramados arbitrarios por medio de series de potencias.* IV CAIM 2014 – CUARTO CONGRESO ARGENTINO de INGENIERÍA MECÁNICA. Resistencia, Chaco, del 2 al 5 de setiembre de 2014. ISBN 978-987-45571-0-0. Edit. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste.

[11] Martín H., Filipich, C. y Maurizi M. J. *Estática y dinámica de entramados utilizando series de potencias.* JORNADAS DE JÓVENES INVESTIGADORES 2015 (JIT 2015). Declarado de interés por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la provincia de Santa Fe res. 95/2015, realizada en la Facultad Regional Venado Tuerto el 4 de noviembre.

[12] Martín H., Filipich, C. y Maurizi M. J. *Study of Natural Vibrations in Frames with Internal Articulated Bars, Using Series of Power.* INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL MODELLING AND APPLICATIONS – (ICTMA 16). Universidade Regional de Blumenau – FURB, city of Blumenau, state of Santa Catarina, Brazil, from July 14th to July 19th, 2013.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDIO DE CAÍDA LIBRE DE ESFERAS EN UN FLUJO CONTROLADO

Javier L. Raffo [1], **Federico M. Ovejero Trigás** [1]

[1] Laboratorio de Mecánica Computacional – Universidad Tecnológica Nacional - FR Delta
San Martín 1171 (2804), Campana, Buenos Aires, Argentina
correo-e: fovejero@frd.utn.edu.ar.

RESUMEN

En diversos problemas de la mecánica de fluidos computacional, es bien conocido que resulta de gran importancia realizar una comparación de los resultados numéricos con experimentales. A tal fin y gracias a que el Laboratorio de Mecánica Computacional de la UTN-FRD posee un túnel aerodinámico construido y caracterizado (Raffo y Pezzotti, [1]), es que en este trabajo se puede implementar la comparación empírica de resultados calculados.

En este trabajo se analiza el recorrido que realizan esferas en caída libre y arrastradas por un flujo transversal estacionario para número de Reynolds menores que 2 x 10^5. El estudio contempla un modelo analítico clásico resuelto en forma numérica, un modelo computacional para la obtención de los diferentes coeficientes de arrastre y ensayos en túnel aerodinámico para comparar resultados. En cuanto al método analítico clásico, se analizan las ecuaciones dinámicas para el desplazamiento vertical debido a la gravedad y en dirección horizontal causado por el arrastre de las esferas por el fluido. En el modelo computacional se analiza el flujo alrededor de las esferas con rugosidad superficial, teniendo en cuenta las diferentes velocidades y la presencia de las capas límite superior e inferior del túnel aerodinámico, para obtener finalmente valores del coeficiente de arrastre. Por último, se presentan los resultados de los desplazamientos medidos en el túnel aerodinámico para las diferentes esferas y velocidades analizadas. Se compararán los resultados obtenidos para observar el grado de correspondencia entre el método analítico clásico, método analítico con el método computacional para determinar los coeficientes de arrastre y la evidencia experimental.

Palabras Claves: *Mecánica computacional, CFD, túnel de viento, arrastre, cuerpo libre.*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas clásicos de la mecánica de fluidos es el estudio de caída libre de esferas en un flujo controlado, el cual sigue en estudio merced a la dificultad de lograr una buena correlación de valores calculados con valores experimentales. Dificulta su estudio la determinación del comportamiento del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds en la zona de transición. Sin la intención de realizar una revisión exhaustiva de la literatura al momento, a continuación se describen algunos trabajos donde se proponen diferentes fórmulas para obtener el arrastre de esferas para bajos números de Reynolds.

Clift et al. (1978) presentaron una obra completa donde analizaron varios tipos de partículas y burbujas sumergidas en fluidos para diferentes rangos de número de Reynolds. Brown y Lawler (2003) analizaron gran parte de la literatura del siglo veinte y propusieron dos nuevas correcciones para muchas de los resultados investigaciones previas que correlaciona el arrastre con la velocidad terminal de esferas teniendo en cuenta el efecto de las paredes sobre los ensayos. Una de las correcciones propuesta es para números de Reynolds menores a $2\ 10^5$ y la otra para números de Reynolds menores a 4000 con mayor precisión. Almedeij (2008) propuso una relación empírica del coeficiente de arrastre en el rango de números de Reynolds para partículas a partir de valores reportados en la literatura. Cheng (2008) propuso dos fórmulas del coeficiente de arrastre para partículas esféricas y comparó sus resultados con la de otros catorce autores para números de Reynolds hasta $2\ 10^5$. Mas recientemente, Guo (2011) propuso una solución exacta simple para Reynolds arbitrario y velocidad inicial no nula.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo analítico con solución numérica de las ecuaciones dinámicas a partir de las fuerzas intervinientes cuyos resultados se comparan con mediciones en un túnel aerodinámico cuyas características están descritas por Raffo y Pezzotti [1]. Para la obtención de los coeficientes de arrastre, se realiza un modelo de volúmenes finitos y se los compara con los obtenidos de [9].

2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El experimento consiste en dejar caer las esferas desde la parte superior de la zona de ensayo del túnel aerodinámico para tres velocidades de flujo libre y medir la distancia recorrida en dirección de la corriente al terminar la caída. La zona de ensayo posee una longitud de 1.5 m y una sección de 0.7 m de ancho por 0.5 m de altura. En la Figura 1 se presenta un esquema del problema analizado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

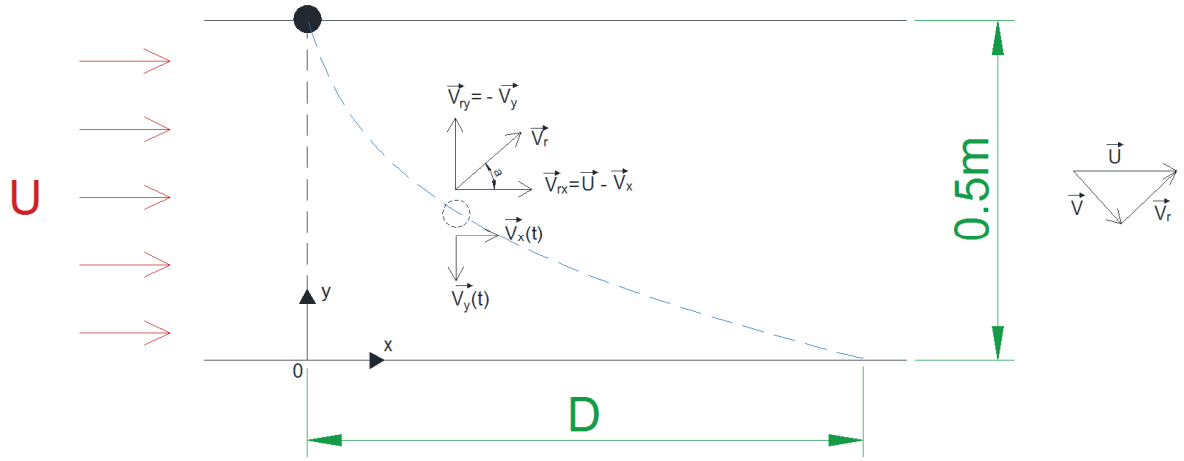


Figura 1: Esquema del problema analizado.

La esfera ingresa por la parte superior del túnel aerodinámico y se sumerge en el flujo del túnel U con dirección del eje x. En una posición intermedia, la velocidad absoluta de la esfera es $\vec{V}$ y las fuerzas actuantes son el arrastre ocasionado por la velocidad relativa de la esfera $\vec{V}_r = \vec{U} - \vec{V}$, y la fuerza de gravedad. Por lo tanto, la fuerza de arrastre resultante tiene la misma dirección que $\vec{V}_r$. En la Figura 1 se esquematiza las velocidades descritas.

Para el ensayo se utilizaron esferas de poliestireno expandido en tanto produjeron trayectorias medibles en una caída de 0.5 m, que es la altura de la zona de ensayo del túnel.

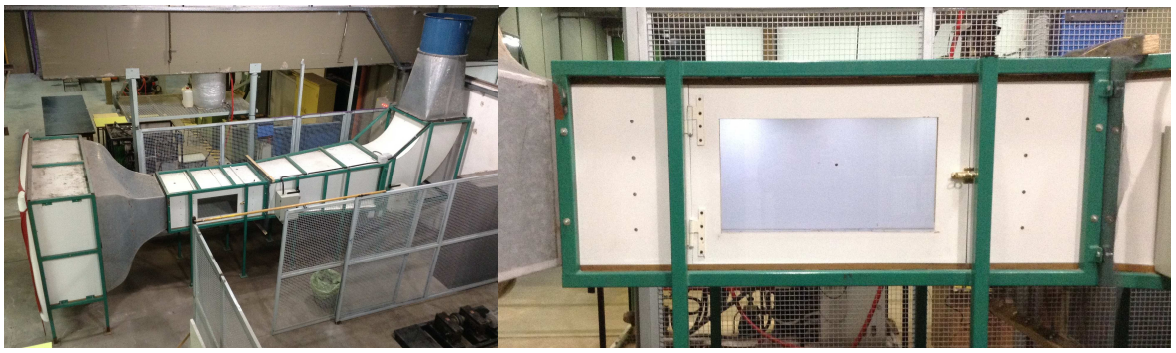


Figura 2: Túnel aerodinámico de UTN-FRD y detalle de zona de ensayo

La velocidad del flujo medida dentro del túnel (V_m) se determinó utilizando tubos de pitot con las salidas de presión estática y dinámica conectadas a un medidor digital Testo 512 modelo 0560 5126 de rango 2 a 17,5m/s y 0 a 2hPa, y resolución 0,1m/s y 0,001hPa, y la distancia recorrida se midió sobre papel milimetrado colocado en la superficie del túnel. Adicionalmente, se registró la

ISBN: 978-987-1676-63-7

presión (Testo 511 modelo 0560.511, 300-1200hPa +/-3hPa), temperatura y la humedad (Testo 610 modelo 0560.0510, -10-50ºC +/-0,5ºC, 0-100%HR +/-2,5%) para referir el ensayo a condiciones normales de presión y temperatura y así determinar la densidad del aire en el momento del ensayo $\rho(p,T,\phi)$ y de esta manera referir la velocidad a las condiciones normales de presión y temperatura V_{CNPT} según (Anderson, 2007)

$$V_{CNPT} = V_m \sqrt{\frac{\rho(p,T,\phi)}{\rho_{CNPT}}}, \tag{1}$$

donde ρ_{CNPT} es la densidad del aire en condiciones normales de presión y temperatura.

3. MODELADO ANALÍTICO-NUMÉRICO

La determinación analítica de la trayectoria de las esferas se basa en la deducción de las ecuaciones cinemáticas cuando actúan las fuerzas de gravedad y de arrastre.

Para determinar el coeficiente de arrastre C_D, se debe conocer previamente la resultante de la velocidad relativa del fluido respecto a la esfera. Para obtener las ecuaciones que describen el movimiento, se considera a C_D y α, que es el ángulo formado entre el eje horizontal X y la velocidad resultante de la esfera, constantes para resolver las ecuaciones diferenciales y así obtener el algoritmo de cálculo, pero para obtener los valores numéricos, si se determinan en cada paso.

Para el caso del desplazamiento horizontal en dirección del flujo libre (eje X de la Figura 1), la fuerza interviniente es el arrastre F_D, y está dada por

$$F_{Dx} = \frac{1}{2}\rho V_r^2 C_D A \cos\alpha \tag{2}$$

donde ρ es la densidad del aire, V_r es la resultante de la velocidad relativa de la esfera respecto a la del fluido (ver Figura 1), U es la velocidad de la corriente libre, V es la componente en x de la velocidad de la esfera y A es el área proyectada de la esfera en la dirección de la velocidad relativa del fluido.

Por otra parte, F_D obedece a la segunda ley de Newton y por lo tanto la Ecuación (2) se puede reescribir como

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$m\frac{dV_x}{dt}=\frac{\rho C_D A}{2\cos\alpha}\left(U-V_x\right)^2,\qquad F_x=\frac{1}{2}\rho C_D A Vr_x Vr=\frac{\rho C_D A}{2\cos\alpha}Vr_x{}^2 \tag{3}$$

donde m es la masa total de la esfera. Se introduce

$$k=\frac{\rho A}{2m}, \tag{4}$$

en la Ecuación (3) y se obtiene

$$\frac{dV_x}{dt}=\frac{kC_D}{\cos\alpha}\left(U-V_x\right)^2. \tag{5}$$

La Ecuación (5) se resuelve introduciendo el cambio de variables $\bar{V}=U-V$, junto con la hipótesis de que C_D se lo considera constante y con las condiciones iniciales $V(0)=V_0$. Finalmente se obtiene

$$V_x(t)=U-\frac{1}{\left(\frac{kC_D}{\cos\alpha}\left(t-t_0\right)+\frac{1}{U-V_{x,0}}\right)}. \tag{6}$$

Al integrar la Ecuación (6) con la condición inicial $X(t_0)=X_0$, se obtiene la posición de la esfera en función del tiempo

$$X(t)=X_0+U\left(t-t_0\right)-\frac{\cos\alpha}{kC_D}\ln\left[1+\frac{kC_D}{\cos\alpha}\left(t-t_0\right)\left(U-V_{x,0}\right)\right]. \tag{7}$$

Para el caso del desplazamiento vertical (eje Y de la Figura 1), las fuerzas intervinientes son la componente vertical del arrastre F_D y la masa de la esfera por la aceleración de la gravedad. Por lo tanto, de la segunda ley de Newton se obtiene

$$\frac{dV_y}{dt}=k\frac{V_y^2}{\sin\alpha}C_D-g. \tag{8}$$

Al integrar (8) con las hipótesis presentadas se obtiene

$$V_y = -\sqrt{\frac{g\sin\alpha}{kC_D}}\tanh\left[\sqrt{\frac{kC_D g}{\sin\alpha}}(t-t_0)+\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{kC_D}{g\sin\alpha}}V_{0,y}\right)\right]. \tag{9}$$

Al integrar nuevamente con la condición inicial $Y(0)=Y_0$, resulta

$$Y = Y_0 - \frac{\sin\alpha}{kC_D}\left[\ln\left(\cosh\left(\sqrt{\frac{kC_D g}{\sin\alpha}}(t-t_0)+\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{kC_D}{g\sin\alpha}}V_{0,y}\right)\right)\right)\right.$$
$$\left.-\ln\left(\cosh\left(\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{kC_D}{g\sin\alpha}}V_{0,y}\right)\right)\right)\right]. \tag{10}$$

Finalmente, el algoritmo de cálculo para la determinación de la velocidad y posición, está dado por

$$Vx(t_i) = V_\infty - \frac{V_\infty - Vx_{i-1}}{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})\Delta t+1} \tag{11}$$

$$x(t_i) = x_{i-1} + V_\infty\Delta t - \frac{V_\infty - Vx_{i-1}}{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})}\ln\left[kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})\Delta t+1\right] \tag{12}$$

$$Vy(t_i) = \sqrt{\frac{gVy_{i-1}}{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})}}\tanh\left[\sqrt{\frac{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})g}{Vy_{i-1}}}\Delta t\right.$$
$$\left.+\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})}{gVy_{i-1}}}Vy_{i-1}\right)\right], \tag{13}$$

$$y(t_i) = y_{i-1} + \frac{Vy_{i-1}}{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})}\left[\ln\left(\cosh\left(\sqrt{\frac{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})g}{Vy_{i-1}}}\Delta t\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left.+\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})}{gVy_{i-1}}}V_0\right)\right)\right)-\ln\left(\cosh\left(\tanh^{-1}\left(\sqrt{\frac{kVr_{i-1}C_D(Vr_{i-1})}{gVy_{i-1}}}V_0\right)\right)\right)\right]. \tag{14}$$

4. MODELO COMPUTACIONAL

Se realizó un modelo computacional estacionario de la corriente en torno a las esferas tomando como dominio la zona de ensayo del túnel aerodinámico para determinar el valor del coeficiente de

arrastre. El análisis se realizó para los diferentes tamaños de esferas y diferentes velocidades de flujo ensayados. Aplicando un modelo de capa límite ajustado por la rugosidad superficial, se calcula numéricamente un valor del coeficiente de arrastre. El modelo propuesto de la velocidad del fluido dentro de la capa límite está dado por (Schlichting y Gestern, 2000)

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0}, \tag{15}$$

donde u es la velocidad del fluido a la altura y de la capa límite, y_0 es la rugosidad media de la superficie, κ es la constante de Von Karman y u_* es la denominada velocidad de fricción.

4.1. Discretización

Para generar el modelo de volúmenes finitos se optó por construir una malla estructurada adaptativa de volúmenes hexaédricos con un refinamiento progresivo hacia las zonas de capa límite, calculadas analíticamente tanto para las esferas como para la pared del túnel. En la Figura 3 se presenta el esquema del dominio discretizado.

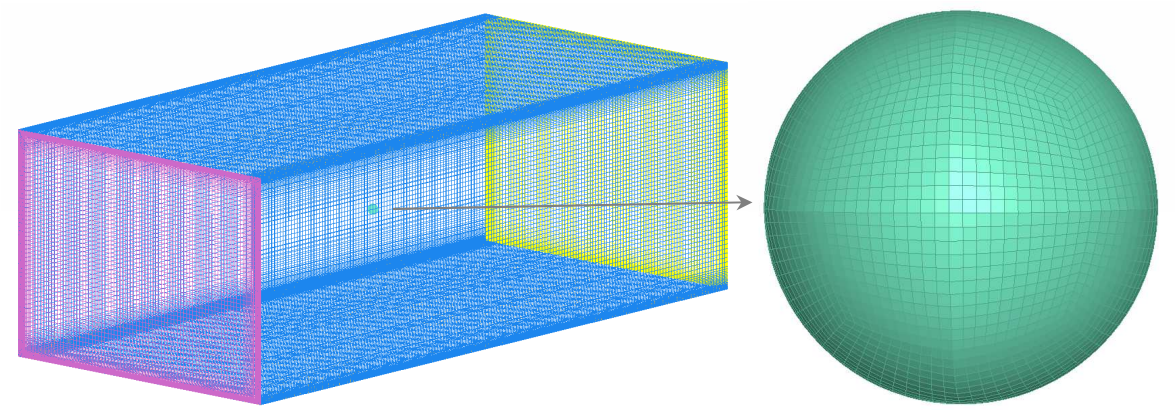


Figura 3: Discretización del dominio y superficies con capa límite

4.2. Espesor de capa límite y altura del primer elemento

Para determinar la malla en las cercanías de la pared, se estimó el espesor de la capa límite, y a partir del mismo se definió la altura del primer elemento ubicado sobre la pared. Se realizó este procedimiento para todos los casos modelados y luego se adoptó uno apto para resolver la mallada de todos los casos. En la Figura 4 se presenta las mallas cercanas a la capa límite de una esfera y en una zona sobre la pared.

ISBN: 978-987-1676-63-7

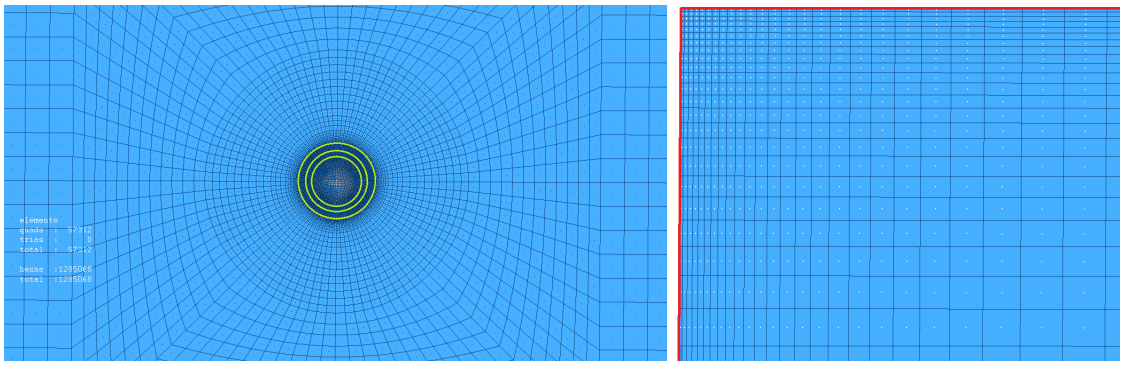


Figura 4: Refinamiento en la zona de la capa límite de la esfera (izq.) y sobre la pared en una esquina del dominio (der.)

4.3. Adaptación de la discretización a diferentes tamaños de las esferas

Se realizó el mallado del dominio para la esfera de mayor diámetro. Para las esferas mas pequeñas se mantuvo el mallado de la esfera de mayor diámetro y se agregaron capas de elementos adicionales de igual densidad de malla. En la Figura 5 se presenta un esquema de la malla mencionada.

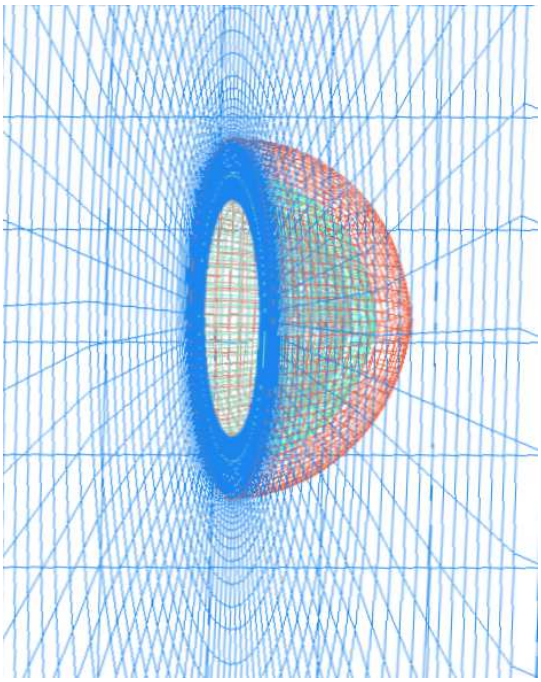


Figura 5: Malla utilizada para todas las esferas, los diferentes colores indican la malla de las esferas de menor diámetro.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. RESULTADOS

5.1. Coeficientes de arrastre para el cálculo analítico

A partir de la Ecuación 16 propuesta por Morrison (2013) [9] se determinó el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds.

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{2.6\left(\frac{\mathrm{Re}}{5.0}\right)}{1+\left(\frac{\mathrm{Re}}{5.0}\right)^{1.52}} + \frac{0.411\left(\frac{\mathrm{Re}}{263000}\right)^{-7.94}}{1+\left(\frac{\mathrm{Re}}{263000}\right)^{-8}} + \left(\frac{\mathrm{Re}^{0.80}}{461000}\right). \quad (16)$$

5.2. Coeficientes de arrastre a partir de simulaciones

En la Figura 6 se presenta el mapa de presiones obtenido con el modelo computacional para el caso de una esfera de 19 mm de diámetro nominal y una velocidad del fluido de 2.9 m/s. A partir de esta distribución de presiones se calcula computacionalmente el valor de F_D y mediante la Ecuación 2 se obtiene analíticamente el valor de C_D. En la Tabla 1 se presentan los valores de F_D y C_D obtenidos para las diferentes esferas y velocidades analizadas realizando el procedimiento descrito.

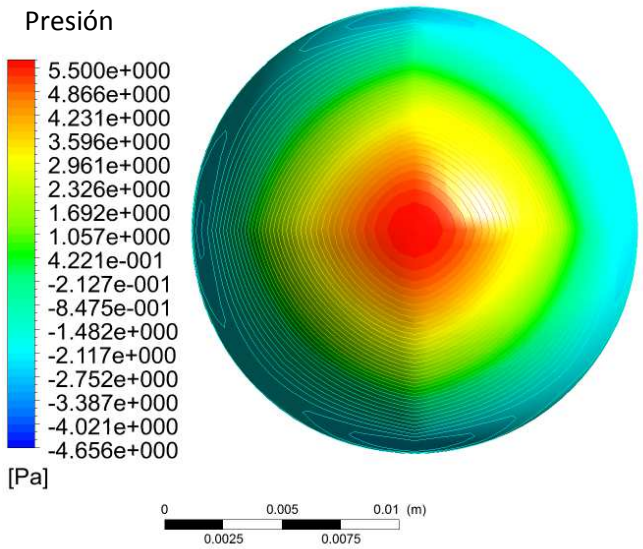


Figura 6: Distribución de presión sobre una esfera de 19 mm y 2.9 m/s de velocidad del fluido.

Tabla 1. Valores de F_D y C_D obtenidos a través del modelo computacional.

Diámetro de la esfera [mm]	Velocidad del fluido [m/s]	F_D [µN]	C_D
19	2.9	567.13	0.39
	5.8	2054.96	0.35
	7.7	3492.90	0.34
23	2.9	955.50	0.45
	5.8	3208.05	0.37
	7.7	4668.38	0.31
29	2.9	1634.60	0.48
	5.8	5026.79	0.37
	7.7	8275.82	0.35

5.3. Resultados experimentales

En la Tabla 2 se presentan las distancias recorridas por las esferas ensayadas en el túnel aerodinámico.

Tabla 2. Datos de las esferas y resultados

Diámetro [mm]	Peso [g]	Distancia recorrida [cm]		
		2,9 m/s	5,8 m/s	7,7 m/s
19	0.0871	27	63	99
	0.0912	26	62	92
	0.1054	26	61	99
	0.1154	25	56	81
	0.1226	25	57	84
	0.1247	25	59	76
23	0.1852	21	52	82
	0.1978	19	54	74
	0.2033	18	51	76
29	0.3414	16,5	44	59
	0.3469	16	49	64
	0.3794	16	42	54
	0.3879	14	44	54

ISBN: 978-987-1676-63-7

5.4. Resultados analíticos

Para realizar el cálculo de la distancia recorrida se utilizaron los valores indicados en la Tabla 3, donde la masa indicada es el resultado del promedio de la masa de las esferas medidas con una balanza Ohaus Adventurer AR 1140 de 0.1 mg de resolución y rango 0-110 g.

En la Tabla 4 se presentan los valores de la distancia recorrida en dirección del eje x obtenida con el algoritmo numérico desarrollado a partir del modelo analítico propuesto para $U =$ 2.9 m/s, 5.8 m/s y 7.7 m/s, y para los diámetros de las esferas de 19 mm, 23 mm y 29 mm.

Tabla 3. Parámetros de las esferas

Diametro [mm]	Masa promedio [g]	Area [m²] x 10^6
19	0.108	283.529
23	0.195	415.476
29	0.364	660.52

Tabla 4. Distancias en dirección del eje x para las diferentes velocidades de flujo U y diferentes tamaños de las esferas, obtenidas con el método analítico-numérico con arrastre según [9]

Diámetro de la esfera [mm]	Velocidad del fluido [m/s]	C_D	Distancia en dirección del eje x recorrida [m]
19	2.9	0.41	0.1991
	5.8	0.40	0.6355
	7.7	0.39	1.0060
23	2.9	0.41	0.1636
	5.8	0.39	0.5208
	7.7	0.39	0.8561
29	2.9	0.40	0.1379
	5.8	0.39	0.4541
	7.7	0.39	0.7505

5.5. Comparación de resultados

En la Tabla 5 se comparan los resultados de la distancia recorrida obtenidos con el algoritmo numérico utilizando la Ecuación 16 ([9]) para el valor de C_D, con el algoritmo numérico utilizando el valor de C_D obtenido con el modelo computacional y los valores medidos en el ensayo con el

ISBN: 978-987-1676-63-7

túnel aerodinámico. El error de la medición está incluido en los rangos de dispersión de los valores experimentales.

Si se considera que los valores de rugosidad propuestos en el modelo computacional de las esferas son aproximados, se observa que estos proporcionan mejores resultados que los valores de C_D obtenidos de [9].

Tabla 5. Distancias en dirección x recorridas por las esferas obtenidas con las tres metodologías propuestas.

Velocidad [m/s]	Tipo de trayectoria	Distancia recorrida [cm]		
		D=19mm	D=23mm	D=29mm
2,9	Numérico c/arrastre según [9]	19.91	16.36	13.79
	Numérico c/arrastre computacional	18.69	17.74	16.21
	Experimental	25-27	18-21	14-16,5
5,8	Numérico c/arrastre según [9]	63.55	52.08	45.41
	Numérico c/arrastre computacional	56.80	49. 21	43.29
	Experimental	56-63	51-64	42-49
7,7	Numérico c/arrastre según [9]	100.60	85.61	75.05
	Numérico c/arrastre computacional	90.19	70.23	67.96
	Experimental	81-99	74-76	54-64

6. CONCLUSIONES

Se analizó el recorrido que realizan diferentes esferas en caída libre y arrastradas por un flujo transversal estacionario para número de Reynolds menores que 2 x 10^5, con un modelo analítico clásico para generar un algoritmo numérico-analítico, un modelo computacional para la obtención de los diferentes coeficientes de arrastre combinado con el algoritmo numérico-analítico y realizando ensayos en túnel aerodinámico.

Se compararon los resultados obtenidos con las tres metodologías propuestas obteniendo buenos resultados, en particular se observa que el método analítico clásico combinado con el coeficiente de arrastre obtenido computacionalmente presenta mejores resultados que con los coeficientes de

ISBN: 978-987-1676-63-7

arrastre obtenidos de [9]. Esto es porque los valores calculados consideran una rugosidad no contemplada en [9]. Por otra parte, las diferencias observadas es altamente probable que sean debido a las imperfecciones geométricas de las esferas.

6. REFERENCIAS

[1] Javier L. Raffo et al, Mediciones experimentales para caracterización de un túnel aerodinámico, Cuadernos de la Facultad de Ingeniería e Informática, Universidad Católica de Salta, vol. 7, 2012: 73-79

[2] Clift R., Grace, J. R. y Weber, M. E., Bubbles, Drops, and Particles, Academic Press, New York, 1978.

[3] Brown P. P., Lawler D. F., Sphere drag and settling velocity revisited, Journal of Environmental Engineering, vol. 129, No 3, 2003:222-231.

[4] Almedeij J., Drag coefficient of flow around a sphere: Matching asymptotically the wide trend, Powder Technology, vol. 186, Nº 3, 2008:218-223.

[5] Cheng N., Comparison of formulas for drag coefficient and settling velocity of spherical particles, Powder Technology, vol.189, Nº3, 2008:395-398.

[6] H. K. Versteeg y Malalasekera, An introduction To Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method, Longman 1995.

[7] Shames, Irving, Mecánica de los Fluidos, Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A., 3ª edición, Bogotá, Colombia, 1995.

[8] Junke Guo, Motion of spheres falling through fluids, Journal of Hydraulic Research, vol. 49, 2011: 32-41

[9] F. A. Morrison, An Introduction to Fluid Mechanics, Cambridge University Press, New York, 2013. Figura 8.13 p. 625.

[10] John D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, p.215 (4ª edición), McGraw-Hill, 2007.

[11] Hermann Schlichting & Klaus Gestern, Boundary-Layer Theory, p. 530, 2000.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

INTERACCIÓN DINÁMICA VEHÍCULO PUENTE EN TRENES DE ALTA VELOCIDAD

Raúl Ritta, José Stuardi y Bruno Roccia

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba
Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 – Córdoba, Argentina
correo-e: raul.ritta@gmail.com

RESUMEN

Desde la puesta en funcionamiento del primer tren japonés de alta velocidad en 1964, este medio de transporte gana creciente competitividad uniendo las grandes ciudades en distintos países del mundo. La rápida expansión de los trenes de alta velocidad en las últimas dos décadas generó un auge en investigación de problemas que involucran cargas en movimiento e interacción dinámica vehículo-puente. Actualmente representa una disciplina especial dentro del amplio campo de la dinámica estructural.

Se presenta un modelo dinámico 2D simplificado para estudiar la interacción entre un vehículo y la estructura del puente por el que se desplaza. El sistema vehículo-puente se modela como una colección de cuerpos rígidos, partículas y cuerpos deformables conectados entre sí rígidamente o por conectores flexibles, mientras que el puente es representado por una viga de Euler-Bernoulli/Rayleigh.

Las ecuaciones de movimiento que gobiernan la evolución espacio-temporal del sistema vehículo-puente son resueltas mediante dos técnicas: En la primera, basada en un enfoque multicuerpo, se derivan las ecuaciones mediante un enfoque energético. Las ecuaciones resultantes obtenidas mediante este enfoque son del tipo diferenciales-algebraicas (DAEs) de índice 3. La integración se realiza en forma numérica en el dominio del tiempo mediante el procedimiento ODE45 disponible en MATLAB®. En la segunda técnica, se emplea la discretización espacial basada en Elementos Finitos y el concepto de fuerzas de contacto, utilizando un esquema de diferencia finita de Newmark para la integración de las ecuaciones de movimiento.

Las técnicas citadas se aplican a un caso sencillo de estudio, citado anteriormente en la bibliografía. Las experiencias y resultados obtenidos permiten contrastar las ventajas y desventajas de ambos procedimientos, teniendo además en cuenta la necesidad de considerar en el futuro modelos de complejidad creciente, que describan con mayor grado de precisión la respuesta del sistema acoplado.

Palabras Claves: *Tren, puente, Interacción, multicuerpo.*

1. INTRODUCCIÓN

La interacción dinámica entre un puente y los vehículos en movimiento que sobre él transitan constituye una disciplina científica especial dentro de la vasta área de la dinámica estructural. Los vehículos pueden ser aquellos que constituyen el flujo de tráfico en un puente carretero o aquellos que conforman una línea conectada de vagones de ferrocarril. El sistema vehículo-puente puede ser considerado compuesto por dos subsistemas, por un lado el puente y por otro el vehículo. Estos, interactúan entre sí a través de fuerzas de contacto inducidas en los puntos de contacto entre las ruedas y las superficies del pavimento o la superficie de los rieles, según sea el caso. Desde el punto de vista teórico, especial interés reviste el estudio de puentes ferroviarios debido al carácter repetitivo de las cargas inducidas por las ruedas.

En los comienzos, los trabajos sobre la dinámica de puentes se concentraron en obtener soluciones analíticas o aproximadas de algunos problemas sencillos, concentrando la atención en la respuesta del puente. Aquí se pueden citar a Timoshenko [1], quien derivó una enorme cantidad de soluciones aproximadas del problema de vigas simplemente apoyadas bajo la acción de cargas en movimiento, y a Inglis [2], cuyas investigaciones teóricas y experimentales sentaron las bases para los desarrollos posteriores. El avance de la tecnología, especialmente el desarrollo de ordenadores más potentes, con mayor capacidad de cómputo y almacenamiento, ha impulsado la confección de modelos numéricos cada vez más complejos para el estudio interacción vehículo-puente. De la bibliografía disponible se puede destacar los trabajos de Timoshenko y Young [3], Biggs [4], Frýba [5,6] y Garg y Dukkipati [7]. Biggs, por ejemplo, presentó una solución semi-analítica para el problema de una viga simplemente apoyada transitada por un vehículo modelado como un sistema masa-resorte-amortiguador. Frýba por otro lado, en su libro del año 1972, presenta el tratamiento de distintos modelos para el vehículo, como lo son la carga en movimiento, el modelo de masa en movimiento y el de un sistema masa resorte en movimiento, concentrando la atención principalmente en la respuesta del puente.

Desde los inicios de la era de los trenes de alta velocidad, en la década del 60, el interés de los investigadores en problemas que involucren cargas en movimiento y en particular la interacción vehículo-puente ha aumentado, teniendo su auge en las últimas dos décadas. Los métodos de solución propuestos para este tipo de problemas van desde soluciones analíticas, para el caso de modelos sencillos, hasta soluciones numéricas que emplean procedimientos iterativos [8-10]. Por otro lado, existen métodos de cálculo que eliminan las fuerzas de contacto originadas por la interacción de los dos sistemas dinámicos mediante un procedimiento de condensación, obteniéndose un nuevo conjunto de ecuaciones acopladas [11,12]. Recientemente, Yang y Wu [13]

ISBN: 978-987-1676-63-7

presentaron un método más versátil que básicamente consiste en obtener las fuerzas de contacto a partir de las ecuaciones de movimiento del vehículo. Otros métodos que también han sido empleados son los de integración directa, la superposición modal y el método de la transformación de Fourier [11,14,15].

En este trabajo se presenta el tratamiento del problema de interacción vehículo-puente mediante un enfoque multicuerpo [16]. Las ecuaciones que gobiernan la dinámica del sistema se derivan mediante un enfoque energético basado en las ecuaciones de Lagrange para sistemas con restricciones. El sistema es modelado como una colección de partículas (vehículo) y cuerpos flexibles (puente) conectados entre sí rígidamente y/o por articulaciones flexibles. Los resultados obtenidos son luego comparados con el método de las fuerzas de contacto propuesto por Yang y Wu [13,17].

2. Modelo dinámico

En la Figura 1a se presenta un esquema del sistema dinámico a estudiar en este trabajo, el cual consiste de una viga de longitud L simplemente apoyada y un tren que se mueve sobre la misma a una velocidad v_t. Si bien el subsistema dinámico asociado al tren se puede modelar en detalle, en esta primera etapa se considera el tren compuesto por una sucesión de unidades conformadas por dos cuepos: *i*) una masa puntual suspendida representando la mitad de la masa del vagón, y *ii*) una segunda masa puntual en contacto con el puente representando la masa del *bogie* delantero o trasero (ver Figura 1b). Específicamente, en este trabajo, el sistema dinámico a estudiar consiste de: i) el puente, modelado como un cuerpo flexible unidimensional asumiendo las hipótesis de Euler-Bernoulli/Rayleigh para vigas; y ii) una única unidad masa-resorte-amortiguador transitando sobre el puente (ver Figura 1c).

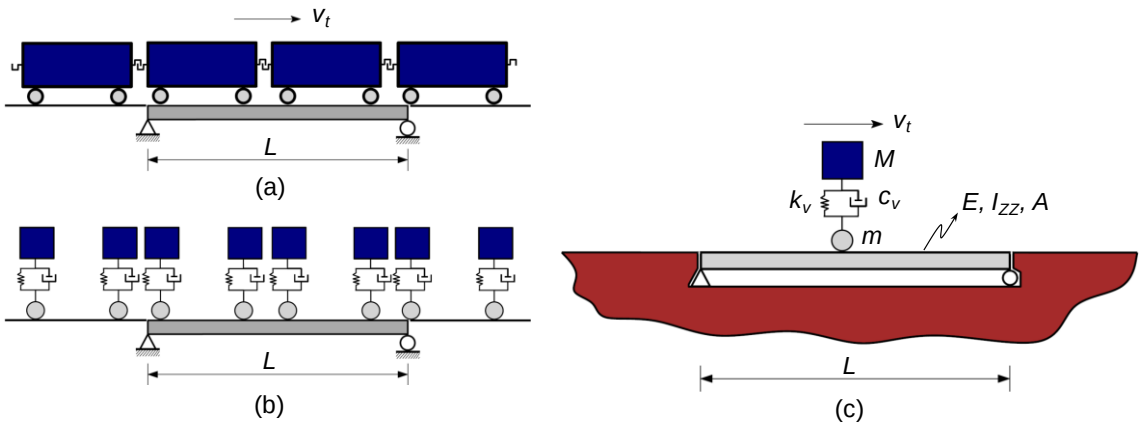


Figura 1: Sistema dinámico puente-tren: (a) modelo general, (b) modelo de unidades masa-resorte-amortiguador, (c) sistema dinámico a estudiar

2.1. Generalidades

El enfoque utilizado para derivar las ecuaciones de movimiento que gobiernan la dinámica del sistema puente-tren está basado en las ecuaciones de Lagrange para coordenadas redundantes y restricciones holonómicas. Para describir la cinemática del elemento flexible (viga) que representa el puente se utilizan dos teorías de vigas diferentes: i) viga de Euler-Bernoulli (no considera la inercia rotacional de la sección transversal); y ii) viga de Rayleigh (considera la inercia rotacional de la sección transversal) [18]. Adicionalmente, el puente es considerado como una viga prismática con densidad ρ, área de la sección transversal A, módulo de Young E y momento de inercia de la sección transversal I_{ZZ}. La masa suspendida, M, representa la mitad de la masa del cuerpo del vagón, mientras que la masa que se encuentra en contacto con el puente, m, representa la masa del bogie. La vinculación entre las masas se realiza mediante un resorte, cuya constante de rigidez es k_v, y un amortiguador, cuya constante de amortiguamiento es c_v.

Debido al uso de coordenadas redundantes, el número de coordenadas adoptadas para describir el espacio de configuración del sistema multicuerpo es superior al número de grados de libertad; como consecuencia, se deben especificar ecuaciones de restricción, las cuales son introducidas automáticamente en las ecuaciones de movimiento a través de la utilización de los multiplicadores de Lagrange [16]. Para llevar a cabo de una manera ordenada la deducción de las ecuaciones de movimiento del sistema puente-tren, se utilizaron 2 sistemas de referencia (ver Figura 2): *i*) Un marco de referencia inercial o Newtoniano $\mathbf{N} = (\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2, \hat{\mathbf{n}}_3)$; y *ii*) un marco de referencia fijo a una sección transversal de la viga ubicada a una distancia arbitraria x en la configuración indeformada, denotado $\mathbf{B} = (\hat{\mathbf{b}}_1, \hat{\mathbf{b}}_2, \hat{\mathbf{b}}_3)$. Los vectores $\hat{\mathbf{n}}_j, \hat{\mathbf{b}}_j$ para j = 1, 2, 3 son vectores unitarios que generan bases ortonormales y dextrógiras (satisfacen la regla de la mano derecha).

La discretización espacial de la viga que simula el puente se realiza por medio del método de elementos finitos. El elemento adoptado tiene dos grados de libertad por nodo (desplazamiento transversal y giro), esto introduce un total de $2N_n$ coordenadas generalizadas asociadas a la viga, donde $N_n = N_e + 1$, siendo N_e el número de elementos finitos que componen la viga. Para el caso de las masas puntuales, se utilizan dos coordenadas cartesianas para definir su posición respecto al marco de referencia inercial **N**. Esto da un total de $N_{coord} = 2N_n + 4$ coordenadas para describir la configuración del sistema dinámico puente-tren. Sin embargo, este conjunto de coordenadas no es independiente ya que están relacionadas mediante ecuaciones de restricción.

En esta primera etapa se considera que: *i*) la unidad masa-resorte-amortiguador se desplaza sobre la viga a velocidad constante; *ii*) la posición de la masa no suspendida en la dirección $\hat{\mathbf{n}}_1$ se considera igual, en todo momento, a la de la masa suspendida; y *iii*) la masa no suspendida se

ISBN: 978-987-1676-63-7

encuentra en contacto con el puente para todo tiempo. Estas relaciones se materializan por medio de la introducción de 3 ecuaciones de restricción (n_c = 3) produciendo un total de $N_{DOF} = N_{coord} - n_c$ grados de libertad para el sistema dinámico completo. Finalmente, las condiciones de borde asociada a la viga que representa el puente corresponden a la condición clásica articulado-articulado, donde articulado significa desplazamiento transversal nulo y giro libre.

El conjunto de coordenadas adoptadas para cada cuerpo se exponen a continuación:

$$\mathbf{q}_1 = (q_1, q_2, ..., q_{2N_n})^T, \quad \mathbf{q}_2 = (q_{2N_n+1}, q_{2N_n+2})^T = (x_2, y_2)^T \quad \text{y} \quad \mathbf{q}_3 = (q_{2N_n+3}, q_{2N_n+4})^T = (x_3, y_3)^T. \tag{1}$$

donde x_i, y_i para i = 2,3 son coordenadas cartesianas regulares asociadas a los vectores unitarios $\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2$ respectivamente. En lo que sigue se utilizará el siguiente léxico para denotar los distintos componentes del sistema multicuerpo: la viga que representa el puente (Cuerpo 1), la masa suspendida que representa el vagón (Cuerpo 2), y la masa no suspendida que representa la rueda (Cuerpo 3).

2.2. Ecuaciones de restricción

Como se mencionó anteriormente el Cuerpo 2 tiene un movimiento prescripto en la dirección $\hat{\mathbf{n}}_1$. Además, las dos masas puntuales deben tener en todo instante de tiempo la misma posición según la dirección $\hat{\mathbf{n}}_1$. Por último se impone una restricción al Cuerpo 3, impidiéndole que se separe del Cuerpo 1 en todo momento. Estas tres restricciones son del tipo holonómicas. La primera ecuación de restricción impone una velocidad v_t sobre el Cuerpo 2; debido a su simplicidad, se puede encontrar un factor de integración de tal manera que su forma Pfaffiana se pueda integrar y obtener la ecuación de restricción como función de las coordenadas y no sus velocidades, esto es,

$$\varphi_1 = \frac{dx_2}{dt} - v_t = 0 \quad \rightarrow \quad \varphi_1 = x_2 - v_t t = 0. \tag{2}$$

Adicionalmente, φ_1 es del tipo rehónoma debido a que depende explícitamente del tiempo (prescripción de una velocidad). Las dos ecuaciones de restricción restantes son del tipo esclerónomas debido a que el tiempo no aparece explícitamente en la formulación de dichas ecuaciones.

Las expresiones matemáticas que definen las tres ecuaciones de restricción introducidas en el párrafo anterior son las siguientes:

$$\varphi_1 = x_2 - v_t t = 0, \quad \varphi_2 = x_2 - x_3 = 0, \quad \text{y} \quad \varphi_3 = y_3 - v(x_3, t) = 0, \tag{3}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

donde $v(x,t)$ es la componente en la dirección $\hat{\mathbf{n}}_2$ del vector desplazamiento elástico en la viga, la cual será tratada en detalle en la subsección 2.3.1.

Finalmente, el vector de restricción, $\mathbf{\Phi}(\mathbf{q},t)$, tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{\Phi}(\mathbf{q},t) = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)^T . \tag{4}$$

2.3. *Cinemática y ecuación de movimiento de la viga*

La Figura 2 muestra la viga en su configuración indeformada y deformada. El vector posición de un punto arbitrario *P* sobre la sección transversal de la viga en la configuración indeformada y expresado en el marco de referencia **N** es:

$$\mathbf{R}_P^1 = \mathbf{r}^{o'/o} + y_0\, \hat{\mathbf{b}}_2^1 = \mathbf{r}^{o'/o} + y_0\, \hat{\mathbf{n}}_2 , \tag{5}$$

donde $\mathbf{r}^{o'/o}$ es el vector posición del origen o' del marco de referencia **B** con respecto al marco de referencia Newtoniano, **N**, supuesto fijo en el extremo izquierdo de la viga, e y_0 es la coordenada en la dirección $\hat{\mathbf{b}}_2$ del punto *P* considerado. De manera similar, una vez deformada la viga, el nuevo vector posición del punto *P* es:

$$\mathbf{R}_P^{1D} = \mathbf{r}^{o'/o} + \mathbf{U}_P = \mathbf{r}^{o'/o} + \mathbf{U} + y_0\, \hat{\mathbf{b}}_2 = \left(x - y_0 \frac{\partial}{\partial x} v(x,t) \right) \hat{\mathbf{n}}_1 + \left(y_0 + v(x,t) \right) \hat{\mathbf{n}}_2 , \tag{6}$$

donde $\mathbf{U}_P$ es el vector desplazamiento elástico asociado al punto *P*, **U** es el vector desplazamiento elástico del origen del marco **B**, y $v(x,t)$ es la componente en la dirección $\hat{\mathbf{n}}_2$ del vector desplazamiento **U**.

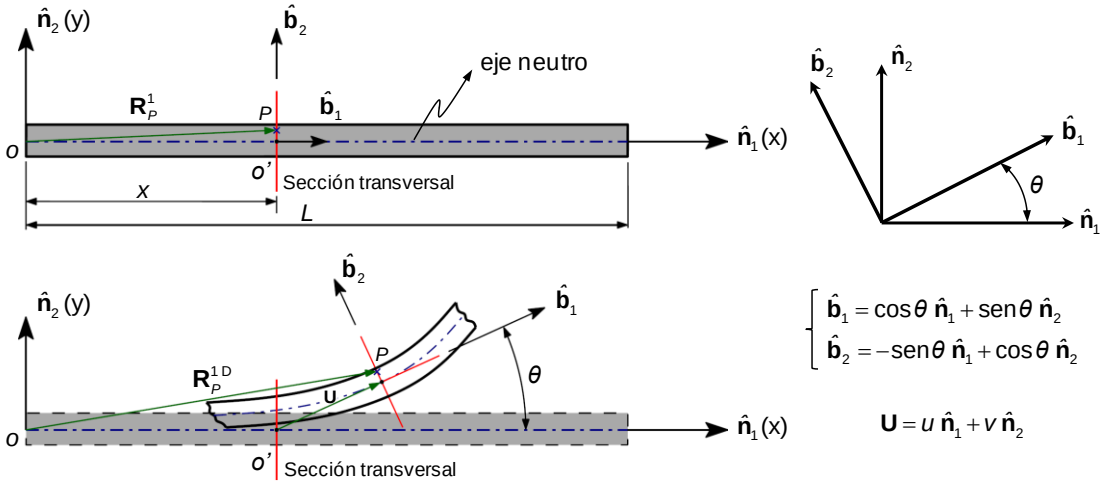


Figura 2: Cinemática de la viga

Como se mencionó anteriormente en la Sección 2.1, la teoría de viga adoptada para describir la cinemática del Cuerpo 1 corresponde a las teorías de Euler-Bernoulli y Rayleigh válidas para pequeños desplazamientos / rotaciones. Además, se debe mencionar que en la formulación presentada en este trabajo se ha despreciado el acortamiento de la proyección debida a la conservación de la longitud de arco.

Las expresiones para la energía cinética, T_1, y potencial elástica, V_1, de la viga son:

$$T_1 = \frac{1}{2}\int_0^L \rho I_{zz}\left(\frac{\partial}{\partial x}\dot{v}(x,t)\right)^2 dx + \frac{1}{2}\int_0^L \bar{m}(\dot{v}(x,t))^2 dx, \qquad V_1 = \frac{1}{2}\int_0^L E I_{zz}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}v(x,t)\right)^2 dx\,, \tag{7}$$

donde el punto sobre la variable implica derivada respecto al tiempo y $\bar{m} = \rho A$ es la masa por unidad de longitud.

2.3.1 Discretización de la viga

El campo de desplazamiento a nivel del elemento, $v_e(\eta,t)$, se escribe en forma aproximada como (ver Figura 3),

$$v_e(\eta,t) = \sum_{k=1}^{4} b_k^e\, g_k\,, \tag{8}$$

donde η es la coordenada local dentro del elemento e, b_k son las coordenadas elásticas, funciones del tiempo, y g_k son funciones base en término de la coordenada espacial η. Las funciones base corresponden a las funciones de interpolación cúbicas de Hermite.

La Ecuación (9) se puede escribir en forma matricial como

$$v_e(\eta,t) = \mathbf{S}\mathbf{q}_1^e\,, \tag{9}$$

donde **S** es una matriz de forma (en nuestro caso es un vector fila) cuyos elementos son las funciones base, y $\mathbf{q}_1^e$ es un vector columna de coordenadas elásticas del Cuerpo 1 asociadas al elemento e.

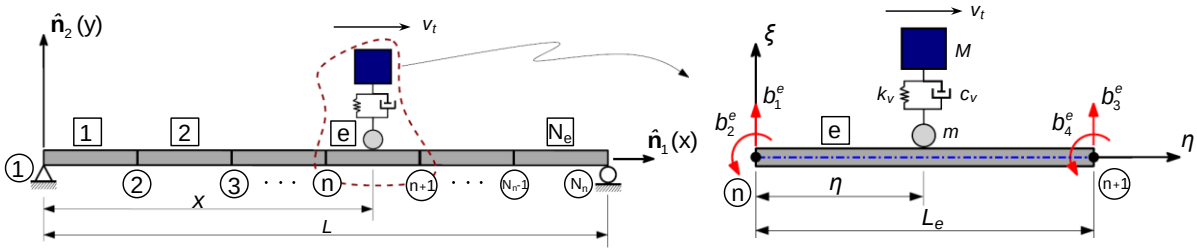


Figura 3: Discretización de la viga en elementos finitos

Reemplazando la Ecuación (10) en las Ecuaciones (7) se obtienen las expresiones para la energía cinética y potencial asociadas al elemento *e*,

$$T_1^e = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}_1^{eT}\left[\int_0^{L_e} \rho I_{zz} \frac{\partial}{\partial x}\left(\mathbf{S}^T\right)\frac{\partial}{\partial x}\left(\mathbf{S}\right)dx + \int_0^{L_e} \bar{m}\mathbf{S}^T\mathbf{S}\,dx\right]\dot{\mathbf{q}}_1^e = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}_1^{eT}\,\mathbf{M}_1^e\,\dot{\mathbf{q}}_1^e, \text{ y}$$
$$V_1^e = \frac{1}{2}\mathbf{q}_1^{eT}\left[\int_0^{L_e} E I_{zz} \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\mathbf{S}^T\right)\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\mathbf{S}\right)dx\right]\mathbf{q}_1^e = \frac{1}{2}\mathbf{q}_1^{eT}\mathbf{K}_1^e\,\mathbf{q}_1^e, \tag{10}$$

donde L_e es la longitud del elemento, $\mathbf{M}_1^e$ la matriz de masa del elemento simétrica y definida positiva y $\mathbf{K}_1^e$ la matriz de rigidez del elemento, simétrica y positiva definida.

2.3.2 Fuerzas generalizadas asociadas a la viga

Un paso esencial en la formulación Lagrangiana de las ecuaciones dinámicas del sistema multicuerpo es la evaluación de las fuerzas generalizadas asociadas a las coordenadas utilizadas para describir la configuración del sistema. Considerando que el material de la viga es isótropo lineal, el trabajo virtual [16] debido a las fuerzas elásticas a nivel del elemento es:

$$\delta W_{\mathrm{S}}^{1e} = -\mathbf{q}_1^{e^T}\,\mathbf{K}_1^e\,\delta\mathbf{q}_1^e = -\mathbf{Q}_{\mathrm{S}}^{1e^T}\,\delta\mathbf{q}_1^e, \tag{11}$$

donde,

$$\mathbf{Q}_{\mathrm{S}}^{1e} = -\mathbf{K}_1^e\,\mathbf{q}_1^e. \tag{12}$$

Se debe mencionar, además, que las fuerzas generalizadas conservativas debidas a la acción del campo gravitatorio terrestre sobre la viga no han sido consideradas en este trabajo.

2.3.3 Ecuaciones de movimiento de la viga

Para derivar las ecuaciones de movimiento de la viga se utilizan las ecuaciones de Lagrange para sistemas con restricciones:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}}\right)^T + \mathbf{B}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}^{\mathrm{nc}} + \mathbf{Q}^{\mathrm{c}},$$
$$\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}, \tag{13}$$

Utilizando las ecuaciones (11) y (12) derivadas a nivel elemental y realizando un procedimiento de ensamblaje estándar asociado al método de elementos finitos se obtienen las ecuaciones de movimiento para el Cuerpo 1 que simula el puente en el sistema multicuerpo puente-tren:

$$\mathbf{M}_1\ddot{\mathbf{q}}_1 + \mathbf{K}_1\mathbf{q}_1 + \mathbf{B}_{\mathbf{q}_1}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \tag{14}$$

donde $\mathbf{M}_1$ es la matriz de masa de todo el cuerpo flexible, $\mathbf{K}_1$ es la matriz de rigidez del cuerpo flexible, $\boldsymbol{\lambda}$ son los multiplicadores de Lagrange, y $\mathbf{B}_\mathbf{q}$ es la matriz Jacobiana asociada a las ecuaciones de restricción.

Se debe destacar además que, a medida que el vehículo transita por el puente, éste se mueve a través de cada uno de los N_e elementos que componen la versión discretizada del Cuerpo 1. Este fenómeno se refleja en una redistribución de los términos distintos de cero en la matriz Jacobiana de restricción. Con el objetivo de automatizar el cálculo de la matriz Jacobiana $\mathbf{B}_\mathbf{q}$ cuando el vehículo se mueve de un elemento a otro, $e_i \rightarrow e_i + 1$, las ecuaciones de restricción se escriben a nivel local del elemento *e*, esto es:

$$\varphi_1 = x_2 - v_t \times t = 0, \qquad \varphi_2 = x_2 - x_3 = 0 \quad \text{y} \quad \varphi_3 = y_3 - v_e(\eta, t) = 0, \tag{15}$$

donde $v_e(\eta,t)$ fue definido en la Ecuación (10).

2.4. *Ecuaciones de movimiento de las masas puntuales*

Utilizando el mismo procedimiento anteriormente, las ecuaciones de movimiento para el cuerpo 2 y el cuerpo 3 son:

$$\begin{aligned} &\mathbf{M}_2\ddot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{K}_2\mathbf{q}_2 + \mathbf{B}_{\mathbf{q}_2}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}_2, \ \ y \\ &\mathbf{M}_3\ddot{\mathbf{q}}_3 + \mathbf{K}_3\mathbf{q}_3 + \mathbf{B}_{\mathbf{q}_3}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}_3. \end{aligned} \tag{16}$$

Donde $\mathbf{M}_2$ ($\mathbf{M}_3$) es la matriz de masa diagonal asociada al cuerpo 2 (3), $\mathbf{K}_2$ ($\mathbf{K}_3$) es la matriz de rigidez del cuerpo 2 (3) originada por el vínculo elástico entre los cuerpos 2 y 3, $\mathbf{B}_{\mathbf{q}_2}$ ($\mathbf{B}_{\mathbf{q}_3}$) es la matriz Jacobiana de restricción asociada al cuerpo 2 (3) y $\mathbf{Q}_2$ ($\mathbf{Q}_3$) es el vector de fuerzas generalizadas asociada a las coordenadas $\mathbf{q}_2$ ($\mathbf{q}_3$).

2.4.1 Fuerzas generalizadas asociadas a las masas puntuales

Las fuerzas generalizadas asociadas al sistema resorte-amortiguador que vincula a las dos masas y las correspondientes a la acción del campo gravitatorio terrestre sobre cada una de las dos masas son:

$$\mathbf{Q}_2 = -\left[k_v(l - l_0) + c_v\dot{l}\right]\hat{\mathbf{l}} - Mg\,\hat{\mathbf{n}}_2, \quad y \quad \mathbf{Q}_3 = \left[k_v(l - l_0) + c_v\dot{l}\right]\hat{\mathbf{l}} - mg\,\hat{\mathbf{n}}_2. \tag{17}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Donde l_0 es la longitud indeformada del resorte, l es la longitud deformada del resorte, $\hat{\mathbf{I}}^T$ es un vector unitario a lo largo de la línea que une la masa m a la masa M, $\dot{\mathbf{I}}$ es la derivada temporal del vector **I**. y g es la constante de aceleración de la gravedad.

La matriz Jacobiana de restricciones asociada a la masa suspendida y a la masa no suspendida son:

$$\mathbf{B}_{\mathbf{q}_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad y \quad \mathbf{B}_{\mathbf{q}_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ -\partial v_e(\eta,t)/\partial x_3 & 1 \end{bmatrix}, \tag{18}$$

donde la componente (3,1) de la matriz $\mathbf{B}_{\mathbf{q}3}$ se computa por medio de,

$$\frac{\partial v_e(\eta,t)}{\partial x_3} = \frac{\partial v_e(\eta,t)}{\partial \eta}\frac{\partial \eta}{\partial x_3} \quad \text{y} \quad \eta = x_3 - x_n. \tag{19}$$

2.5. *Ecuaciones de movimiento del sistema*

Finalmente, las ecuaciones de movimiento para el sistema total se obtienen ensamblando las ecuaciones de movimiento para cada cuerpo:

$$\begin{aligned} &\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{B}_{\mathbf{q}}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \\ &\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}, \end{aligned} \tag{20}$$

Donde **M** es la matriz de masa total del sistema, **C** es la matriz de amortiguamiento total del sistema, **K** es la matriz de rigidez total del sistema, $\mathbf{B}_{\mathbf{q}}$ es la matriz Jacobiana de restricción del sistema, $\mathbf{Q}_e$ es el vector de fuerzas generalizadas externas y $\mathbf{Q}_v$ es el vector cuadrático en las velocidades, siendo este último cero para este caso.

2.6. Implementación numérica

Las ecuaciones diferenciales junto con el vector de restricciones cinemáticas presentados en la Ecuación (20) representan un sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas (DAEs) de índice 3 para el sistema completo. Para estas ecuaciones, por el hecho de ser altamente no-lineales, no existe en general una técnica analítica para su resolución.

La metodología adoptada en este trabajo para resolver el sistema presentado en la Ecuación (20) consiste en derivar el vector de restricciones dos veces respecto al tiempo. Esta nueva ecuación suele ser llamada “restricciones a nivel de la aceleración”.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.6.1 Integrador y Método de estabilización

El enfoque seguido en el presente trabajo trata cada una de las partes que conforman al vehículo y a los distintos elementos en que se ha discretizado a la viga como elementos de un único sistema dinámico y se integran todas las ecuaciones gobernantes numéricamente, simultáneamente e interactivamente en el dominio del tiempo. El esquema de integración numérica adoptado en este trabajo es el de Runge-Kutta, en particular se empleó el integrador ode45 disponible en MATLAB®.

Sin embargo, el sistema de ecuaciones resultantes luego de la reducción de índice presenta inestabilidades como consecuencia de la acumulación de errores de redondeo producidos durante la integración numérica. Esto tiene como consecuencia la violación de las ecuaciones de restricción. Para evitar este inconveniente, existen diferentes métodos de estabilización, siendo uno de las más populares dentro del ámbito de la dinámica de multicuerpos, por su simplicidad y fácil implementación, el propuesto por Baumgarte [19,20].

2.6.2 Validación

En esta subsección se valida el código computacional que implementa la formulación matemática presentada en las secciones 2.1 a 2.5 y la técnica de integración numérica y estabilización numérica introducidas en la subsección anterior.

Para validar el código computacional se realiza una comparación entre los resultados obtenidos a partir de una solución semianalítica presentada por Biggs [4] y aquellos que surgen de la formulación presentada en este trabajo. Los datos adoptados son: $\bar{m} = 2303\,\text{kg/m}$, $L = 25\,\text{m}$, $I_{ZZ} = 2.9\,\text{m}^4$, $E = 2.87\times10^9\,\text{N/m}^2$, $M = 5750\,\text{kg}$ y $k_v = 1595\,\text{kN/m}$. La velocidad a la cual transita el vehículo por el puente es $v_t = 100\,\text{km/h}$, el paso de tiempo escogido para ambas simulaciones es $\Delta t = 5\times10^{-3}$ segundos y el número de elementos utilizados para discretizar el puente es 10. La Figura 4a muestra el historial del desplazamiento del puente en la mitad de la luz obtenido por para la presente formulación y superpuesto a la solución semianalítica. El error relativo porcentual cuando se compara la máxima deflexión del puente obtenida de la presente formulación con aquella de la solución semianalítica es de 0.96%.

2.6.3 Caso de estudio

A continuación se realiza un análisis de sensibilidad de malla, cambiando el número de elementos en que se ha discretizado el puente. Al mismo tiempo se compara la presente formulación con aquella basada en el concepto de fuerzas de contacto presentada por Yang y Wu en el año 2001 [13].

ISBN: 978-987-1676-63-7

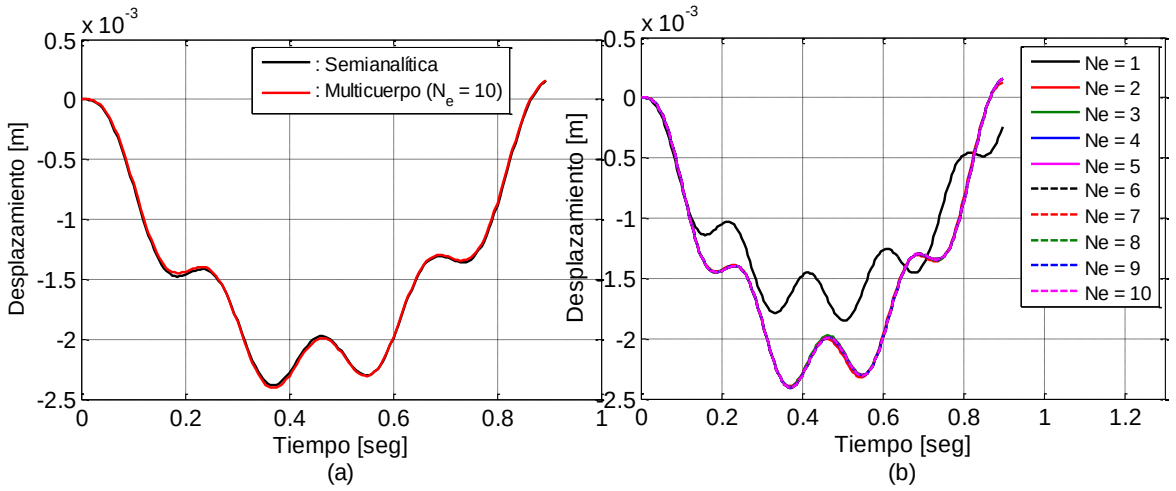


Figura 4: (a) Historial del desplazamiento en la mitad de la luz del puente, (b) Historial del desplazamiento en la mitad de la luz del puente para distinto número de elementos

En la Figura 4b se muestran los resultados obtenidos para el desplazamiento en la mitad de la luz del puente a partir de simulaciones con distinto número de elementos, variando desde 1 elemento hasta 10 elementos. Como se puede observar, excepto para el caso de un elemento que la curva se separa del resto, a partir de dos elementos las curvas se ajustan con un alto grado de precisión.

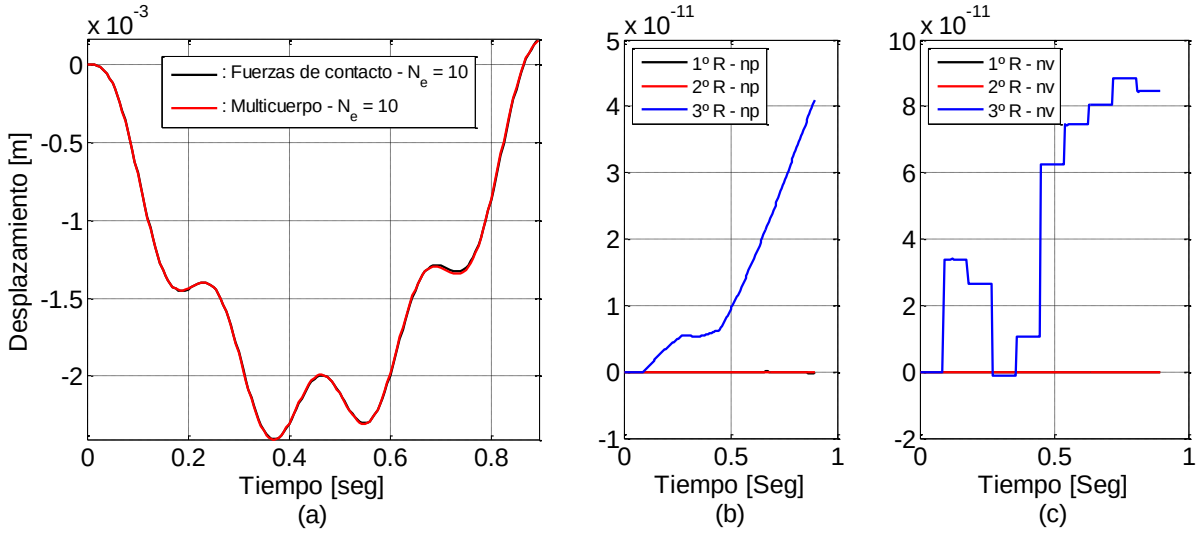


Figura 5: (a) Historial del desplazamiento en la mitad de la luz del puente para ambas formulaciones, (b) desviación numérica a nivel de la posición, y (c) desviación numérica a nivel de la velocidad

Finalmente, se compara la formulación presentada en este trabajo con la metodología propuesta por Yang y Wu [13]. La Figura 5a muestra la deflexión obtenida en la mitad de la luz del puente como una función del tiempo, para ambas formulaciones. Para las simulaciones se utilizaron los

datos presentados en la Subsección 2.6.2 y 10 elementos para discretizar al puente. Como se puede observar, ambas curvas se ajustan perfectamente, indicando que la formulación aquí presentada puede ser utilizada con seguridad en problemas que involucren la interacción dinámica vehículo puente. Como se puede observar en las Figuras 5b y 5c, la desviación numérica exhibida en las ecuaciones de restricción son mínimas, tanto a nivel de la posición como a nivel de la velocidad, asegurándola robustez de la formulación desarrollada y su implementación numérica.

4. Conclusiones y trabajos futuros

En el presente trabajo se desarrolló, mediante la utilización de una formulación energética basada en las ecuaciones de Lagrange con restricciones, el sistema de ecuaciones que gobiernan la interacción dinámica entre un puente y el tren que sobre el transita. El cuerpo flexible que modela el puente se discretizó espacialmente mediante elementos finitos. Las ecuaciones de restricción se escribieron a nivel local del elemento, lo que dio origen a una matriz Jacobiana de restricción cuyos elementos distintos de cero se redistribuyen dentro de la matriz a medida que el vehículo transita por el puente.

Las ecuaciones obtenidas fueron integradas numéricamente, simultáneamente e interactivamente en el dominio del tiempo. El esquema de integración numérica adoptado fue el de Runge-Kutta, en particular se utilizó el integrador ode45 disponible en MATLAB®.

La formulación fue validada comparando los resultados obtenidos, para un caso particular, con una solución semianalítica disponible en la bibliografía. Adicionalmente se efectuó un análisis de sensibilidad de malla para asegurar la convergencia y finalmente se comparó la formulación presentada con la propuesta por otros autores, obteniendo excelentes resultados.

La robustez y generalidad de la formulación permiten agregar cuerpos al sistema de una manera simple y en este sentido es que a partir de este modelo sencillo se pretende seguir avanzando en el desarrollo de modelos de complejidad creciente que permitan mejorar el grado de detalle con el que se representa a cada uno de los componentes que constituyen el sistema vehículo-puente.

5. REFERENCIAS

[1] Timoshenko, S. P. *On the forced vibration of bridges*. Phil. Magazine, Ser. 6, 43, 1018-1019, 1922.

[2] Inglis, C. E. *A Mathematical Treatise on Vibration in Railway Bridges*. The University Press, Cambridge, England, 1934.

[3] Timoshenko, S. P. y Young, D. H. *Vibration Problems in Engineering, 3rd edn.,* D. Van Nostrand, New York, N. Y., 1955.

[4] Biggs, J. M. *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill, New York, N.Y., 1964.

[5] Frýba, L. *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. Noordhoff International Publishing, Groningen, The Netherlands, 1972.

[6] Frýba, L. *Vibration of Railway Bridges*. Thomas Telford, London, England, 1996.

[7] Grag, V. K. y Dukkipati, R. V. *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. Academic Press, New York, N. Y., 1984.

[8] Yang, F. y Fonder, G. A. *An iterative solution method for dynamic response of bride.vehicle systems*. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 25, 195-215, 1996.

[9] Feriani, A. y Mulas, M. G. *Iterative Solution Methods for Coupled Vehicle-Structure Systems*. XIX *Congreso* AIMETA, 14-17 Septiembre 2009, Ancona, Italia.

[10] Feriani, A. y otros. *Iterative procedures for the uncoupled analysis of vehicle-bridge dynamic interaction*. Proceedings of ISMA2010 including USD2010, 2010.

[11] Yang, Y. B. y Lin, B. H. *Vehicle-bridge interaction analysis by dynamic condesation method*. J. Struct. Eng., ASCE, 121, 11, 1636-1643, 1995.

[12] Yang, Y. B. y Yau, J. B. *Vehicle-bridge interaction element for dynamic analysis*. J. Struct. Eng., ASCE, 123, 11, 1512-1518 (Errata: 124, 4, 479), 1997.

[13] Yang, Y. B. y Wu, Y. S. *A versatile element for analyzing vehicle-bridge interaction response*. Eng. Struct, 23, 452-469, 2001.

[14] Cai, Y. y otros. *Vehicle / guideway interaction for high speed vehicles on a flexible guideway*. J. Sound & Vibr., 175, 5, 625-646, 1994.

[15] Green, M. F. y Cebon, D. *Dynamic response of highway bridges to heavy vehicle load: Theory and experimental validation*. J. Sound & Vibr., 170, 1, 51-78, 1994.

[16] Shabana, A. A. *Dynamics of multibody sistems*. Cambridge, New York, 2013.

[17] Yang, Y. B., Yau, J. D. y Wu, Y. S. *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.

[18] Seon, M. H., Haym, B. y Timothy, W. *Dynamics of transversely vibrating beams using four* engineering *theories*. J. Sound & Vibr., 225, 5, 935-988, 1999.

[19] Baumgarte, J. *Stabilization of constraints and integral of motion in dynamical systems*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1, 1-16, 1972.

[20] Roccia, B. A. *Desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del vuelo de micro vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología*. Tesis doctoral, FCEFyN, UNC, 2013.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL 2D DEL FLUJO SANGUINEO TURBULENTO A TRAVÉS DE VÁLVULAS CARDÍACAS BI-VALVAS

Gorosito, Alejandro y Di Paolo, José

Grupo Biomecánica Computacional - Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Entre Ríos
Ruta 11, km 10, 3100 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina
correo-e: argorosito@bioingeniería.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta la simulación computacional en una geometría simplificada a 2D, del flujo sanguíneo (CFD del inglés) a través de una válvula cardíaca artificial bi-valva cuando presenta diversas anomalías. Estas anomalías pueden causar complicaciones graves para la salud que pueden ser potencialmente mortales. El análisis se realizó variando asimétricamente los ángulos de apertura de las valvas, que influyen promoviendo daño sanguíneo al afectar la distribución de la velocidad con formación de vórtices aguas abajo de la válvula. Asimismo, se ha estudiado la posible cavitación en dicha zona.

El análisis de apertura asimétrica o anómala, se ha hecho en comparación con simulaciones de la misma válvula funcionado bien, considerando al flujo sanguíneo como flujo turbulento en condiciones estacionarias. Tanto la geometría, como el mallado y la simulación del flujo de sangre se realizaron utilizando Comsol Multiphisics 4.4.

Los resultados de las simulaciones se validaron con los obtenidos por diversos autores, donde algunos de ellos trabajaron con métodos numéricos alternativos (método de partículas hidrodinámicamente suavizadas, SPH) al de elementos finitos aquí utilizado.

Se evidencia que la distribución de flujo de sangre es muy sensible al funcionamiento anómalo de una válvula artificial, provocando una caída de presión sobreelevada para el mismo caudal circulante. Más aún, el patrón de flujo aguas abajo de la válvula presenta grandes vórtices que pueden promover la formación de trombos y depresiones importantes que pueden derivar en cavitación localizada.

***Palabras claves**: CFD, flujo sanguíneo, flujo turbulento, válvula cardíaca artificial*

1- INTRODUCCIÓN

Cada año, se reemplazan alrededor de 250.000 válvulas del corazón siendo 2/3 de estos reemplazos prótesis mecánicas conocidas como válvulas bi-valvas (válvulas bileaflet), debido principalmente a su mayor durabilidad y confiabilidad. Aunque son muy eficientes, estas válvulas pueden estar sujetas a fallos de funcionamiento de sus valvas (compuertas). Su mal funcionamiento puede dar origen al crecimiento interno de pannus (trombosis valvular obstructiva) y/o la formación de trombos representando complicaciones graves para la salud y potencialmente mortales. Por lo tanto, es importante investigar el campo de flujo aguas abajo de una válvula mecánica de corazón disfuncional para comprender mejor su impacto en los componentes sanguíneos (glóbulos rojos, plaquetas y factores de coagulación) y para mejorar las técnicas del diagnóstico actual.

En este trabajo se presenta la simulación computacional en una geometría simplificada a 2D, del flujo sanguíneo (CFD del inglés) a través de una válvula cardíaca artificial bivalva cuando presenta diversas anomalías. El análisis se realizó variando asimétricamente los ángulos de apertura de las valvas, que influyen promoviendo daño sanguíneo al afectar la distribución de la velocidad con formación de vórtices aguas abajo de la válvula. Estos vórtices se forman a partir de que en su centro hay una presión muy baja respecto a los alrededores, dando lugar a la rotación del flujo, que de acuerdo a la magnitud de dichas rotaciones pueden causar hemólisis en la sangre, entre otros daños. Asimismo, al haber vórtices puede que la presión reinante en su centro, sea igual o menor a la presión de vapor de la sangre, lo que producirá cavitación en dicha zona, esta posibilidad también se tuvo en cuenta en el presente estudio.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio de la simulación se utilizó una válvula mecánica de dos discos o valvas cuyas dimensiones son: diámetro externo de sutura del anillo: 28 mm; diámetro de la brida: 19 mm; espesor de los discos: 0,5 mm. La sección de corte y las dimensiones se muestran en la Figura 1.

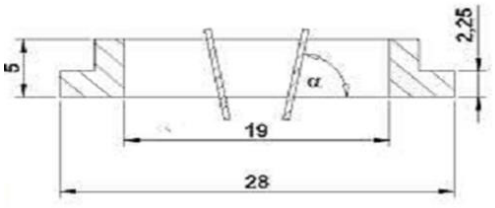


Figura 1: Dimensiones geométricas de la válvula mecánica cardíaca simulada.

El flujo sanguíneo se lo supuso incompresible (densidad: $1{,}055 \times 10^3$ kg/m^3), estacionario debido a la baja frecuencia de ocurrencia del hecho, turbulento y Newtoniano (viscosidad dinámica $\upsilon = 3{,}5 \times 10^{-3}$ kg/m s, esto es tres veces y media la del agua). Para este estudio no se tuvo en cuenta

la elasticidad de la pared del vaso y se consideraron rígidas tanto a las paredes de la aorta como de la válvula. La simulación se llevó a cabo a través un modelo de flujo turbulento k-ε.

Los parámetros del flujo fueron: flujo sanguíneo intenso de 25 l/min que corresponde al flujo fisiológico máximo que atraviesa la aorta humana. La velocidad del flujo sanguíneo a la entrada de la válvula se consideró constante y de 1,6 m/s, mientras el número de Reynolds resultó $1{,}2x10^4$ [1].

El estudio se realizó considerando tres posiciones de valvas. Una posición corresponde al 0% de disfuncionalidad, ambas valvas abren casi en forma paralela; otra posición es 50% de disfuncionalidad, una de las valvas no abre bien quedando con un ángulo de 35° respecto a la horizontal; y una tercera posición es 100% disfuncional con una valva cerrada, se muestran las variantes en la Figura 2 [3].

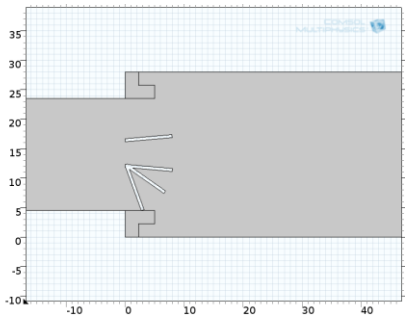


Figura 2: Se muestran distintas posiciones de la valva inferior.

El modelo computacional utiliza una malla que se puede ver en la Figura 3 y en la Figura 4 ampliada cerca de las valvas, es de grado fino con 85690 grados de libertad, y se resuelve con 65 iteraciones con el software licenciado COMSOL M. 4.4. Las dimensiones en los ejes cartesianos ortogonales están en milímetros identificando eje x en abscisas y, eje “y” en ordenadas.

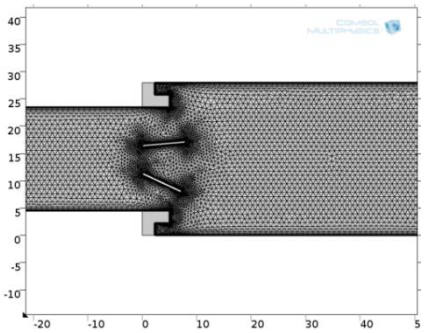


Figura 3: Malla de grado fino utilizada en las simulaciones

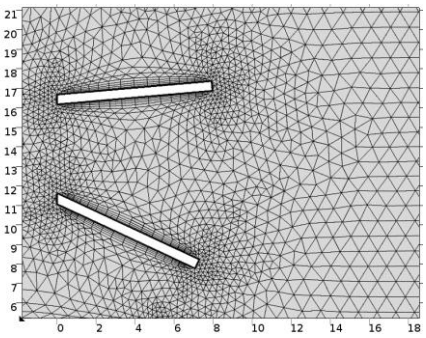
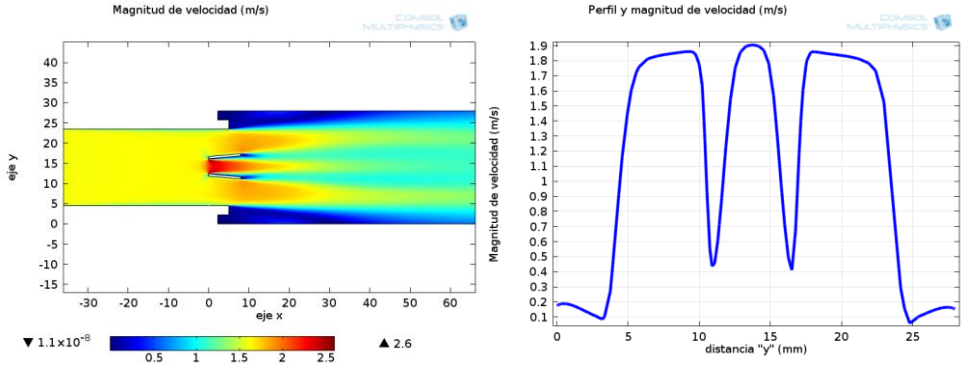


Figura 4: Detalle de la malla en los elementos cerca de las valvas

ISBN: 978-987-1676-63-7

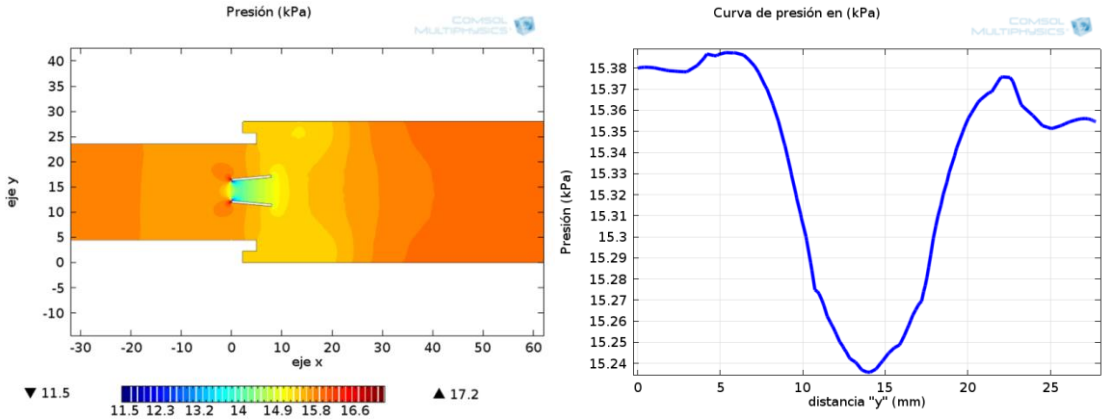
3- RESULTADOS

Primeramente y a modo de referencia, se analizan los resultados obtenidos para una válvula funcionando bien, ***0% de disfuncionalidad***, indicando perfil y magnitud de la velocidad del flujo sanguíneo, la caída de presión, la magnitud de la vorticidad y el campo de vorticidad a 10 mm de las valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas.



a) b)

Figura 5: a) Distribución del flujo en una válvula funcionando bien y b) perfil y magnitud de la velocidad en m/s a 10 mm de las valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas.



a) b)

Figura 6: a) Distribución de la presión en kPa y b) perfil y magnitud de la presión en kPa a 10 mm de valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas.

Se observa en la Figura 5-a) que la distribución del flujo sanguíneo es simétrica a la salida de la válvula dividiéndose en tres flujos debido a la presencia de las valvas interpuestas en su camino. Para esta configuración la velocidad máxima a la salida de la válvula llega a ser de 1,9 m/s. En cuanto a las caídas de presión antes, durante y después de atravesar la válvula, el flujo experimenta una caída de presión al momento de atravesar las valvas tal como era de esperar, ya que en esa región aumenta la velocidad debido al estrangulamiento en la sección de paso del flujo. Ello se muestra la Figura 6-a). En la Figura 6-b) se muestra la curva de presión a la salida de valvas. Para una distancia de 15 mm medida sobre el eje “y” que corresponde con el centro

ISBN: 978-987-1676-63-7

del espacio entre valvas, se encuentra el mínimo de presión y el valor máximo de velocidad [2, 3, 4].

En la Figura 7 se amplía la zona alrededor de las valvas indicando que en los extremos de las mismas, se produce una estela en la que se desvían los vectores de velocidad de su camino hacia adelante, indicando algún grado de rotación en ese lugar. El fenómeno también se observa en cercanías de las paredes de la válvula, lo que permite inferir la posible formación de vórtices.

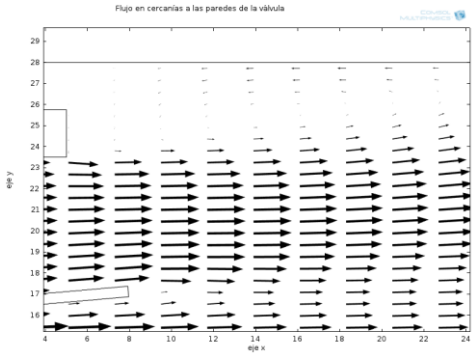
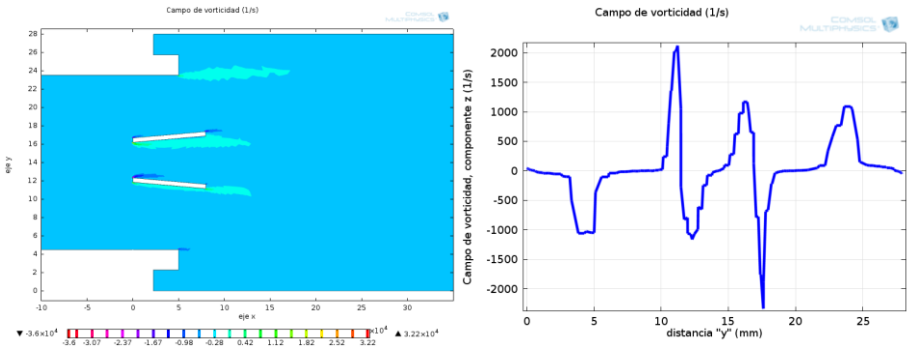


Figura 7: Detalle de la representación vectorial del flujo sanguíneo alrededor de las valvas. Hay coincidencia con [4]

La magnitud de la vorticidad se muestra en la Figura 8 donde se aprecia que hay estelas en las zonas aledañas a ambas valvas y en los vértices agudos de las paredes de la válvula.



a) b)

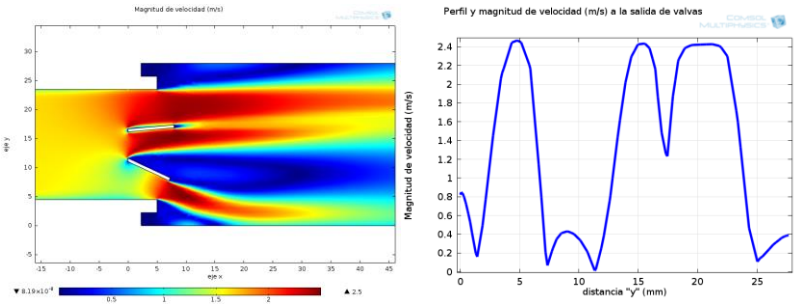
Figura 8: a) Magnitud de la vorticidad en los alrededores de las valvas y b) campo de vorticidad con valores positivos y negativos a 10 mm de valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas.

Comparando la gráfica de velocidad y de vorticidad, se observa que donde existen valles en los valores de velocidad, a 12 y 17 mm en la dirección en “y”, la magnitud de la vorticidad es la mayor, siendo positiva para 12 mm y negativa para 17 mm, indicando la condición de rotacional que posee el flujo en esa zona. El perfil resultante de vorticidad se presenta prácticamente

ISBN: 978-987-1676-63-7

simétrico respecto a 0 a lo largo de la coordenada “y” debido a la correcta apertura de ambas valvas.

En el caso de un ***50 % de disfuncionalidad***, el flujo se vuelve asimétrico entre los canales de las valvas y de los tres chorros en que se divide el flujo, dos poseen velocidades cercanas a 2,5 m/s a la salida de valvas, Figura 9-a y 9-b. Se presentan tres puntos donde el flujo adquiere alta velocidad, siendo la mayor velocidad la que aparece en el canal formado entre la valva inferior y las paredes de la válvula, este flujo recibe la denominación de *clearance flow* [5, 6, 7, 8].



a) b)

Figura 9: a) Distribución del flujo sanguíneo en la válvula con 50% difuncionalidad y b) perfil y magnitud de la velocidad a 10 mm aguas abajo de valvas medidos a partir del origen de valvas.

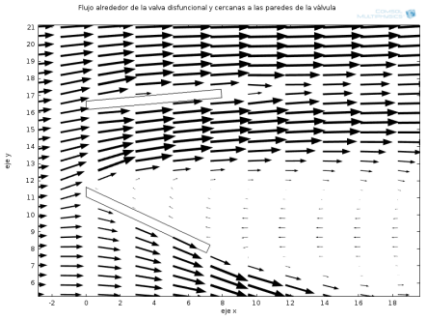
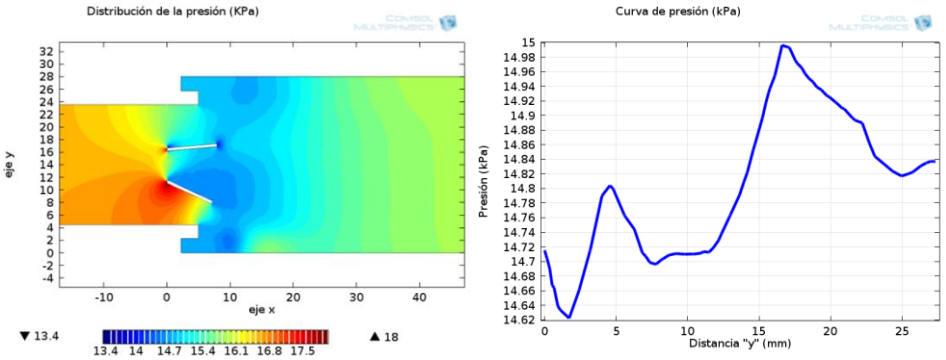


Figura 10: Detalle de la rotación del flujo alrededor de la valva con disfunción del 50%.

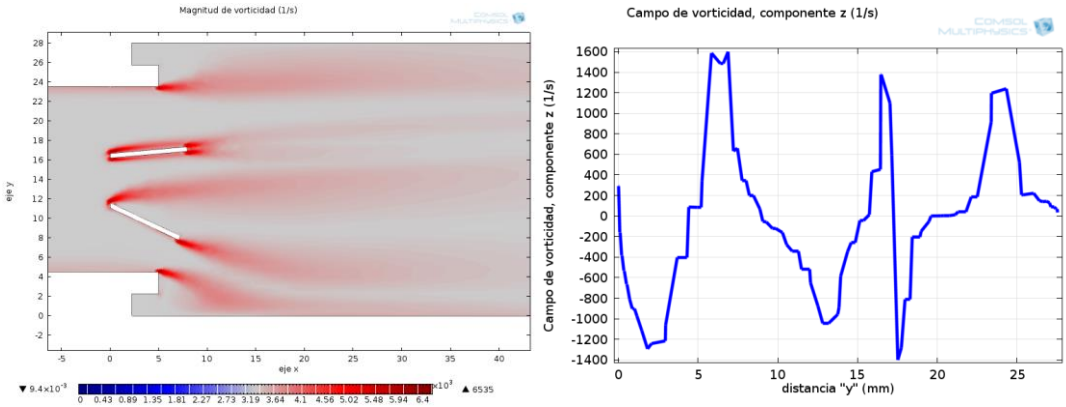
La Figura 10 muestra cómo se acrecientan los inconvenientes con la rotación del flujo sanguíneo alrededor de la valva defectuosa, aumentado los riesgos de daños en la sangre debido a la presencia de alta vorticidad y posible cavitación lo que atacaría a la superficie de las valvas. Ello se ve agravado por la caída de presión ahora más pronunciada, no solo entre valvas, sino también en zonas aledañas aguas abajo de las valvas (ver Figuras 11-a y 11-b).

ISBN: 978-987-1676-63-7



a) b)

Figura 11: a) Distribución de la presión en kPa donde se observan caídas importantes antes y después de las valvas y, b) caída de presión en kPa a lo largo del eje “y” a 10 mm aguas abajo de valvas medidos a partir del origen de valvas.



a) b)

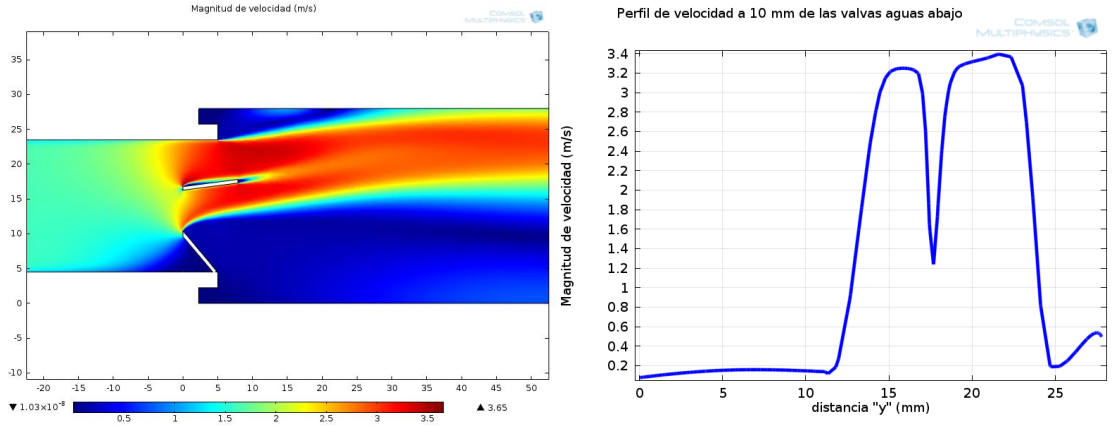
Figura 12: a) Magnitud de la vorticidad para una válvula con disfunción del 50% y b) campo de vorticidad después de valvas, a 10 mm aguas abajo de valvas medidos a partir del origen de valvas, aparecen valores negativos y positivos, lo que significa que cuando el campo toma valores positivos la rotación de los vórtices es en sentido horario mientras que para valores negativos las rotaciones son en sentido antihorarias. Coincide con [4].

Analizando la información sobre el campo de vorticidad en esta configuración, el mismo presenta una cierta regularidad alrededor de la posición neutra marcada con 0 en la gráfica 12-b, por ejemplo, a 2,5 mm en “y” existe vorticidad negativa que corresponde al extremo agudo inferior de la pared de la válvula, coincidiendo con lo mostrado en la figura 12-a, donde hay un color denso en ese lugar. En la misma figura se observan colores densos en los extremos de las valvas correspondiendo a máximos de vorticidad en la figura 12-b. Igualmente ocurre con el vértice agudo superior de la válvula, donde la vorticidad presenta el mismo valor absoluto que en el vértice agudo inferior, pero en este sitio tiene valor positivo. Al haber esta distribución extendida de los valores de vorticidad a lo largo del diámetro de la válvula, se demuestra que en esta

ISBN: 978-987-1676-63-7

configuración, las estrucutras vorticales son importantes, en cuanto a magnitud y sus consecuencias dañosas para el flujo sanguíneo.

En el caso de ***100 % de disfuncionalidad***, una de las valvas permanece cerrada, teniendo el flujo que pasar entre las valvas y por el canal superior formado por la valva sana y la pared superior de la válvula tal como se ve en las Figura 13-a y 13-b.



a) b)

Figura 13: a) Distribución del flujo sanguíneo en la válvula con 100% de difuncionalidad y b) perfil y magnitud de la velocidad en m/s, a 10 mm de valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas.

Obsérvese cómo se ve alterado el perfil del flujo a la salida de las valvas por el cerramiento que le produce la valva defectuosa, causando un aumento importante en la magnitud de la velocidad que llega a ser de 3,4 m/s.

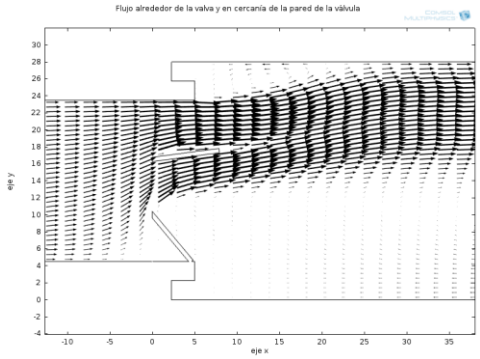
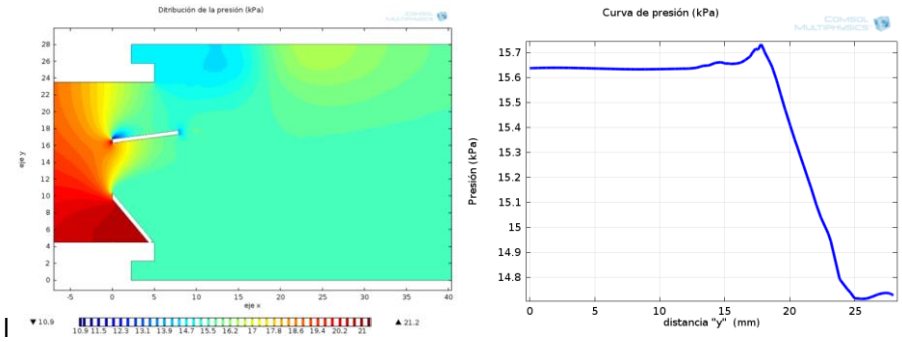


Figura 14: Ampliación de la representación vectorial del flujo alrededor de las valvas.

Esta obstrucción al flujo sanguíneo produce rotaciones del mismo en una amplia zona que abarca aguas arriba de la valva defectuosa hasta casi dos diámetros aguas debajo de la misma. La Figura 14 muestra el fenómeno a través de la representación vectorial de la velocidad, lo que hace suponer la aparición de vórtices provocados por la casi no existencia de un flujo neto de sangre en la zona contigua a la valva cerrada.

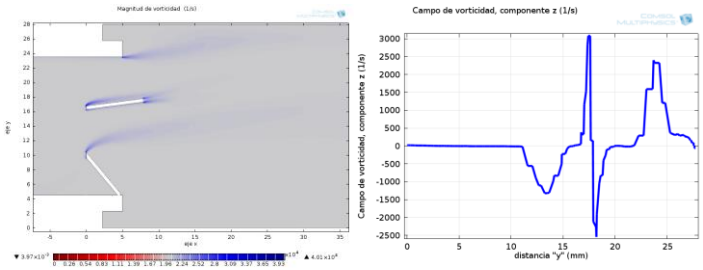
ISBN: 978-987-1676-63-7

Se observa en las Figuras 15-a y 15-b, una gran caída de presión que se extiende desde la entrada a la zona de las valvas hasta dos diámetros aguas abajo de la válvula.



a) b)

Figura 15: a) Caídas de presión en kPa a través de la válvula y, b) perfil y magnitud de la presión a 10 mm de valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas



a) b)

Figura 16: a) Magnitud de la vorticidad para una disfuncionalidad del 100% y b) distribución a lo largo de la coordenada “y” de la vorticidad, presentando valores positivos y negativos a 10 mm de valvas aguas abajo medidos a partir del origen de valvas.

Como consecuencia de las caídas de presión y el aumento de la velocidad, el flujo sanguíneo sufre cambios en su dirección, dando lugar a la formación de estructuras vorticales importantes, lo que puede verse en la figura 16-a con la magnitud del campo de vorticidad y en la figura 16-b a través del perfil de vorticidad que se muestra muy asimétrico, con valores positivos y negativos sobre la valva superior, adquiriendo valores máximos en los extremos de esta la valva que llegan a ser de 3000 (1/s). Esta zona presenta un flujo rotacional intenso con posible formación de microburbujas debido a la cavitación [5, 9, 10], que dan inicio al fenómeno de “pitting” (picado) sobre las valvas.

4- CONCLUSIONES

A partir de la simulación del flujo sanguíneo como flujo turbulento, se han representado las anomalías en la distribución de dicho flujo, tanto aguas arriba como aguas abajo de un modelo de válvula cardíaca bi-valva, cuando una de las valvas no abre correctamente. Esto produce un aumento de la velocidad del flujo en forma asimétrica y simultáneamente las caídas de presión

en la válvula, producen formación de vórtices de gran escala posibilitando que, en puntos localizados sobre la superficie de las valvas o sobre las paredes de la válvula, aparezcan desgastes típicos identificados como picaduras debido a la evaporación y rompimiento posterior de microburbujas. Además, al verificarse elevada vorticidad en el flujo, se pueden producir daños en los componentes de la sangre, separando los mismos y formando trombos, que viajarán con el flujo hacia otras partes del cuerpo, con el peligro que al depositarse en determinados puntos de acceso, obstruyan dicha circulación, impidiendo la oxigenación de órganos sensibles importantes para la vida.

Las próximas etapas del presente estudio, considerarán la importancia de la disipación viscosa en la circulación del flujo y su influencia en la caída de presión promovida por las válvulas cardíacas mecánicas bi-valvas, buscando un método general que ayude a evaluar y predecir la respuesta y performance del dispositivo en la aplicación estudiada. Luego, los estudios posteriores se realizarán sobre geometrías 3D de estas válvulas u otros dispositivos, lo que permitirá representaciones reales de los fenómenos en toda su extensión, para predecir la aptitud de un determinado dispositivo en los casos de extrema importancia para la vida humana.

5- REFERENCIAS

[1] Bajgrowicz, M. *CFD simulation of blood flow through artificial heart valves*, XIIIth Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, June 29th – July 2nd, Czech Republic, 2014.

[2] Shahriari, S. et al. *Evaluation of shear stress accumulation on blood components in normal and dysfunctional bileaflet mechanical heart valves using smoothed particle hydrodynamics,* Journal of Biomechanics 45, 2637–2644, 2012.

[3] Smadi, O. et al. *Numerical and experimental investigations of pulsatile blood flow pattern through a dysfunctional mechanical heart valve,* Journal of Biomechanics 43, 1565–1572, 2010.

[4] Bluestein, D. et al. *Vortex Shedding as a Mechanism for Free Emboli Formation in Mechanical Heart Valves*, Journal of Biomechanical Engineering 122, 125-134, 2000.

[5] Avrahami, I. et al. Can vortices in the flow across mechanical heart valves contribute to cavitation? Med. Biol. Eng. Comput., 2000, 38, 93-97.

[6] Johansen, Peter. Mechanical heart valve cavitation, Expert Rev. Medical Devices 1(1), 95-104 (2004).

[7] Lee, C. S. and Chandran,K. B. (1994): 'Instantaneous back flow through peripheral cleaxaxme of medtronic hall tilting disc valve at the moment of closure', Ann. Biomed. Eng., 22, pp. 371-380

[8] Lee, C. S. and Chandran,K. B. (1995): 'Numerical simulation of instantaneous backflow through central clearance of bileaflet mechanical heart valves at closure: shear stress and pressure fields within clearance', Med. Biol. Eng. Comput., 33, pp. 257-263

[9] Bluestein Danny et al. A squeeze flow phenomenon at the closing of a bileaflet mechanical heart valve prosthesis, J. Biomechanics, Vol. 27, No. 11, pp. 1369-1378, 1994.

[10] Johansen, Peter et al. A new method for evaluation of cavitation near mechanical heart valves, Journal Biomechanics Engineering, October 2003, Vol 125.

Agradecimientos

Se agradece al Grupo Biomecánica Computacional de la FI-UNER el espacio y los recursos que a través del PID 6123 se han dispuesto por parte de la UNER para la realización de este trabajo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDO COMPARATIVO DA PERFORMANCE DE MODELOS DE TURBULÊNCIA RANS DE DUAS EQUAÇÕES NAS PREDIÇÕES DE ESCOAMENTO COM REGIÕES DE SEPARAÇÃO E RECOLAMENTO

Bianca H. Souza[1], Ellen C. Valentim[2] Maria L. Cunha[3] y Reginaldo R. C. de Paula[3]

[1] Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, S/N, Goiabeiras, Vitória, E.S., Brasil
[2] Arcelor Mittal Tubarão, Serra, E.S.
[3] Coordenadoria de Física, Instituto Federal do Espírito Santo, Ifes, Vitória, E.S.

correo-e: biancahulles@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo compartivo da perfomance de três modelos de turbulência de duas equações nas predições numéricas do escoamento ao redor de um prédio industrial isolado com telhado do tipo arco. Este escoamento é caracterizado por zonas de separação e recirculação, gradientes de pressão adversos e diferentes estruturas turbilhonares. As equações médias de Navier-Stokes para um escoamento em regime permanente de um fluido compressível e a modelagem viscosidade turbulenta foram calculadas com o uso dos modelos de turbulencia κ-ε padrão [1], κ-ε RNG [2] e κ -ω [3] do pacote comercial ANSYS CFX 15.5. Os resultados das predições numéricas do campo médio de velocidade foram comparadas com dados experimentais de simulações físicas performadas em um túnel de vento de camada limite atmosférica. Foi observado que o modelo κ-ε RNG apresentou uma melhor performance em relação aos outros modelos nas predições da região de separação no telhado. O modelo κ -ω apresentou resultados razoáveis na captura deste mecanismo e modelo κ-ε padrão falhou nas predições numéricas deste fenómeno.

Palavras chaves: *Modelos de turbulência, separação do escoamento, recirculação do escoamento, dinâmica dos fluidos computacional*

ISBN: 978-987-1676-63-7

1. INTRODUÇÃO

Nos estudos da dinâmica dos fluidos computacional (DFC) encontram-se vários modelos de turbulência RANS (por *Reynolds-averaged Navier-Stokes*) de fechamento de primeira ordem que visam estabelecer relações diretas do tensor de Reynolds com o campo de velocidade média. Dentro dessa classe destacam-se os modelos à duas equações, nas quais os modelos κ-ε e κ-ω, são provavelmente os mais populares [4]. Estes consideram a hipótese de difusão gradiente relacionada com os tensores de Reynolds para os gradientes de velocidade média e viscosidade turbulenta.

Modelos de turbulência à duas equações são muito utilizados, pois apresentam uma boa relação entre o esforço numérico e exatidão computacional. Além disso, apresentam boa performance em várias aplicações práticas nas áreas de engenharia mecânica, civil e ambiental que envolvem escoamentos turbulentos complexos. Por exemplo, um prédio isolado na camada limite atmosférica (CLA) influencia significativamente o escoamento externo incidente, até para o caso de simples geometria tem-se a geração de um escoamento complexo. A formação de zonas de separação, recirculação, gradientes de pressão adversos bem como, possível recolamento no telhado e nas paredes laterais são induzidos pela presença de um obstáculo isolado imerso na CLA. Além de diferentes estruturas turbilhonares, tais como os vórtices *shedding*, cuja excitação pode causar vários problemas de vibração de estruturas [5].

A escolha do modelo de turbulência é de fundamental importância em problemas de engenharia do vento. O uso do modelo de turbulência κ-ε padrão nas investigações do campo de escoamento turbulento ao redor de obstáculos isolados tem sido considerado por vários autores [6,7]. Mas este modelo apresenta algumas deficiências bem conhecidas, que inclui escoamento com separação e gradientes de pressão adverso e consequente superpredição de zonas de sucção em extremidades de obstáculos [8].

O modelo κ-ε RNG foi desenvolvido por [2] é derivado de uma técnica estatística rigorosa, denominada de “teoria do grupo de renormalização” (RNG por Renormalization Group Theory). É muito semelhante ao modelo κ-ε padrão, porém, inclui alguns refinamentos. As equações de transporte para a geração da energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação são essencialmente as mesmas do κ-ε padrão [8]. Entretanto, as constantes do modelo RNG foram obtidas teoricamente e não empiricamente como no modelo κ-ε padrão.

O modelo κ-ω [3] é um modelo empírico com base no transporte da vorticidade a qual também pode ser considerada como taxa de dissipação específica, ou razão de ε por κ. Este modelo apresenta predições mais exatas da separação do escoamento em condições de gradientes adversos de pressão [10]. Entretanto, outros erros podem surgir nas simulações numéricas do escoamento ao

ISBN: 978-987-1676-63-7

redor de obstáculos, tais como o tamanho do domínio computacional, refinamento da malha, esquema de truncamento e algoritmo de interação numérica [9].

Neste contexto, o presente trabalho realizou um estudo comparativo da performance computacional de três modelos de turbulência de duas equações nas predições numéricas do escoamento turbulento nas proximidades de um prédio industrial isolado com telhado do tipo arco. Este estudo utilizou o pacote comercial ANSYS CFX 15.5 nas investigações do campo de escoamento.

2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações governantes utilizadas neste trabalho para solucionar o campo de escoamento tridimensional (3-D) foram às equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS) para a conservação de massa (Equação 1) e quantidade de movimento (Equação 2). Considerou-se um escoamento em regime permanente incompressível de um fluido newtoniano com viscosidade constante na ausência da força do campo gravitacional:

$$\frac{\partial \mathrm{u_i}}{\partial \mathrm{x_i}} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \overline{\mathrm{u_j}} \frac{\partial \overline{\mathrm{u_j}}}{\partial \mathrm{x_i}} = -\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x_i}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x_i}} \left[\mu_{\mathrm{ef}} \left(\frac{\partial \overline{\mathrm{u_i}}}{\partial \mathrm{x_j}} + \frac{\partial \overline{\mathrm{u_j}}}{\partial \mathrm{x_i}} \right) \right] \tag{2}$$

onde ρ é a massa específica do fluido, $\overline{\mathrm{u_i}}$ é a velocidade média na direção x_i $(i = 1, 2, 3)$, μ_{eff} é a viscosidade efetiva, P é a pressão modificada. A viscosidade efetiva é dada por:

$$\mu_{ef} = \mu_l + \mu_t \tag{3}$$

2.1.1 Modelo de turbulência κ-ε Padrão

O modelo de turbulência κ-ε padrão [1] é um modelo semi-empírico que tem como base duas equações de transporte para a energia cinética turbulenta, κ, e para sua taxa de dissipação, ε. A viscosidade turbulenta no modelo κ-ε Padrão dada pela (Equação 4) é modelada na seguinte forma:

$$\mu_{\mathrm{T}} = \mathrm{C_\mu} \rho \frac{\kappa}{\varepsilon} \tag{4}$$

onde C_μ = 0,09 é uma constante e κ é a energia cinética turbulenta e ε a sua taxa de dissipação. As duas equações de transporte adicionais para κ e ε em regime permanente, são dadas respectivamente por:

$$\rho\frac{\partial(\bar{u}_j\kappa)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right]+P_\kappa+P_{\kappa b}-\rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\rho\frac{\partial(\bar{u}_j\varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{\varepsilon}{\kappa}[C_{1\varepsilon}(P_\kappa-P_{\varepsilon b})-c_{2\varepsilon}\rho\varepsilon] \tag{6}$$

onde P_κ é a produção da energia cinética turbulenta devido as forças viscosas e $P_{\kappa b}$ e $P_{\varepsilon b}$ representam as influências das forças de empuxo, que não serão consideradas no presente trabalho. As constantes empíricas do modelo foram calibradas entre resultados numéricos e experimentais, são:

$$c_{1\varepsilon}=1{,}44;\quad c_{2\varepsilon}=1{,}92;\quad \sigma_\kappa=1{,}0\quad \sigma_\varepsilon=1{,}3$$

2.1.2 Modelo de turbulência κ-ε RNG

Modelo desenvolvido por [2] cujas equações de transporte são essencialmente as mesmas do modelo κ-ε padrão, exceto pela constante $C_{\varepsilon 1}$ que se torna uma variável dependente da razão de produção da energia cinética turbulenta pela sua dissipação. Assim,

$$C_{\varepsilon 1RNG}=1{,}42-\frac{\eta[1-(\eta/4{,}38)]}{1+\beta_{RNG}\eta^3} \tag{7}$$

onde

$$\eta=\sqrt{P_\kappa/\rho C_{\mu RNG}\varepsilon} \tag{8}$$

As constantes do modelo RNG foram obtidas teoricamente e não empiricamente como no modelo κ-ε padrão.

$$c_{2\varepsilon RNG}=1{,}68;\qquad \sigma_{\kappa RNG}=0{,}7179\qquad \sigma_{\varepsilon RNG}=0{,}7179$$

2.1.3 Modelo de Turbulência κ ω

O modelo κ-ω [3] é empírico com base no transporte da vorticidade a qual também pode ser considerada como uma taxa de dissipação específica, ou razão de ε por κ. A grande diferença do modelo κ-ω para o modelo κ-ε padrão está na propriedade turbulenta da segunda equação de transporte que é a dissipação específica, dada por:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\kappa\beta'} \tag{9}$$

onde a constante β' = 0,09. Este modelo assume que a viscosidade turbulenta esta relacionada com a energia cinética turbulenta e a frequência da turbulência através de

$$\mu_t = \rho\frac{\kappa}{\omega} \tag{10}$$

A duas equações de transporte do modelo desenvolvido por [3] são:

$$\rho\frac{\partial(\bar{u}_j\kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa}\right)\frac{\partial\kappa}{\partial x_j}\right] + P_\kappa + Y_\kappa \tag{11}$$

$$\rho\frac{\partial(\bar{u}_j\omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] + G_\omega - Y_\omega \tag{12}$$

onde σ_k =2,0 e σ_ω = 2,0 são os números de Prandtl turbulentos para κ e ω.

2.2 Discretização do Domínio Computacional Tridimensional

No presente trabalho a geometria do obstáculo com telhado do tipo arco e o domínio computacional tridimensional (3D) foram gerados no programa Solid Edge ST7. Para a discretização do domínio computacional foi utilizado o programa ANSYS CFX a qual utiliza o Método de Volumes Finitos Baseado em Elementos (EbFVM por *Element-based Finite Volume Method*). Este permite o tratamento de malhas não-estruturadas em coordenadas cartesianas mantendo o caráter conservativo do MFV [13].

Para os três modelos de turbulência utilizados foram utilizados a mesma geometria, as mesmas malhas e as mesmas condições de contorno. A Figura 1 mostra uma vista lateral no plano x-y da malha refina utilizada nas simulações do campo de escoamento ao redor do prédio com telhado do tipo arco.

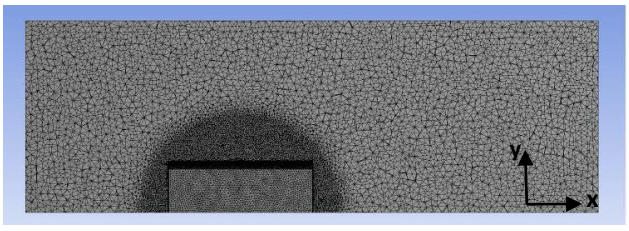


Figura 1: Vista lateral da malha refinada no plano x – y.

A Tabela 1 apresenta as condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas com o uso do pacote comercial da DFC ANSYS CFX 15.5.

Tabela 1 – Condições de contorno utilizadas nas simulações numéricas do escoamento do obstáculo com telhado tipo arco.

Contorno	Condição de Contorno
Entrada Modelo de Turbulência	$u = u_o \left(\frac{z}{z_o}\right)^p$ $k_{ent} = \frac{3}{2} I^2 U^2$ $\varepsilon_{ent} = \rho C_{\mu\left(\frac{\kappa^2}{\mu_t}\right)}$
Saída	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Laterais e topo	Parede livre de deslizamento
Superfícies dos prédios e base do plano	Parede com condição de não deslizamento

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra os resultados das predições numéricas do campo de velocidade dos modelos de turbulência κ-ε padrão, κ-ε RNG e κ-ω no plano x-y. Na região frontal do prédio todos os três modelos de turbulência captaram os vórtices frontais característicos desta região, bem como na região de esteira próxima apresentaram praticamente o mesmo comportamento. Na extremidade frontal do telhado, somente os modelos κ-ε RNG e κ-ω conseguiram capturar uma separação do escoamento e consequente formação de uma zona de recirculação no telhado. Porém, com escalas de comprimento diferentes, na qual o modelo o modelo κ-ε RNG capturou uma maior zona de recirculação em relação ao modelo κ-ω. Este mesmo comportamento foi observado nos experimentos de túnel de vento realizados por [11]. Em relação ao modelo κ-ε padrão esse resultado era esperado, pois este apresenta deficiências em zonas de gradiente de pressão adverso.

A Figura 3 mostra as predições numéricas do campo de velocidade dos modelos de turbulência κ-ε padrão, κ-ε RNG e κ-ω no plano x-z, próximo ao solo (y = 0,01 m). Os resultados dos três modelos foram semelhantes, na qual se podem observar duas zonas de recirculação na região de esteira próxima do obstáculo.

A Figura 4 mostra as predições numéricas da energia cinética turbulenta (ECT). Qualitativamente os maiores valores da ECT para os três modelos ocorreram na extremidade frontal do telhado. Os resultados mostram que os modelos κ-ε padrão e κ-ω apresentaram maiores valores da ECT em relação ao modelo κ-ε RNG. Segundo [12], uma das possíveis deficiências do modelo κ-ε padrão

ISBN: 978-987-1676-63-7

em predizer a recirculação no telhado esta associada a uma superpredição da ECT em regiões de gradiente de pressão adverso.

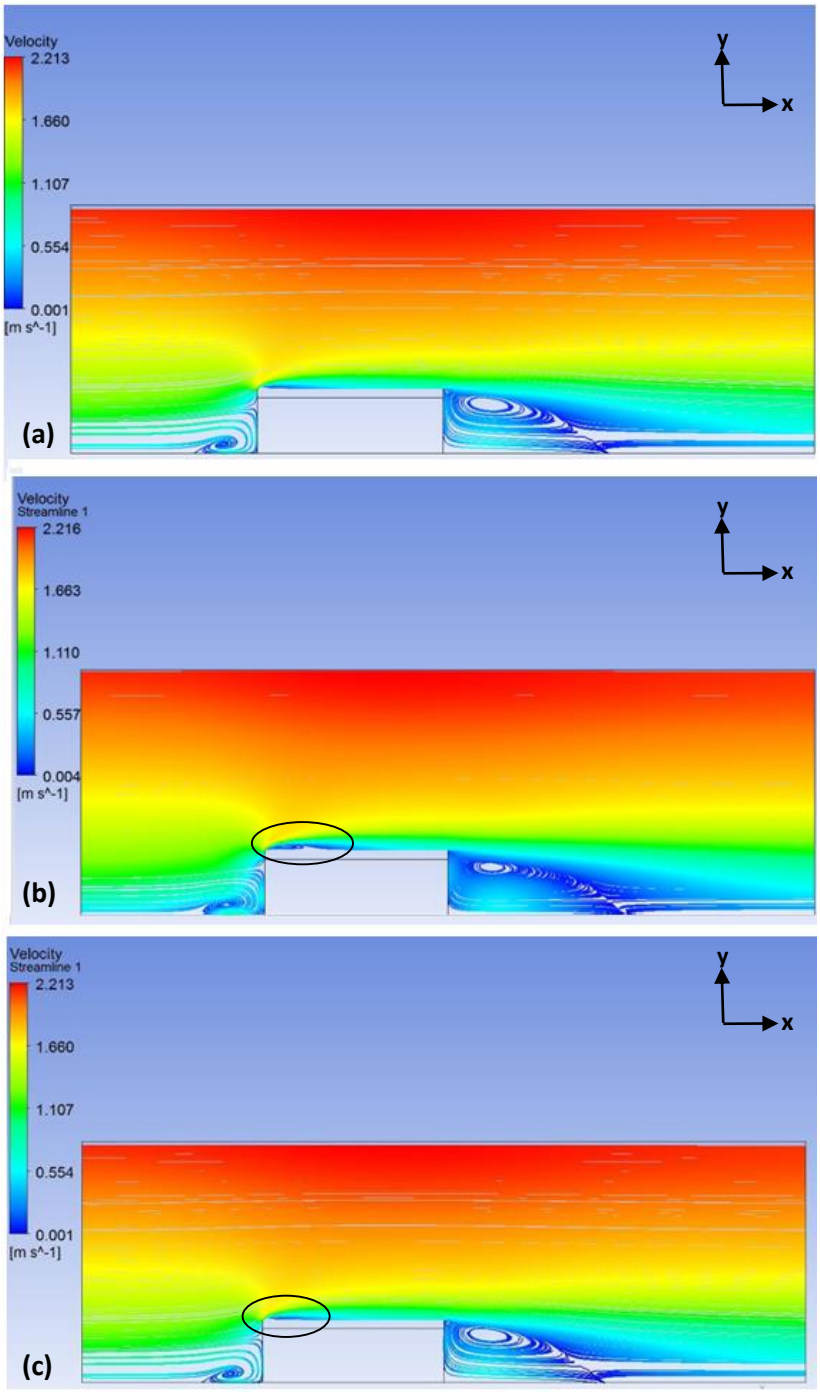


Figura 2: Linhas de corrente do campo de velocidade no plano x – y: (a) modelo κ-ε padrão; (b) κ-ε RNG e (c) κ-ω.

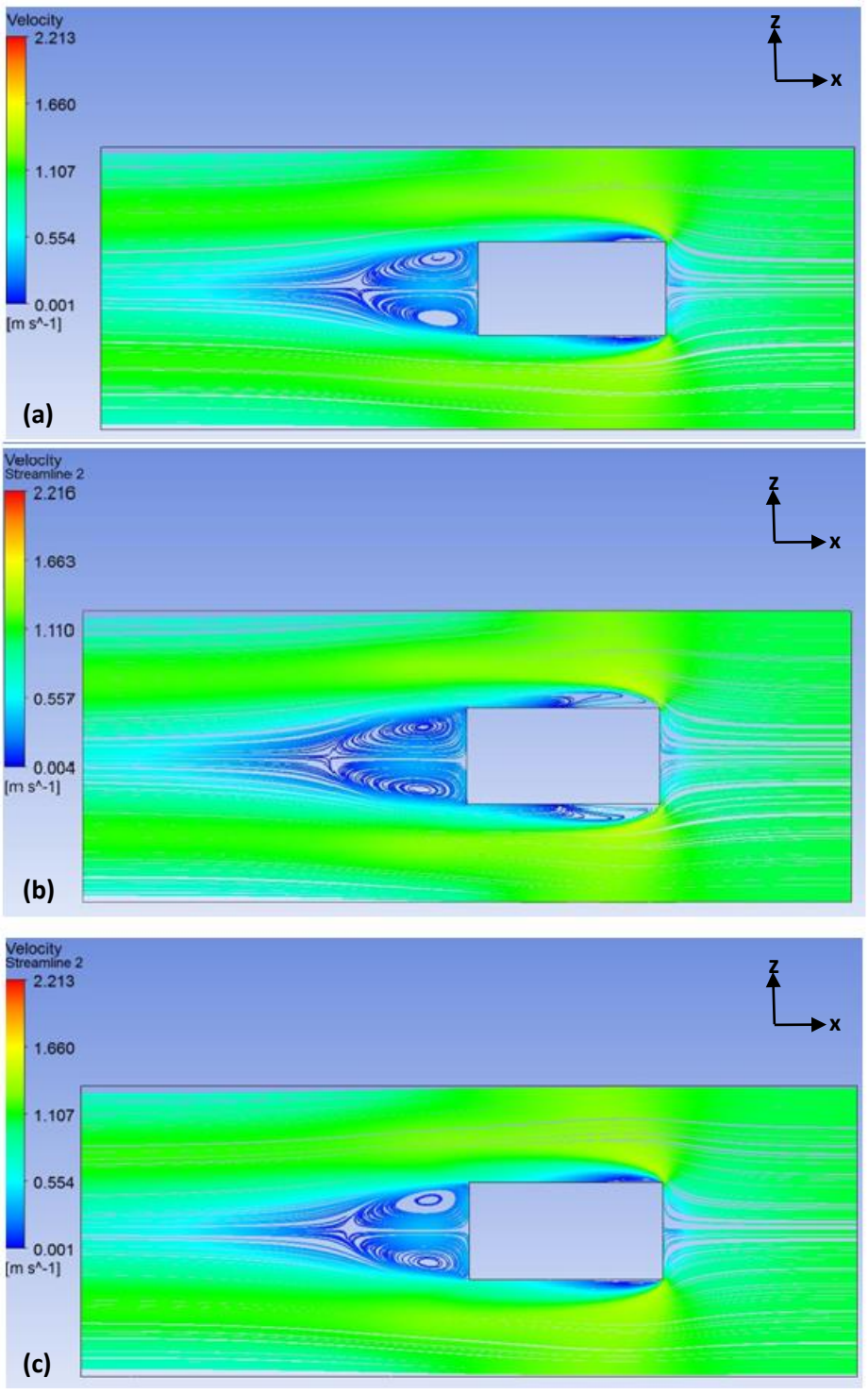


Figura 3: Linhas de corrente do campo de velocidade no plano x – z em y = 0,01 m: (a) modelo κ-ε padrão; (b) κ-ε RNG e (c) κ-ω.

ISBN: 978-987-1676-63-7

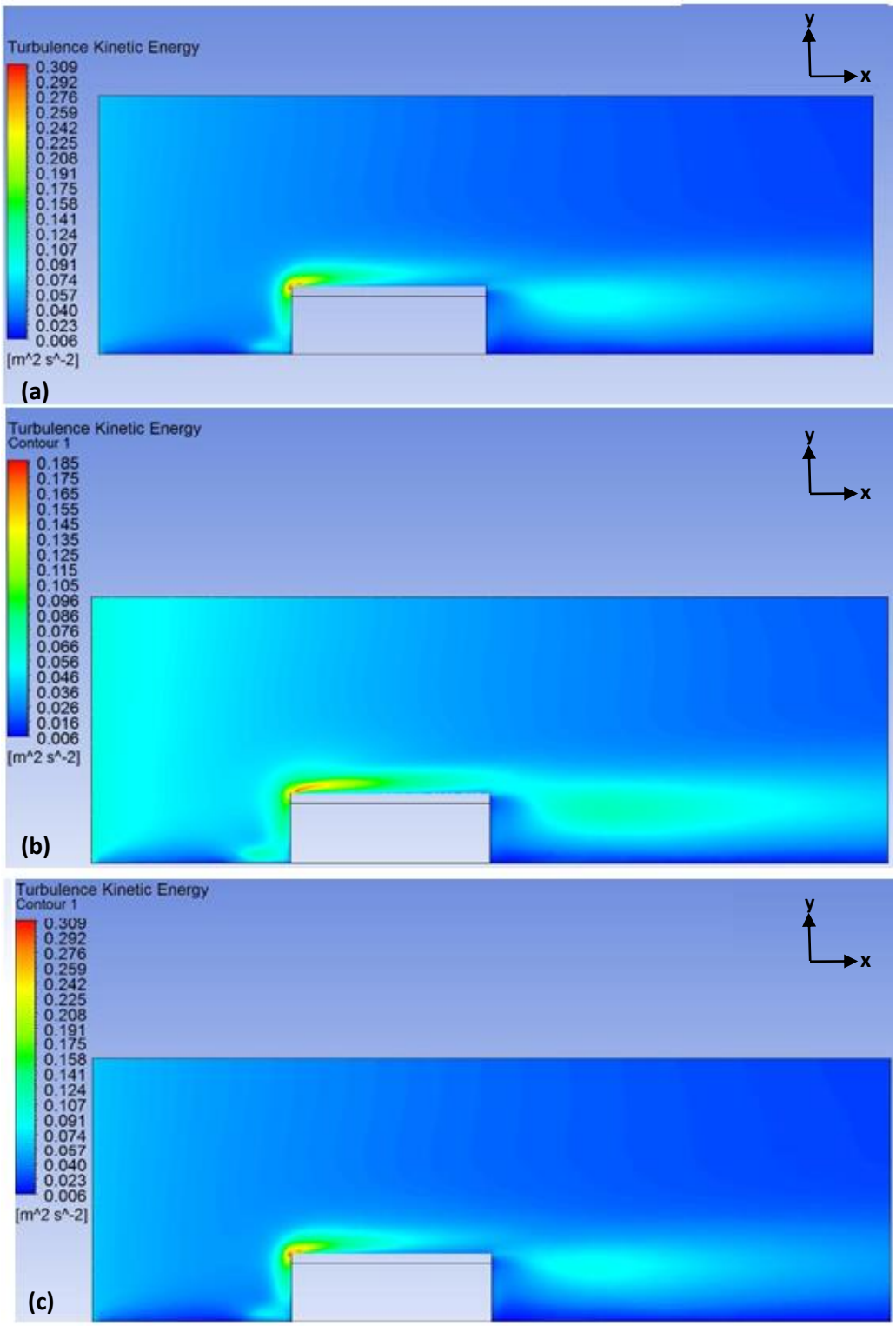


Figura 4: Contorno da energia cinética turbulenta no plano x-y: (a) modelo κ-ε padrão; (b) κ-ε RNG e (c) κ-ω.

ISBN: 978-987-1676-63-7

A Figura 5 mostra os resultados da visualização do campo instantâneo do escoamento nas proximidades do obstáculo obtidos a partir de experimentos de túnel de vento [11]. Na Figura 5(a) pode ser observada a formação dos vórtices frontais. Na Figura 5(b) os resultados mostram a zona de recirculação que se forma no telhado devido a separação da camada limite cisalhante. Na Figura 5(c) na zona de cavidade observa-se a formação dos vórtices *shedding*. Uma comparação com as predições numéricas, os resultados sugerem que o modelo κ-ε RNG apresentou uma melhor performance da recirculação no telhado.

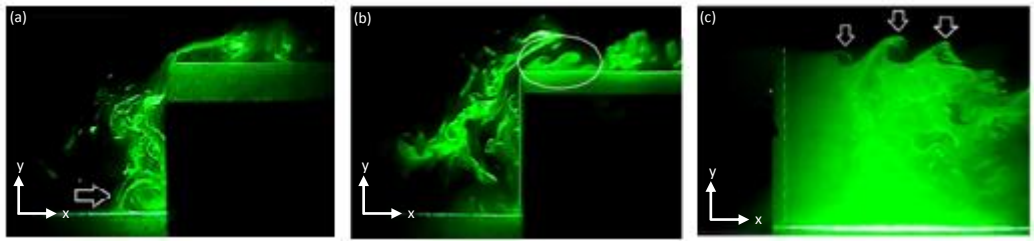


Figura 5: Visualização experimental do campo instantáneo de velocidade na proximidades do prédio isolado: (a) região incidente; (b) recirculação no telhado e (c) zona de cavidade atrás do obstáculo.

.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram realizadas simulações numéricas do escoamento turbulento nas proximidades de um obstáculo isolado com telhado do tipo arco com o uso de três modelos de turbulência a duas equações. Foram utilizados o mesmo domínio computacional 3D e a mesma malha numérica, bem como as mesmas condições de contorno para os três modelos de turbulência. Na região frontal do obstáculo e na região de esteira próxima os três modelos apresentaram comportamento semelhante nas predições numéricas do campo de velocidade. Entretanto o modelo κ-ε padrão não capturou a zona de recirculação que se forma no telhado. Este comportamento pode estar associado aos maiores valores da energia cinética turbulenta apresentados por este modelo em relação ao modelo κ-ε RNG. O modelo κ-ω também apresentou uma zona de recirculação no telhado, porém, com escala de comprimento menor do que a obtida com o modelo κ-ε RNG. Estes resultados sugerem que para capturar a separação do escoamento e a formação de uma zona de recirculação no telhado tem-se uma forte dependência do modelo de turbulência utilizado nas simulações numéricas.

5. REFERENCIAS

[1] Jones, W.P., Launder, B.E., *The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 301-314, 1972

[2] Yakhot, V. Smith, L. M., *The Renormalization Group the epsilon-expansion and Derivation of Turbulence Models*, Journal of Science Computational, Vol.7, p. 35, 1992.

[3] Wilcox, D.C., Rubesin, M.W., *Progress in Turbulence Modeling for Complex Flow Fields Including Effects of Compressibiltiy*, NASA TP-1517, 1998.

[4] Moryossef, Y., Levy Y., *Unconditionally positive implicit procedure for two-equation turbulence models: Application to κ-ω turbulence models*, Journal of Computational Physics, Vol. 220, pp. 88-108, 2006.

[5] Wang, L., Wang, Y., Li, Z., Zhang, Y. *Estimation of the vortex shedding frequency of a 2-D building using correlation and the POD methods*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 98(12), pp. 895-902, 2010.

[6] Tominaga, Y., Stathopoulos, T., *Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of κ-ε models*. Atmospheric Environment, Vol. 43, pp. 3200-3210, 2009.

[7] Gousseau, P., Blocken, B., Heijst, G. J. F. V., *CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: On the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy*". Journal of Hazardous Materials, Vol. 194, pp. 422-434, 2011.

[8] Richards, P.J., Norris, S.E., *Appropiate boundary conditions for computational wind engineering models revisited*, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 99, pp 257-266, 2011.

[9] Yang, W., Quan, Y., Jin, X., Tamura, Y., Gu, M., *Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise buildings*, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, pp 2080-2092, 2008.

[10] Menter, F., *Zonal two equation κ ω− turbulence models for aerodynamic flows*[C]. Orlando,USA, AIAA 93- 2906, 1993.

[11] Paulo, C. T., Matta, D.Z., Paula,R.R.C, Burgo, A., Cezana, F.C., Valentim, E.G., *The Influence of Roof Profiles on Wind Flow: Experimental Studies*. In: VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria, RS. VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2013.

[12] Santos, J. M., 2000. "Flow and Dispersion Around Isolated Buildings". Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Manchester, England.

[13] Maliska, C. R. "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional". Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2ª Edição, 2004.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

EVALUACIÓN DE PUENTES TÉRMICOS EN SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN NO CONVENCIONAL DE EDIFICIOS DEL NEA, MEDIANTE EL SOFTWARE THERM 6.3

Manuel Venhaus Held [1], **Herminia M. Alías** [2] **y Guillermo J. Jacobo** [3]

[1] Becario de Investigación – Secretaría General de Ciencia y Técnica (SGCyT)– Universidad Nacional del Nordeste (UNNE)
Av. Las Heras 727, Resistencia, Chaco, Argentina
correo-e: manu_ven@hotmail.com
[2] Directora de Beca de Pregrado SGCyT - UNNE – Profesora Adjunta Cátedra Estructuras II – Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU) – UNNE
[3] Director de Proyecto de Investigación SGCyT - UNNE – Profesor Titular Cátedra Estructuras II – FAU – UNNE

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto analizar el comportamiento higrotérmico de las envolventes constructivas de edificios en el Nordeste Argentino (NEA) materializados mediante sistemas constructivos que emplean materiales prefabricados elaborados en serie y mano de obra especializada, atendiendo particularmente al impacto de los puentes térmicos, definidos como *"heterogeneidades de un elemento constructivo que forman parte de la envolvente (pared, piso, techo, etc.) de un edificio que ocasionan mayor flujo de calor a través de ésta"* [1]. El objetivo es desarrollar criterios de optimización del desempeño energético de estas envolventes.

Se estudiaron los tipos de construcciones no convencionales y se seleccionaron muestras de aquellas más empleados en el NEA. Éstas fueron evaluadas con procedimientos de cálculo de las Normas IRAM en su serie 11.600. Mediante simulaciones realizadas con el software THERM, un programa de cálculo de calor en régimen estacionario que resuelve numéricamente la ecuación de transmisión de energía en dos dimensiones, en su versión 6.3.

La Norma IRAM 11.601 establece el procedimiento de cálculo de manera individualizada de la Transmitancia Térmica Lineal del Muro Opaco y del Puente Térmico y las relaciona para determinar la aptitud del cerramiento. El software THERM, por su lado, calcula la Transmitancia Térmica Total del modelo dibujado. Esto implica que para poder establecerse iguales relaciones deben simularse ambas porciones en modelos separados. Los valores que pudieron obtenerse con ambos procedimientos presentaron discrepancias promedio del 3,4%.

Con el software, sin embargo, es posible obtener un Coeficiente Ponderado de Transmitancia que incorpora Muro Opaco y Puente Térmico, y con la graficación del flujo de calor a través del cerramiento, reconocer fácilmente los puntos más críticos, para concentrar las acciones de optimización en ellos. THERM resulta por lo tanto un complemento a la normativa muy útil por la valiosa información gráfica que aporta.

Palabras Claves: *Software, Prefabricación, Confort Higrotérmico, Transmitancia Térmica.*

1. INTRODUCCIÓN

Considerando que las edificaciones son responsables del 40% del consumo de energía en la Argentina, que de este consumo el mayor gasto se debe a la climatización de los ambientes y que la mitad de la energía insumida para ello es ganada o perdida a través de los cerramientos opacos. Reconociendo por otro lado que la implementación de la construcción no convencional se ha incrementado notablemente en el Nordeste Argentino en los últimos años y que la estructura portante de los edificios materializados con técnicas industrializadas y entramados en seco, constituye generalmente importantes puentes térmicos crónicos en diferentes puntos de la construcción. Contemplando por último que el clima característico de las ciudades de Resistencia y Corrientes según el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) es muy cálido y húmedo, resultaría muy importante -y necesario- aumentar la eficiencia energética de los edificios a través del mejoramiento del desempeño higrotérmico de sus envolventes.

En este marco, el presente trabajo plantea analizar, evaluar, diagnosticar y proponer criterios para mejorar térmicamente las envolventes exteriores de edificios materializados mediante sistemas de construcción no convencional en los principales centros urbanos del NEA, prestando particular atención al impacto de los puentes térmicos, para lograr espacios interiores con condiciones higrotérmicas más cercanas a las del confort, reduciendo la demanda de climatización artificial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se inició con un relevamiento y estudio de los principales tipos y subtipos de construcciones no convencionales y los materiales empleados para su construcción. Se seleccionó y describió una muestra de los cinco sistemas constructivos no convencionales más empleados en el NEA.

Esta muestra fue, en primer lugar, analizada en base a la **Normas Técnicas Vigentes** en los principales centros urbanos de la región. Se evaluó el cumplimiento de las condiciones técnico - constructivas que los Reglamentos Generales de Construcción y los Códigos de Edificación locales y regionales establecen para la construcción no convencional.

Seguidamente, los sistemas constructivos fueron sometidos a evaluaciones propuestas por la **Normativa de Habitabilidad** del IRAM, específicamente las Normas de la serie 11.600. Se determinó el *Coeficiente de Transmitancia Térmica* (K) de acuerdo a los métodos de cálculo del aislamiento térmico de edificios propuestos por la Norma IRAM 11.601. El método procede de manera individualizada en el cálculo de la Transmitancia Térmica Lineal de la porción opaca del muro "*Kmo*" y de la porción de las heterogeneidades "*Kpt*" (puentes térmicos), para determinar, a partir de la relación entre los valores (*Kpt/Kmo*), la aptitud del cerramiento. La misma se logra, para el caso en que la distancia entre los puentes térmicos lineales sea menor a 1,70 m., si la

ISBN: 978-987-1676-63-7

transmitancia térmica de una heterogeneidad no supera el 35% del valor de la del muro opaco. En segunda instancia se realizó una consideración del *Riesgo de Condensación Superficial e Intersticial* en la estación de invierno de las distintas soluciones tecnológicas de acuerdo a la Norma IRAM 11.625. Para estos cálculos se adoptaron: la temperatura exterior de diseño de la Ciudad de Resistencia (-1,8°C), la temperatura ideal de diseño interior determinada por la Norma en 18ºC y una Humedad Relativa Interior de 75%. Además se adoptaron los coeficientes de transmitancia térmica (K) obtenidos anteriormente y la resistencia al paso de vapor de agua de cada una de las capas constitutivas.

Los cerramientos - tipo considerados fueron finalmente analizados mediante **Simulaciones** desarrolladas por el **software THERM**, en su versión 6.3. Éste es un programa de cálculo de calor en régimen estacionario que simula la transmisión de energía a través de la sección transversal de elementos de construcción, como ventanas, paredes, y techos [2]. Para ello emplea el método de elementos finitos, un método numérico empleado en la resolución de problemas que involucran alto grado de complejidad, incluyendo geometrías complejas, cargas no distribuidas y la determinación de propiedades materiales. El método propone la resolución de los problemas planteando una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas y arroja valores aproximados de incógnitas en un número finito de localizaciones dentro del cuerpo. El software, desarrollado en Estados Unidos, se encuentra disponible para su descarga gratuita, únicamente en idioma inglés. Como resultados aporta valores numéricos de transmitancia térmica (*U-factors)*, e información gráfica como Isotermas (*Isotherms*) o líneas de igual temperatura, los Vectores de Flujo (*Flux Vectors*) o caminos preponderantes seguidos por el calor y la Transmisión del Flujo de Calor mediante Escala de Colores (*Color Infrared*). En primer lugar se dibujaron las geometrías de la sección transversal de los cerramientos tipológicos en THERM con la incorporación de plantillas .DFX. A cada geometría luego se le asignó el material correspondiente, extraído de una Librería de Materiales creada con los mismos valores de conductividad térmica empleados en los cálculos de acuerdo a IRAM. Las simulaciones se realizaron considerando una situación de verano, con un flujo de calor desde el exterior hacia el interior, en sentido horizontal por haber estudiado en detalle los cerramientos verticales. De acuerdo a estas premisas se determinaron las Condiciones de Contorno o *Boundary Conditions* del modelo simulado, aplicando para el exterior una Temperatura Máxima de Diseño establecida por la Norma IRAM 11.603 en 39,8°C para Resistencia y una Conductancia de la Capa Superficial de Aire de 25,00 W/m^{2}K, correspondiente a los 0,04 m^{2}K/W de Resistencia Superficial Exterior (*Rse*). Y como condiciones interiores se adoptó una Temperatura Ideal de Diseño Interior de 25ºC para Verano y 7,69 W/m^{2}K como Conductancia de la Capa Superficial de Aire, equivalente a los 0,13 m^{2}K/W de Resistencia Superficial Interior (*Rsi*) establecida por IRAM. Determinados todos estos parámetros, el software elaboró automáticamente una malla sobre el modelo dibujado, dividiendo la sección transversal analizada en un número finito de subregiones no superpuestas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para realizar el análisis de la transmisión del calor, el programa utiliza la ecuación de conducción de calor de dos dimensiones derivada de la ecuación general de la energía, con el supuesto de que las propiedades físicas se mantienen constantes. Para un medio anisótropo se emplea la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\left(k_{11}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_{22}\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)+Q(x,y)=0 \qquad (1)$$

Dónde k_{11} y k_{22} son las conductividades en las direcciones *x* e *y*. Y *Q(x,y)* es la generación de calor interna conocida por unidad de volumen. Para medios isótropos, k_{11} y k_{22} son iguales y se denominan *k.* Si no existiera generación interna de calor, *Q(x,y)* sería igual a *0.*

El software THERM calcula la transmitancia térmica total del modelo dibujado. Esto implica que para poder establecer las relaciones entre muro opaco y puente térmico y determinar la aptitud del cerramiento tal como lo realiza la Norma IRAM, deban simularse ambas porciones en modelos separados. Desde el punto de vista gráfico, los resultados de este modo pierden riqueza debido a la transmisión homogénea de calor que se produce. Si, en cambio, se simula en un mismo modelo el comportamiento de la sección transversal del sistema constructivo incorporando tanto muro opaco como puente térmico, pueden obtenerse gráficos que muestran de forma clara la influencia de las heterogeneidades en la transmisión de calor a través de los cerramientos - tipo. De esta manera es posible obtener un Coeficiente Ponderado de Transmitancia que representaría la "transmitancia promedio" del cerramiento. Debido a estas cuestiones se simularon con THERM 6.3 para cada sistema constructivo un modelo de muro opaco aislado, otro únicamente con la porción de puente térmico y un último que incorpora ambos.

A partir de un diagnóstico higrotérmico y energético realizado con los resultados de los análisis descriptos, se propusieron medidas de optimización del diseño de los sistemas constructivos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Muestra Representativa

En cuanto a los sistemas constructivos no convencionales de uso más habitual en el NEA, se detectó, por un lado, el **Sistema de Grandes Paneles**, con paneles transversales de carga de Hormigón Armado espaciados a 3,00 m., y paneles rigidizantes en la parte central de los edificios [3]. Las terminaciones interiores se materializan con placas de roca de yeso sobre estructuras metálicas. Por otro lado, se reconoció el uso de **Sistemas Livianos con Entramado,** tanto de **Madera** como **Metálico**. Los mismos están formados por la combinación de elementos portantes ligeros que se ubican cada 0,40 a 0,60 m. para formar bastidores portantes. En el primer caso (Balloon Framing) las piezas son de madera y en el segundo (Steel Framing), son perfiles

metálicos galvanizados conformados en frío con forma de “C” o “U”. Los bastidores se completan con elementos de cerramiento, como tablas de machimbre o tableros OSB, y de revestimiento, empleadas como acabado y protección. También se detectó la aplicación de **Sistemas Livianos de Paneles Prefabricados**, paneles del tipo sándwich con estructura interna en forma de bastidores de madera de pino y terminación interior de placas de roca de yeso y exterior de placas cementicias de alto impacto. Por último, se analizó el **Sistema de Paneles Aligerados con Núcleo de Poliestireno Expandido y Malla Electro-soldada Espacial.** Este tipo de sistema industrializado abierto utiliza paneles de poliestireno expandido y mallas de acero prefabricados en forma modular, que luego reciben la aplicación a presión de un revoque estructural de hormigón en obra, que provee tanto estructura como protección y terminación. Los sistemas constructivos reconocidos, en general, se conforman por elementos multicapas que incorporan en su interior la aislación hidráulica, térmica y acústica. Dada la naturaleza constructiva de los mismos, la repetición de piezas estructurales para la conformación de los bastidores y estructuras portantes, interrumpe por lo general el desarrollo de las aislaciones térmicas en las multicapas, conformando las heterogeneidades denominadas puentes térmicos.

3.2. Verificaciones y Simulaciones

Sobre el estudio de la **Normativa Técnica Vigente** en la región puede mencionarse que la misma se aboca principalmente a la reglamentación del diseño de ambientes, la imagen de las obras y la conformación urbana que surge del conjunto de ellas. En cuanto a sistemas o materiales constructivos no convencionales presentan una definición, clasificación y prescripción escasa y poco detallada. En general se contempla el uso de variados sistemas de construcción, siempre que los mismos cuenten con el *Certificado de Aptitud Técnica* (*C.A.T.*), que es un documento otorgado a todo material, elemento o sistema constructivo que se considere "no tradicional". Para la obtención de la certificación se exige la presentación de ensayos de conductividad térmica y resistencia al paso de vapor de agua. La misma debe ser renovada por lo general cada tres años, lo cual garantiza la revisión y optimización constante de los sistemas constructivos.

De acuerdo a los valores de transmitancia térmica obtenidos de la aplicación de la **Normativa de Habitabilidad Vigente**, el 80% de los sistemas constructivos analizados alcanza para verano el *Nivel A*, es decir el recomendado, establecido por la Norma IRAM 11.605 para las Zonas Bioambientales I y II, en que se inscribe el NEA. Para la situación de invierno, el 40% cumple con el *Nivel A* y el 60% restante, con el *Nivel B* (medio). Si de la aptitud respecto a los puentes térmicos se trata, el 80% de ellos resulta insatisfactorio. Dados los buenos valores de resistencia térmica que registran los diferentes cerramientos tipológicos, ninguno de ellos presenta Riesgo de producir Condensaciones Superficiales en condiciones de invierno de acuerdo a lo establecido por la Norma IRAM 11.625. En relación al Riesgo de Condensación Intersticial, sin embargo, puede reconocerse

que en todos los casos la misma se produce a partir del material aislante hacia las capas constitutivas exteriores del cerramiento. Esto se debe a que los diferentes materiales aislantes térmicos reducen la temperatura de bulbo seco de manera drástica, pero dejan pasar con facilidad el vapor de agua, provocando la condensación. La aparición de agua en las capas intersticiales de los cerramientos edilicios altera sus propiedades físicas y químicas, poniendo en riesgo su durabilidad, comportamiento mecánico e higrotérmico.

Las **Simulaciones** desarrolladas con el Software **THERM 6.3** aportaron dos tipos de resultados de interés. En primer lugar, los valores numéricos de transmitancia térmica. Si se comparan aquellos obtenidos para el muro opaco y el puente térmico en forma aislada con las metodologías de IRAM por un lado y las simulaciones de THERM por otro, puede reconocerse una gran similitud en los resultados, existiendo una discrepancia promedio de 3,4% que se acrecienta conforme se complejiza la figura del perfil transversal. Si en cambio se considera la Transmitancia Térmica Ponderada, los rendimientos de los sistemas constructivos disminuyen considerablemente. Si se evaluaran estos valores con aquellos que IRAM considera admisibles, el 40% de los sistemas constructivos alcanzaría el *Nivel A* para verano y únicamente el 20% el mismo nivel para invierno. Ubicándose en el *Nivel B* el 40% para verano y el 60% para invierno. El sistema de núcleo de poliestireno expandido con malla electro-soldada incluso se encontraría por encima de los niveles mínimos establecidos por norma con esta nueva consideración.

En segundo lugar, THERM aportó información gráfica de gran valor. En gráficos de gradiente de temperatura representado mediante escala de colores, puede reconocerse claramente el comportamiento del perfil transversal ante el paso del calor. En los sistemas constructivos analizados se advierte que la mayor reducción de temperatura se produce en la porción correspondiente al aislante térmico y que al verse el mismo interrumpido por un elemento estructural (puente térmico), las líneas de igual temperatura tienden a bordear la heterogeneidad, acercándose a los límites del cerramiento. Por medio de gráficos de vectores de flujo y escalas colorimétricas de magnitudes de flujo puede notarse la concentración de la transmisión del calor en los puentes térmicos y el poder de atracción del flujo que tienen sobre sectores de muro opaco.

Con lo expuesto pueden reconocerse principalmente dos puntos críticos en el comportamiento higrotérmico y energético general de los sistemas constructivos no convencionales de uso habitual en la región. Por un lado, la inaptitud de los cerramientos respecto a los puentes térmicos, por el descuido de la proporcionalidad entre valores por la persecución de bajos niveles de conductividad térmica de los muros opacos. Y, por otro lado, riesgo constante de condensación intersticial, dado que los materiales aislantes térmicos, por lo general de naturaleza porosa, no impiden el paso de vapor de agua de igual manera que lo hacen con el paso del flujo de calor.

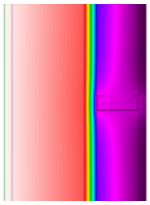
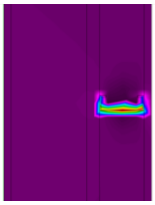
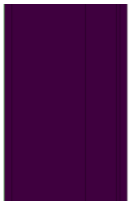
ISBN: 978-987-1676-63-7

3.3. Optimización

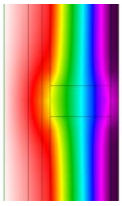
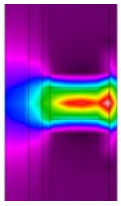
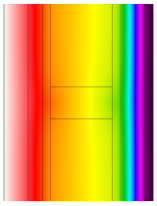
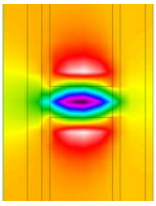
Se propusieron criterios de optimización en dos líneas de acción. En primer lugar, lo perseguido fue la reducción de la diferencia de transmitancia térmica entre muro opaco y puente térmico. Esto se consiguió por un lado reemplazando el material que constituía el puente térmico por uno de menor valor de conductividad, sin modificar sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, las armaduras de acero pudieron ser reemplazadas por varillas de resina de vinil y fibra de vidrio. Por otro lado, la reubicación de la porción aislante dentro de las capas del cerramiento, retirándolo de su ubicación usual en el espacio dejado por los entramados estructurales y ubicándolo por delante del mismo, permitió cubrir y proteger con aislación térmica todo el cerramiento. Esto redujo considerablemente la diferencia de conductividad térmica entre ambas porciones del cerramiento. El segundo camino seguido fue la disminución del Riesgo de Condensación Intersticial mediante el freno del paso de vapor de agua a través del sistema constructivo, reubicando la barrera de vapor dentro de la multicapa o aumentando la resistencia a su paso. También se planteó disminuir los saltos térmicos entre las diferentes capas constitutivas, a fin de que las temperaturas de bulbo seco y de roció no entren en contacto.

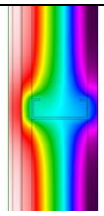
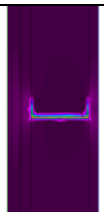
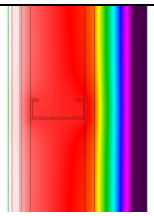
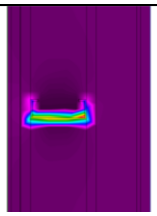
La Tabla 1 expone los resultados más relevantes de los sistemas estudiados con ambas metodologías y en los casos originales y optimizados. Los gráficos ilustrados corresponden a la Escala Colorimétrica de Gradiente de Temperatura y Escala Colorimétrica de Magnitudes de Flujo, a la izquierda y derecha respectivamente de cada situación. En estas escalas, los colores fríos (azules y morados) corresponden a temperaturas y flujos de calor bajos, mientras los colores cálidos (amarillos y rojos) representan temperaturas y flujos de calor altos.

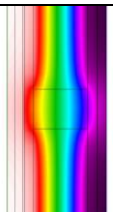
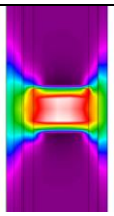
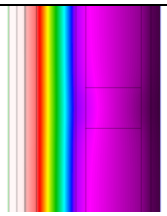
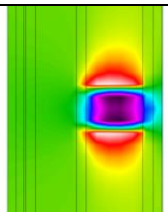
Tabla 1. Comparación de Situación Original y Optimizada de los Sistemas analizados

Situación Original			**Situación Optimizada**	
Sistema de Grandes Paneles				
Cerramiento Panel Portante de HºAº con terminación exterior de Revoque a la Cal e interior de Placas de Roca de Yeso			Eliminación del Puente Térmico aplicando un Revoque Seco sobre Poliestireno Expandido	
				
Coeficiente de Transmitancia Térmica			Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM		Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,9731 W/m2ºC	**0,9856 W/m2ºC**		**0,5294 W/m2ºC**	**0,5296 W/m2ºC**

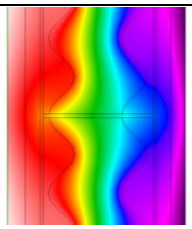
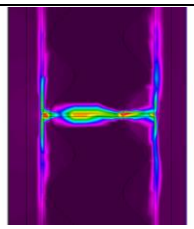
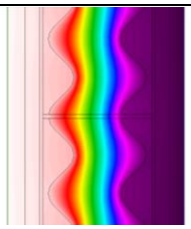
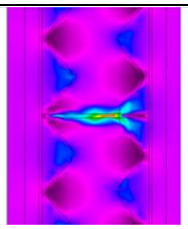
ISBN: 978-987-1676-63-7

Sistema Liviano con Entramado de Madera					
Cerramiento Tipo Balloon Frame con terminación exterior de Siding de Pino e interior de Machimbre de Pino			Reubicación del Aislante Térmico en la cara interna para abarcar al Puente Térmico		
					
Coeficiente de Transmitancia Térmica			Coeficiente de Transmitancia Térmica		
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM		Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	
0,2624 W/m2ºC	**0,3220 W/m2ºC**		**0,4826 W/m2ºC**	**0,4812 W/m2ºC**	

Sistema Liviano con Entramado Metálico				
Cerramiento Tipo Steel Frame con term. ext. de Revestimiento Plástico e int. de Roca de Yeso			Reubicación del Aislante Térmico en la cara interna para abarcar al Puente Térmico	
				
Coeficiente de Transmitancia Térmica			Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM		Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,3896 W/m2ºC	**0,6004 W/m2ºC**		**0,4530 W/m2ºC**	**0,4919 W/m2ºC**

Sistema Liviano de Paneles Prefabricados				
Panel Sandwich de Madera de Pino con term. ext. de Placa Cementicia e int. de Roca de Yeso			Reubicación del Aislante Térmico en la cara externa para abarcar al Puente Térmico	
				
Coeficiente de Transmitancia Térmica			Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM		Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,97W/m2ºC	**0,2755 W/m2ºC**		**0,4698 W/m2ºC**	**0,4641 W/m2ºC**

ISBN: 978-987-1676-63-7

Sistema de Paneles Aligerados con Núcleo de Poliestireno y Malla Electro-soldada Espacial			
Cerramiento de Poliestireno Expandido y Malla Electrosoldada con Hormigón Proyectado.		Reemplazo del Acero por Varillas de Resina de Vinil y Fibra de Vidrio.	
			
Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,5090 W/m2ºC	**2,5319 W/m2ºC**	**0,5082 W/m2ºC**	**0,5868 W/m2ºC**

De la simulación de los sistemas en su situación optimizada puede observarse que en todos los casos el gradiente de temperatura a través de la sección transversal se vuelve más regular. Esto responde a la atenuación del efecto del puente térmico, generando isotermas más paralelas que ya no bordean la heterogeneidad. Asimismo, puede reconocerse que las mayores magnitudes de flujo de calor se redistribuyen. Las variaciones en el valor de Coeficiente Ponderado de Transmitancia Térmica siguen distintas tendencias. En algunos casos, el valor en la situación optimizada disminuye respecto a la original, correspondiendo a la eliminación del puente térmico o al reemplazo del material altamente conductor térmico que lo conformaba, por otro de menor poder de transmisión del calor. En otros casos, el valor aumenta en la situación optimizada. A simple vista esto podría percibirse como negativo, ya que las ganancias y pérdidas térmicas a través del cerramiento también se incrementarían. Este aumento, sin embargo, implica una disminución de la diferencia entre la transmitancia térmica de la porción de Muro Opaco y la del Puente Térmico, lográndose en el 80% de los casos la aptitud respecto a los Puentes Térmicos, frente al 20% registrado en la situación original. Esto constituyó el objetivo principal propuesto por el presente trabajo, considerando que los puentes térmicos son elementos recurrentes en la construcción no convencional. No obstante, los valores de Transmitancia Térmica en la situación optimizada se mantienen dentro de los márgenes del *Nivel A* (óptimo) propuesto por la Norma IRAM 11.605. En cuanto al segundo punto crítico, el Riesgo de Condensación Intersticial, el mismo no pudo ser erradicado por completo pese a la aplicación de las estrategias de optimización. La eliminación del fenómeno únicamente se conseguiría con la implementación de soluciones costosas y constructivamente complejas, como la incorporación de numerosas barreras de vapor o la resignación de propiedades aislantes térmicas del cerramiento.

4. CONCLUSIONES

ISBN: 978-987-1676-63-7

En primer lugar, puede concluirse que los Sistemas de Construcción No Convencional de empleo usual en el Nordeste Argentino registran, en general, buenos comportamientos higrotérmicos y energéticos, por incorporar consideraciones de confort ambiental y principalmente de aislación térmica. Existen, sin embargo, aspectos de los mismos que pudieron y pueden seguir optimizándose, en especial en relación al comportamiento de los puentes térmicos y a la condensación de vapor de agua.

Se considera necesaria la revisión de los Reglamentos y Códigos de Construcción de las principales ciudades de la región a fin de una inclusión más amplia de consideraciones respecto a las performances higrotérmicas y energéticas de los sistemas constructivos en general y de la normalización del uso de los sistemas constructivos no convencionales. Asimismo, se estima muy importante el control de la aplicación efectiva de éstas y otras normativas afines para lograr una verdadera mejora de las condiciones de habitabilidad de los espacios construidos en el medio.

Respecto al uso del Software THERM 6.3, resulta muy útil para la evaluación del comportamiento de todo tipo de componentes constructivos y en especial de los puentes térmicos en la edificación. La información que aporta puede relacionarse y evaluarse de forma directa con problemas usuales en la construcción, como altas demandas de energía para climatización de ambientes. Su interface sencilla y los resultados numéricos muy similares a la Normativa del IRAM lo convierten en una herramienta confiable de complemento a las normas de habitabilidad vigentes en Argentina. Ya que la naturaleza diferente de los procedimientos de cálculo y los resultados impiden relacionarlos directamente con estándares, clasificaciones y especificaciones establecidas por el organismo, por lo que no suplanta a sus Normas. Presenta, no obstante, dos importantes ventajas: por un lado, el aporte de información gráfica tan apreciada por diseñadores, resultando muy sencillo reconocer los puntos más críticos en el comportamiento higrotérmico de los cerramientos, para concentrar las acciones de optimización en ellos y poder comparar los resultados de manera muy rápida. Y, por otro lado, la posibilidad de obtener un Coeficiente Ponderado de Transmitancia Térmica, que incorpora ambas porciones del cerramiento y determina una especie de valor promedio aplicable a toda la envolvente, sin caer en errores de consideración exclusiva del muro opaco para la evaluación de los sistemas.

5. REFERENCIAS

[1] Norma IRAM 11.549. Aislamiento térmico de edificios. Vocabulario. Tercera Edición. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Buenos Aires, Argentina. 2002.

[2] Lawrence Berkeley National Laboratory. *THERM 6.3 / WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual.* Berkeley, California, Estados Unidos, 2013.

[3] Mac Donnel, H. *Manual de Construcción Industrializada*. Editorial Revista Vivienda S.R.L. Buenos Aires, Argentina, 1999.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

AVALIAÇÃO DE VIDA A FADIGA TORCIONAL DE EIXO TRASEIRO

Matheus de Oliveira Rocha[1] **e Ernani Sales Palma**[2]

[1] Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Av. Antônio Carlos, 6627 – Prédio da Engenharia – Bloco 1 – 3º Andar, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: matheusoliveirarocha@gmail.com

[2] Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Av. Antônio Carlos, 6627 – Prédio da Engenharia – Bloco 1 – 3º Andar, Belo Horizonte/MG, Brasil
E-mail: ernani@demec.ufmg.br

RESUMO

O acirramento do mercado nacional de automóveis gera a busca por projetos mais eficientes, baratos e rápidos; com isto, torna-se necessário verificar a possibilidade de usar componentes já desenvolvidos para novas aplicações, economizando tempo e investimentos. Neste trabalho, o foco é sobre o sistema de suspensão traseira, com uma análise específica sobre o eixo traseiro. Serão feitas simulações virtuais e verificações físicas da vida a fadiga do eixo em questão sob carga de fadiga de torção, avaliando seus impactos e consequências para a peça. Será analisada também uma proposta de melhoria para a fadiga torcional, atuando sobre o corte da chapa da travessa. As análises virtuais são correlacionadas com as físicas com eficácia, evidenciando a fragilidade do perfil central do eixo no tocante à propensão de aparição de trincas de fadiga. Os resultados mostram que melhor acabamento no corte do perfil gera efeitos satisfatórios com pequenas intervenções de projeto e processo, sendo a opção mais recomendada para a aplicação em questão. O presente trabalho pode contribuir significativamente para a decisão de adoção do componente em questão para o projeto analisado, suportando a escolha com embasamento técnico e econômico.

Palavras-chave: *Eixo Traseiro, Fadiga Torcional, Torção.*

1. INTRODUÇÃO

Devido à sua tipologia construtiva, esforços de torção são um dos principais tipos de carregamento atuantes em eixos traseiros do tipo eixo de torção. Em situações de curva ou desnível entre as rodas traseiras, o eixo fica submetido a uma variação de curso entre as suas extremidades. Solicitações repetitivas impactam diretamente na fadiga do material, que deve ser criteriosamente avaliada e testada para garantir a integridade do produto e a segurança do usuário.

Sabendo-se da complexidade da validação completa de um componente solicitado a diversos esforços, o presente trabalho visa validar um eixo traseiro já empregado em um veículo para utilização em um projeto com maiores solicitações no tocante à fadiga torcional. Para tanto, serão avaliados resultados de provas físicas e virtuais sobre o eixo traseiro em sua configuração atual bem como sobre uma otimização do projeto.

Para praticamente todos os pneus, as forças resultantes de curva são dependentes da carga [1]. Devido à elevação do centro de gravidade (CG) do veículo acima do plano do solo, as cargas laterais são transformadas em verticais. O funcionamento do momento de rolagem aplicado a um eixo está exemplificado no modelo da Figura 1.

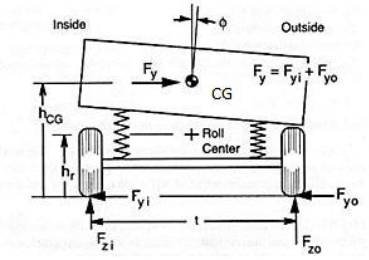


Figura 1: Figura esquemática para análise de forças de um veículo em curva (GILLESPIE, 1992)

Todas as suspensões são modeláveis através de duas molas (representando a rigidez do sistema). A rolagem do corpo sobre as molas infere um torque no eixo de torção proporcional ao produto da rigidez de rolagem com o ângulo de rolagem [1].

O veículo deve ser considerado como um sistema único para obter a expressão de distribuição do momento de rolagem. Então, define-se um eixo de rolagem como uma linha conectando os centros de rolagem da dianteira e da traseira do veículo. Pode-se dizer que:

$$M_{\emptyset} = M_{\emptyset f} + M_{\emptyset r} = \left(K_{\emptyset f} + K_{\emptyset r}\right).\emptyset \qquad (1)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Onde, $M_{\emptyset f}$: Momento de rolagem da dianteira; $M_{\emptyset r}$: Momento de rolagem da traseira; $K_{\emptyset f}$: Rigidez de rolagem da dianteira; $K_{\emptyset r}$: Rigidez de rolagem da traseira; Ø: Ângulo de rolagem. Logo, podemos resolver como:

$$\emptyset = \frac{W.h_1.\left[\frac{V^2}{R.g}\right].}{K_{\emptyset f}+K_{\emptyset r}-W.h_1} \quad (2)$$

Onde, R: Raio da curva; W: Peso do veículo; V: Velocidade do veículo; g: Aceleração da gravidade; h_1: Altura do centro de rolagem perpendicularmente ao eixo de rolagem.

A fadiga é definida como sendo um processo que causa a falha ou falta prematura de um componente sujeito a carregamentos cíclicos. O processo é característico por iniciar pela nucleação e propagação de uma trinca ao longo da região submetida a fadiga [2].

Sabe-se que qualquer descontinuidade em uma peça altera a distribuição de tensão na mesma. Tais descontinuidades são denominadas aumentadores de tensão, e as regiões em que ocorrem são conhecidas como áreas de concentração de tensão [3].

Deve-se prever um fator de modificação da condição da superfície para projetos específicos e para isso, é importante levar em conta o acabamento superficial obtido na seção que está submetida aos esforços. A rugosidade tem influência significativa na resistência à fadiga uma vez que o limite de resistência à fadiga varia da mesma forma que a rugosidade [4]. Desta forma, o alto nível de irregularidades na superfície do material, devido à sua rugosidade, impõe um aumento da concentração de tensões, gerando um decaimento do limite de resistência a fadiga.

A fadiga torcional de eixo traseiro tem sido amplamente estudada. Em um estudo realizado em 2011, explora-se a dificuldade da predição da vida a fadiga em componentes com a presença de entalhes. Com o foco em um eixo traseiro, fica clara a necessidade de modelamento dos efeitos dos processos de fabricação para a vida à fadiga é evidenciada [5].

Outro estudo afirma que os defeitos acumulados durante o processo de estampagem tendem a piorar o resultado de vida a fadiga na comparação com o corte a laser [6].

Em um outro trabalho de 2014 reforça-se a influência do processo de estampagem na vida a fadiga dos componentes [7]. No mesmo ano, outros autores buscaram entender o modo de falha e as cargas críticas de um eixo traseiro de torção durante rodagem convencional através da aquisição de forças e deformações na roda e posterior correlação da região de falha obtida pela teoria de dano acumulado [8].

ISBN: 978-987-1676-63-7

O objetivo deste trabalho é viabilizar a aplicação de um eixo traseiro já existente em um veículo com diferentes solicitações daquelas projetadas. Através da análise de elementos finitos comparada com resultados de testes de bancada, pretende-se mostrar a eficácia de uma solução no tocante à fadiga torcional do eixo traseiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. VALIDAÇÃO

Para a completa validação de um componente de suspensão, ele deve ser submetido a diversas provas e análises.

O fabricante do eixo traseiro do trabalho em questão adota um sistema próprio de verificações físicas dos projetos realizados e, baseado no know-how da empresa, determinaram-se objetivos que o componente deve superar para ser aprovado para comercialização

Após as provas de fadiga virtuais, a peça é então submetida a provas físicas. Algumas das provas usadas para analisar o componente são: Fadiga Vertical; Fadiga Lateral; Fadiga Torcional; Fadiga Longitudinal; Impacto Lateral; Impacto Vertical; Impacto Longitudinal; Deformação Lateral; Deformação Vertical e Deformação Longitudinal;

2.2. FADIGA TORCIONAL

Em especial é importante frisar a prova de fadiga torcional. Devido ao conhecimento do histórico deste componente, o carregamento de torção tende a ser um dos esforços que mais comprometem a integridade do eixo. Portanto, neste trabalho, o teste de fadiga torcional tem destaque, não sendo, porém, a única prova realizada para aprovar um eixo traseiro em um veículo.

A fadiga torcional consiste na aplicação de um deslocamento vertical no centro da roda do veículo referente ao curso de torção do carro simulado em uma curva com aceleração de 0,7g. Com a distribuição de forças entre a roda interna e externa obtém-se a carga lateral e também a distribuição de carga por roda. Esse carregamento é aplicado em um modelo numérico de uma suspensão traseira isolada do restante do veículo e então é possível obter o curso de torção.

Em posse desse curso, simula-se o eixo traseiro em ambiente virtual com um modelo de elementos finitos para então aplicar-se as cargas nos pontos definidos. Para tanto, são utilizados dois softwares diferentes: um pré-processador (Altair Hypermesh®) que prepara as malhas e um segundo que simula a aplicação de cargas (Adams®).

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3. EIXO DE TORÇÃO

O componente analisado é o eixo traseiro de torção. A suspensão com esta tipologia é composta por vários componentes, cujos principais são apresentados na Figura 2.

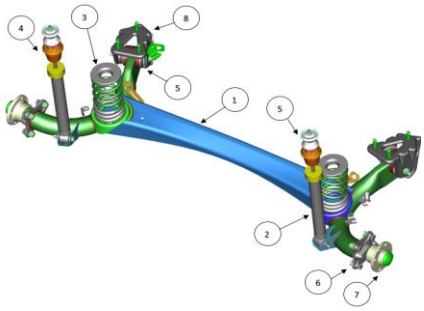


FIGURA 2: Componentes da suspensão do tipo eixo de torção: (1) Eixo traseiro; (2) Amortecedores; (3) Molas; (4) Batentes de fim de curso da suspensão; (5) Buchas (fixação dos elementos à carroceria); (6) Ponta de eixo; (7) Cubo de roda; (8) Suporte do eixo à carroceria.

Todos os elementos do eixo traseiro são fabricados em aço carbono cujos módulos de elasticidade (E), coeficientes de Poisson (υ) e pesos específicos (ρ) são bastante similares. Outras propriedades, como limites de escoamento e resistência são específicas para cada componente. Contudo, não serão apresentadas neste estudo pois as análises de fadiga ocorrem na fase elástica do material. As propriedades consideradas são: $E = 205000\ N/mm^2$; $\upsilon = 0,3$; $\rho = 7,900\ kg/m^3$.

O eixo traseiro é constituído, basicamente, dos seguintes componentes apresentados a seguir, juntamente com as correspondentes espessuras: Travessa Central – 4,0mm; Braço Longitudinal – 3,5mm; Prato de Fixação da Roda – 8,0mm; Prato de Apoio da Mola – 2,0mm; Suporte do Amortecedor – 2,0mm; Anel de Fixação do Coxim – 3,0mm.

Cada componente é fabricado através do processo de estampagem, com operações de corte e dobra. Por ser uma chapa de espessura relativamente alta, 4 milímetros, o processo de corte é realizado em duas etapas. Em um primeiro momento a lâmina realiza o corte de aproximadamente 80% do total da espessura do perfil e o restante é obtido através do que se chama de estouro de chapa, que consiste no rasgamento da chapa. Neste tipo de corte, o acabamento é pior e apresenta diversas fissuras ao longo de sua extensão. A Figura 3 mostra este corte, onde a parte inferior da imagem apresenta o estouro e a parte superior é o corte.

ISBN: 978-987-1676-63-7

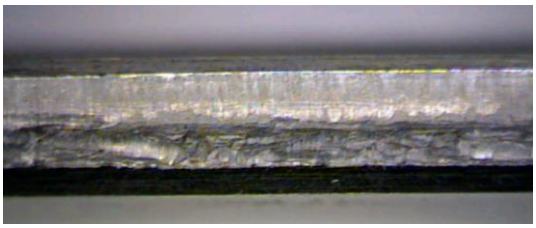


Figura 3: Seção da travessa central de um eixo traseiro.

A melhor forma de reduzir este problema, até o momento, é o controle de qualidade do corte aliado à manutenção constante das ferramentas de estampagem e dos parâmetros de processo.

2.4. PROVA FÍSICA

Para executar os testes de fadiga torcional, o eixo traseiro é testado com os seguintes materiais: 2 atuadores hidráulicos de 25kN x 150mm (carga x curso) modelo MTS 244.14; 2 células de carga de 25kN; 1 bancada para fixação do eixo traseiro; 1 pórtico para fixação dos atuadores; 1 equipamento para monitoramento de carga e curso modelo FlexTest MTS; 2 dispositivos de fixação do atuador ao eixo traseiro. A Figura 4 exemplifica a montagem com o material acima descrito.



Figura 4: Prova de fadiga torcional no laboratório da fabricante.

2.5. PROVA VIRTUAL

Na confecção do modelo virtual foi utilizado o software Hypermesh para criar a malha composta por elementos e nós. Como parte da metodologia da fabricante, foi adotada uma malha com elementos de casca. Para as molas, buchas elásticas, batentes, rolamentos, amortecedores e soldas foram utilizados elementos unidimensionais. O modelo virtual multicorpos utilizado foi correlacionado elasto-cinematicamente com o modelo experimental físico, através da aquisição de dados de tensões e deformações reais do eixo traseiro.

2.6. DEFINIÇÃO DE CARREGAMENTOS DO VEÍCULO BASE E DE UM NOVO VEÍCULO

ISBN: 978-987-1676-63-7

Durante o projeto do eixo traseiro em questão foram definidos o peso total do veículo, a altura de CG, a rigidez de mola e a altura do batente. Com destes valores e considerando a rigidez torcional da carroceria e das suspensões dianteira e traseira, gera-se uma excitação de torção do carro.

A metodologia para aquisição do carregamento de torção baseia-se em uma manobra padrão cuja aceleração lateral na roda seja de μ = 0,7g. Esta manobra gera forças verticais e laterais nas rodas internas e externas e com estes valores é possível entender a distribuição de cargas verticais, que são o único tipo de carregamento considerado para a geração do curso torcional neste trabalho.

Em seguida, os valores de cargas são aplicados em um modelo numérico no programa Adams. De acordo com a metodologia específica, o modelo corresponde a uma suspensão traseira isolada do restante do veículo, desconsiderando-se a rigidez da carroceria e a influência da suspensão dianteira. O curso de torção é então adquirido em unidades de comprimento, sendo encontrado o valor de ±46mm, aplicados no centro da roda, seguindo a direção vertical do veículo.

Em uma segunda etapa, devido à iminência de criação de uma nova versão do veículo, desta vez mais pesada e com mais itens de série, foi necessária uma verificação completa da situação estrutural dos componentes da suspensão. Para efeitos de cálculo foi modelada a adição de uma massa de 150Kg colocada no porta-malas, representando um aumento de 10% no total da massa de dimensionamento do eixo traseiro original. Nestas condições, o novo valor do curso torcional encontrado é de ±56mm, aplicados no centro da roda, seguindo a direção vertical do veículo.

2.7. METODOLOGIA PARA EXECUÇÃO DA PROVA DE FADIGA FÍSICA

Após a montagem da prova, com o posicionamento correto dos atuadores e fixação adequada do eixo, segundo a metodologia da fabricante, para a execução da prova de fadiga, são realizados os seguintes passos: (1) definir nos atuadores, com carregamento senoidal, o curso torcional encontrado em uma manobra com aceleração lateral de μ = 0,7g; (2) prosseguir com a prova até que haja rompimento do eixo traseiro. Caso não se verifiquem falhas até 200.000 ciclos, interromper a prova; (3) verificar a presença de falhas a cada 1.000 ciclos de prova; (4) Objetivo mínimo de falha: 100.000 ciclos. Em seguida, adotando-se a metodologia de Weibull [9], calcula-se a vida a fadiga utilizando-se uma confiabilidade de 90%. Este resultado deve ser superior a 100.000 ciclos para que ocorra a aprovação do eixo traseiro em questão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. VERIFICAÇÃO VIRTUAL E FÍSICA DA VIDA A FADIGA TORCIONAL DO EIXO TRASEIRO DO VEÍCULO BASE

O eixo traseiro foi submetido aos carregamentos virtuais de ±46mm. Para representar a severidade da qualidade do acabamento do perfil da chapa, foi adicionado um fator de acabamento à curva de fadiga, que nada mais é do que uma redução dos ciclos de fadiga para uma mesma tensão, sendo apenas uma representação da criticidade do serrilhamento. Esta hipótese foi correlacionada com provas físicas a banco, sendo validado seu uso para futuras aplicações.

Foi possível observar que a vida a fadiga estimada foi muito superior a 200.000 ciclos, evidenciando que não há criticidade alguma no teste.

Em seguida, as peças foram testadas no laboratório fisicamente, usando a montagem já descrita anteriormente. Vale ressaltar que os exemplares testados são oriundos de um processo de produção seriada, sem qualquer trabalho especial. Os resultados encontrados nas provas realizadas sobre 3 eixos seguem na Tabela 1:

Tabela 1: Resultados das Provas Físicas de Fadiga com Carregamentos do Veículo Base

Eixo	Contagem de Ciclos Sem Falhas
1	200.000 (interrupção sem falha)
2	200.000 (interrupção sem falha)
3	200.000 (interrupção sem falha)
Análise de Weibull (90%)	200.000

Todos os eixos atingiram o objetivo mínimo de 100.000 ciclos. Seguindo o que é estabelecido em norma, as amostras foram levadas até 200.000 ciclos. Como não houve falha em nenhum dos testes, os mesmos foram interrompidos neste valor máximo de ciclos.

3.3. VERIFICAÇÃO VIRTUAL E FÍSICA DA VIDA A FADIGA TORCIONAL DO EIXO TRASEIRO DO NOVO VEÍCULO

O eixo traseiro foi submetido aos carregamentos virtuais de ±56mm. Foi adicionado o fator de modificação de acabamento superficial à curva de fadiga, representando a severidade apresentada devido ao serrilhamento da borda da chapa. Foi possível observar que vida a fadiga estimada foi de 67.000 ciclos.

Para a prova física, foi definido nos atuadores o curso de ±56mm, referente à aplicação no novo veículo. Vale ressaltar que as peças testadas eram peças de produção seriada, sem qualquer trabalho especial. Os resultados sobre 3 eixos seguem na Tabela 2:

Tabela 2: Resultados das Provas Físicas de Fadiga com Carregamentos do Novo Veículo

Eixo	Contagem de Ciclos Sem Falhas
1	85.000
2	82.000
3	83.000
Análise de Weibull (90%)	80.444

Os resultados foram trincas na travessa central, sendo um modo comum às três amostras. Contudo, a posição da falha divergiu um pouco entre os eixos, sendo as duas primeiras amostras mais próximas das extremidades e a terceira próxima ao centro do componente. Nos eixos, a trinca propagou-se através do perfil, caracterizando a falha. Na Figura 5, segue imagem de um eixo:

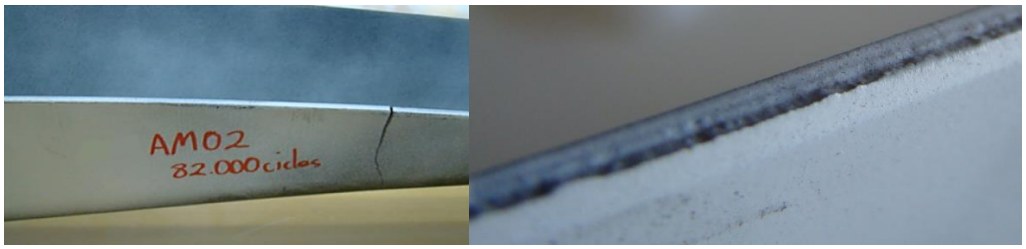


Figura 5: Falha do terceiro eixo com os carregamentos do novo veículo e detalhe do acabamento da borda da chapa deste eixo.

Em análise minuciosa do recorte das chapas, é possível perceber que o acabamento da borda da travessa tem qualidade baixa, com estouro de chapa evidente. Como já foi explicado, o serrilhamento da borda promove a concentração de tensão e favorece a fadiga prematura.

3.5. VERIFICAÇÃO VIRTUAL E FÍSICA DA VIDA A FADIGA TORCIONAL DO EIXO TRASEIRO DO NOVO VEÍCULO COM USINAGEM DA BORDA DA CHAPA

Como citado anteriormente, a presença do estouro de chapa oriundo do processo de estampagem é um fator prejudicial à fadiga. Em análise de uma das peças que falhou na prova física, foi identificada elevada rugosidade média da borda da chapa, devido à amplitude do serrilhamento. Na Figura 6, é possível verificar o perfil de uma travessa em quatro pontos distintos. Percebe-se que a amplitude varia de 0,4353mm até 0,6706mm, tendo uma média de 0,5750mm.

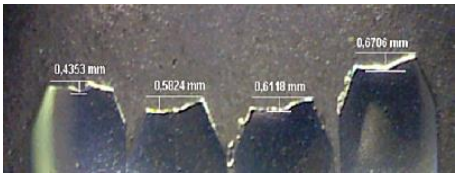


Figura 6: Perfil da chapa de uma travessa do eixo traseiro.

Tendo em vista a influência da qualidade do perfil da chapa, propõe-se uma solução que independa de controle da estampagem, reduzindo a variabilidade inerente aos processos de produção e então, a elevação da confiabilidade do sistema. A proposta é a execução de usinagem de profundidade 0,6mm, cuja rugosidade média resultante é de cerca de 4µm.

A proposta foi submetida aos carregamentos virtuais de ±56mm, porém sem o uso do fator de acabamento na borda da chapa, como empregado nas análises anteriores, tendo atingido o valor de 210.000 ciclos, considerando-se uma confiabilidade de 90%, já corrigida na curva de fadiga.

No simulador foi definido nos atuadores o curso de ±56mm. É importante ressaltar que todas as amostras apresentavam a borda da travessa usinada, conforme solução exposta acima. Os resultados encontrados nas provas realizadas sobre 3 eixos seguem na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados das Provas Físicas de Fadiga no Eixo Traseiro com Carregamentos do Novo Veículo e Usinagem da Borda da Travessa

Eixo	Contagem de Ciclos Sem Falhas
1	200.000 (interrupção sem falha)
2	200.000 (interrupção sem falha)
3	200.000 (interrupção sem falha)
Análise de Weibull (90%)	200.000

Todos os eixos concluíram a prova com 200.000 ciclos sem qualquer falha (trinca, descolamento de solda ou outros). Na Figura 7, segue a imagem do acabamento de um dos eixos:

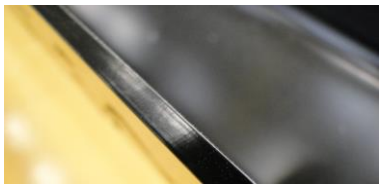


Figura 7: Qualidade do recorte da chapa em um dos eixos testados.

4. CONCLUSÕES

A análise dos testes físicos e virtuais permite verificar que há uma boa correlação entre os resultados virtuais e práticos, com uma variação média de cerca de 16%. Vários fatores contribuem para esta diferença, entre eles pode-se citar: relaxamento do material na prova física; a estimativa do fator de dano usado para o acabamento da chapa, não representa necessariamente a realidade de cada eixo; os erros de atuadores e das montagens são agentes que contribuem para esta distinção. Portanto, quando tais variações são consideradas é possível dizer que a correlação foi positiva e que o resultado foi satisfatório.

Este trabalho também demonstrou a influência dos concentradores de tensão para a vida a fadiga de componentes. Fica evidente que as variações de processo influenciam diretamente na integridade estrutural dos componentes. Também é possível deduzir deste estudo que, no caso em que parâmetros de processos não possam ser controlados, a dispersão deste deve ser suprida por ações no projeto, sejam elas de aumento de robustez (superdimensionamento) ou por intervenção direta na causa raiz (como no caso da solução de usinagem da borda da chapa).

Por fim, o eixo traseiro pode ser considerado aprovado para a aplicação no novo veículo desde que o acabamento da chapa seja garantido em valores de rugosidade média inferiores a 4µm.

5. REFERÊNCIAS

[1] Gillespie, T.D. *Fundamental os Vehicle Dynamics*. 1ª edição. Warrendale: Society of Automotive Engineers SAE, 1992.

[2] Bannantine, Julie; Comer, Jess; Handrock, James*. Fundamentals of Metal Fatigues Analysis*. 1ª edição. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

[3] Shigley, Joseph; Mischke, Charles; Budynas, Richard. *Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª edição*. Porto Alegre: Bookman, 2005.

[4] Lopes, Karina Stefania Souza. *Influência dos Parâmetros de Usinagem na Resistência à Fadiga de Aços AISI 4140*. 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Potifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

[5] Firat, Mehmet. *A Computer Simulation of Four-Point Bending Fatigue of a Rear Axle Assembly*. Engineering Failure Analysis. 2137-2148p. 2011.

[6] Thomas, Daniel; Whittaker, Mark; Bright, Gary; Gao, Yi. *The Influence of Mechanical and CO2 Laser Cut-Edge Characteristics on the Fatigue Life Performance of High Strengh Automotive Steels*. Journal of Material Processing Technology. 263-274p. 2011.

[7] Caudoux, Mélanie; Facchinetti, Matteo; Raynal, Renaud. *Automotive Stamped Part Fatigue Design*. Fatigue Design and Material Defects. Volume 12, 2014.

[8] Zhao, L.H.; Zheng, S.L.; Feng, J.Z. *Failure Mode Analysis of Torsion Beam Rear Suspension Under Service Conditions*. Engineering Failure Analysis. 39-48p. 2014.

[9] Ross, Sheldon. *Probabilidade: Um Curso Moderno com Aplicações*. 8ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2010.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho desejam agradecer a Guilherme Carneiro e Eduardo David pelo apoio nas atividades que permitiram chegar aos resultados encontrados.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MODELIZACION DE LA RESPUESTA A FLEXION DE PERFILES TUBULARES DE PEQUEÑO ESPESOR

Cazzola Gustavo José, Brunello Mario.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional General Pacheco, Departamento de Ingeniería Mecánica.
Hipólito Irigoyen 288, General Pacheco (B1617FRP), Buenos Aires, Argentina
Correo-e: gjcazzola@gmail.com

RESUMEN

Los tubos de pequeño espesor de sección rectangular y cuadrada son ampliamente utilizados como partes estructurales en automóviles, trenes, máquinas de movimiento de tierra, aviones, etc. Su capacidad de carga muestra complicadas variaciones resultantes de su comportamiento de post-buckling y post-colapso, que está caracterizado por grandes desplazamientos, grandes deformaciones localizadas y no linealidades en el comportamiento del material
.
El presente trabajo tiene como principal objetivo comprender la respuesta a grandes giros de tubos prismáticos de pequeño espesor sometidos a flexión uniaxial. Para lo cual, se comienza realizando un análisis de los diferentes métodos de análisis de mecanismo de colapso existentes. Posteriormente se plantea un modelo numérico, a través de la técnica de los elementos finitos, realizando un modelo no-lineal estático para correlacionar la solución mediante el empleo de dos programas informáticos y de distintos tipos de mallado.

Palabras Claves: *Flexión, rótulas plásticas, perfiles de pequeño espesor, Simulación*

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este análisis es realizar la validación métrica de los programas de cálculo por Elementos Finitos Solidworks versión2015 y Abaqus version 2006 en la comparación de una simulación de un modelo teórico e idéntico y con las mismas condiciones de contorno. El modelo de estudio es tomado del trabajo realizado por Cazzola G., et al [1]. Modelo de ensayo que estudia el comportamiento de la estructura de los ómnibus en caso de vuelco. Y se obtiene el momento de resistente en función del ángulo de giro.

Para la métrica de validación se utilizó el método que se basa en el análisis de magnitud y fase de la forma de una onda por el método de integración punto a punto métrica de Sprague y Geers, del paper “Validation metrics for response histories” [2] de L. Schwer 2006.

2. PLANTEO DEL CASO DE ESTUDIO

La fuerza lateral de las estructuras de los vehículos está condicionada por la capacidad de resistencia a la flexión y de absorción de energía de las vigas utilizadas. Estas vigas se definen con tan poco espesor con el fin de lograr altas inercias con bajo peso. Su rendimiento está muy condicionado a la aparición de las que se llaman las rótulas de plásticas caracterizadas por una curva de momento-ángulo. Como parámetros básicos, este presenta el momento máximo de la resistencia y la pendiente de caída negativa de la resistencia en función de la rotación plástica.

2.1 La deformación de la estructura del vehículo en accidentes de vuelco

El colapso local en la superestructura de vehículos de pasajeros durante el vuelco es provocada casi exclusivamente por los momentos de flexión que exceden la carga local de los componentes. Estos colapsos tienen un papel similar al de las rotulas en un mecanismo y el colapso se produce cuando el número y la distribución de estas rotulas transforma a la superestructura en un mecanismo. La mayor parte de la energía es absorbida por el material en las áreas cercanas a las rotulas plásticas [4]. Hay tres posibles mecanismos de deformación que puede ocurrir en la deformación de los anillos de la estructura del vehículo en un vuelco. [3] (Figura 1).

Tipo A: Las rotulas plásticas se producen en las columnas laterales al nivel del suelo.

Tipo B: En este caso, la estructura tiene un lado enrejado más fuerte, lo que significa la deformación plástica de las columnas laterales se produce a nivel de la ventana.

Tipo C: La rotula plástica de las columnas laterales que impactan con el suelo se forman a nivel del suelo. Sin embargo, las rotulas plásticas de las columnas de los lados opuestos son producidos a nivel de la ventana. Este tipo de mecanismo de deformación puede ser considerado como una combinación de los tipos A y B.

ISBN: 978-987-1676-63-7

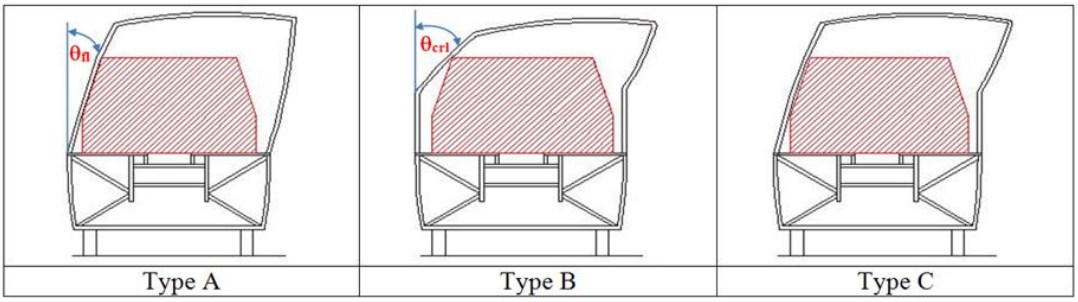


Figura 1.Tipos de mecanismos de deformación en estructura de vehículos para transporte colectivo de pasajeros.

2.2 Ensayo físico

En la figura 2 se muestra el diseño del dispositivo de prueba. La fuerza en el alambre se mide por una celda de carga. El sensor de desplazamiento está montado al lado de la polea. El final del cable del sensor de desplazamiento está unido a un alambre delgado que, a su vez, está unido en al otro extremo a un tornillo fijado a la viga al que está conectado el cable que contiene la celda de carga. Los cables que conectan las celdas de carga y el sensor de desplazamiento están conectados a un amplificador de señal. El amplificador de desplazamiento y de señales de fuerza son sometidas a las condiciones por un convertidor analógico-digital. Por último, la medida señales de fuerza y desplazamiento se envían desde el acondicionador de señal a la computadora.

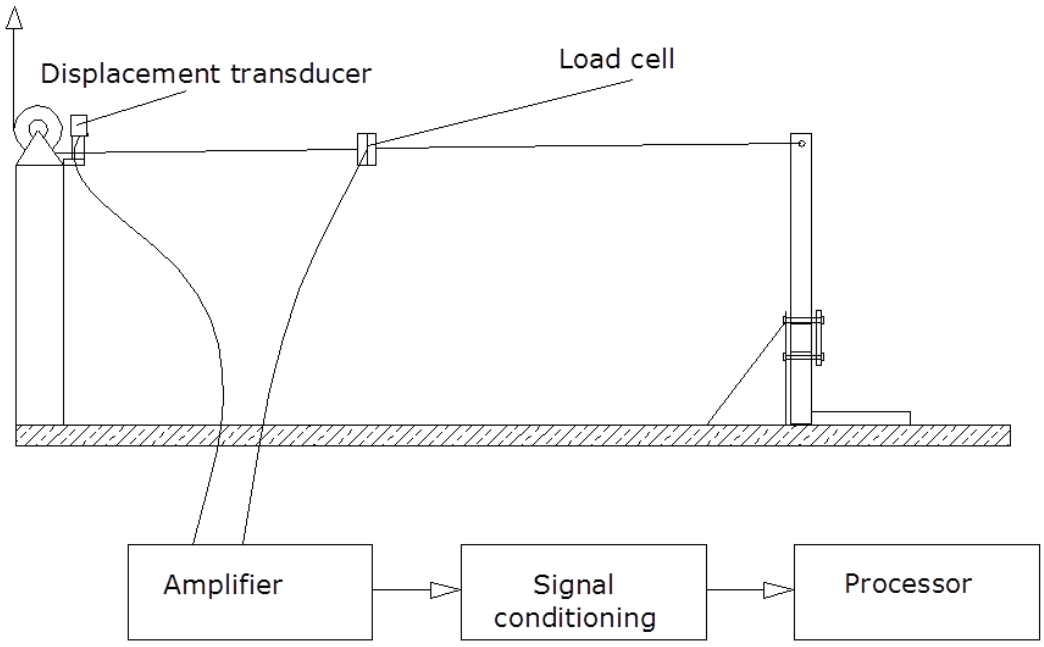


Figura 2. Ensayo estático a flexión y sistema de medición y adquisición de datos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. MODELIZACION POR ELEMENTOS FINITOS

Conforme al trabajo realizado por Cazzola, et al [1], la modelización numérica reproduce el ensayo del comportamiento de la estructura de un ómnibus en caso de vuelco, en la figura 3 vemos la comparativa entre el modelo físico y el numérico.

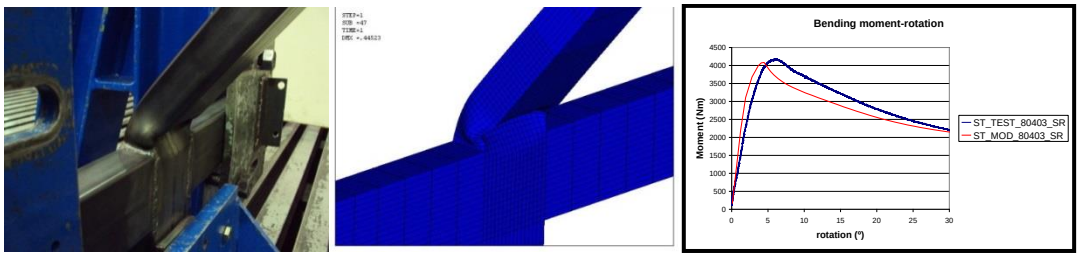


Figura 3. Gráficos comparativos de la deformada y la curva momento giro del ensayo a estático a flexión y el modelo de elementos finitos del perfil 80403.

El modelo a analizar para la validación es de acuerdo a la figura 4.

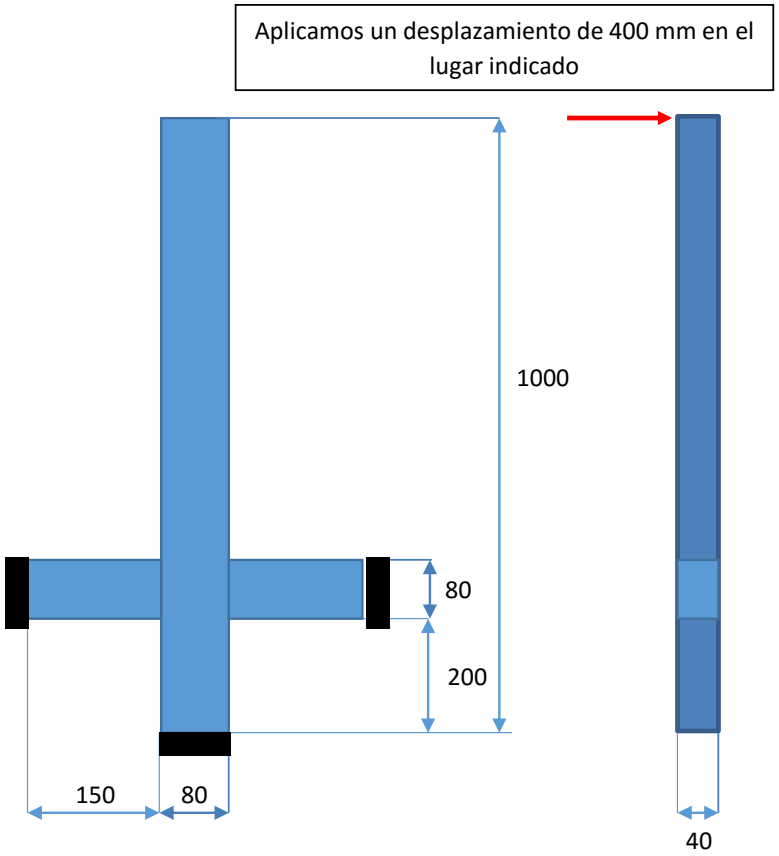


Figura 4. Dimensiones y solicitaciones impuestas al perfil empleado para la validación.

En la parte superior de la viga se aplicó un desplazamiento para simular el ensayo de flexión. El mismo es de 400 mm. Con el objetivo de generar un pandeo. Para luego extraer las reacciones nodales, en los nodos donde se aplicó el desplazamiento, en función del desplazamiento de los nodos.

3.1 Modelización del material.

El material empleado para el análisis es compatible con el ST42, con un módulo de elasticidad longitudinal de 2.100 MPa; tensión limite elástico 275 MPa; tensión última 420 MPa y coeficiente de poisson 0.3. En la figura 5 se muestra la poligonal tensión-deformación del material empleada en el modelo de elementos finitos.

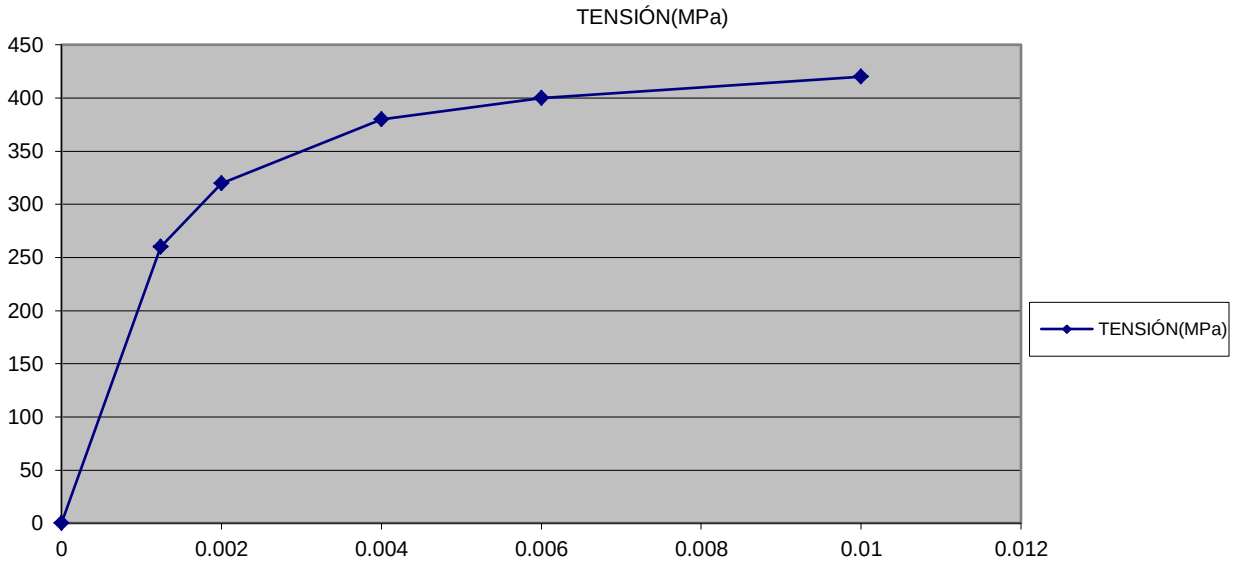


Figura 5. Curva tensión-deformación.

3.2 Mallado

Las vigas verticales y horizontales se modelaron con elementos de placa. En Abaqus con elementos cuadrangulares de cuatro nodos. El tamaño del elemento para el mallado es de 1cm de lado para la zona central de la cruz y de 1x5cm para el resto. En la figura 5 se muestra el tipo de mallado empleado en el programa Abaqus.

ISBN: 978-987-1676-63-7

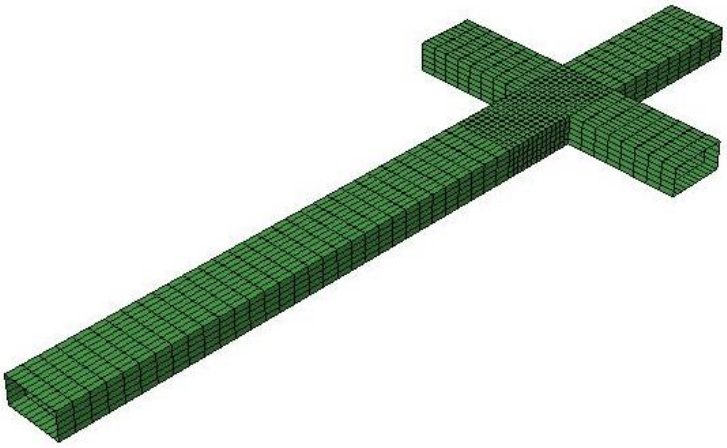


Figura 6. Modelo mallado en Abaqus.

En Solidworks con elementos triangulares de 3 nodos y 6 puntos de integración. El tamaño del elemento para el mallado es de 11,13mm, como se observa en la figura 7.

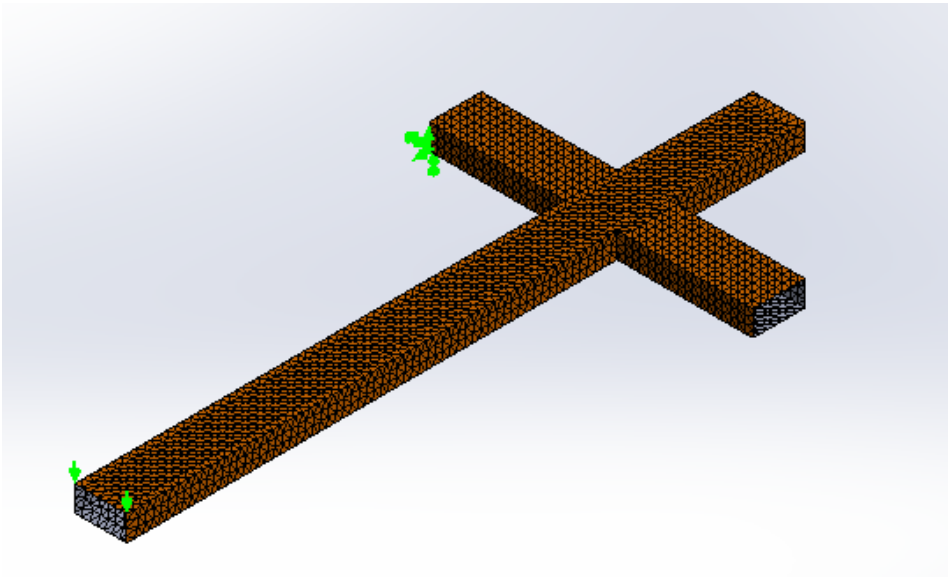


Figura 7. Modelo mallado en Solid Works.

3.3 Método de resolución y aplicación del desplazamiento

Se realizó un análisis estático no lineal, debido a las fuentes de no linealidades presentes del material y las grandes deformaciones. Para resolver el análisis estático no lineal y utilizó el método de Newton-Raphson full con los siguientes incrementos de paso:

ISBN: 978-987-1676-63-7

- En Abaqus se realizó con un time step de 0,1 a 1 en 400 incrementos.
- En SolidWorks con un time step de 0,01 a 0,05 en 200 incrementos.

4 DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

Se analizaron las deformaciones en ambos casos y se obtuvieron los momentos resistentes en función de la rotación utilizando el análisis del paper [1] de G.Cazzola. Como podemos apreciar en las figuras 8 y 9 las deformadas en ambas simulaciones son similares.

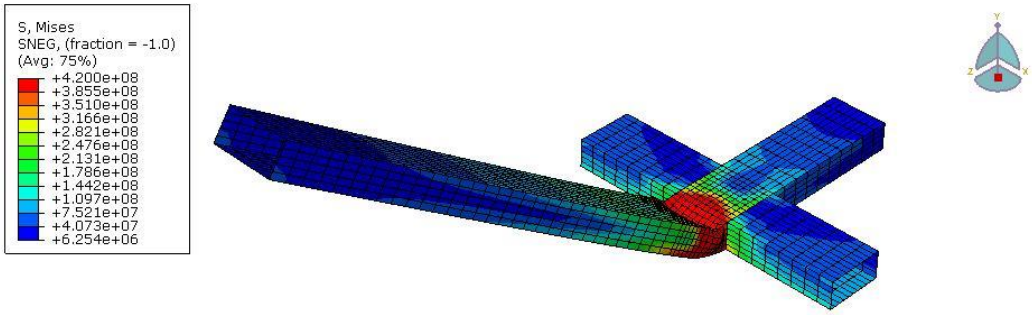


Figura 8. Deformación obtenida con el programa Abaqus.

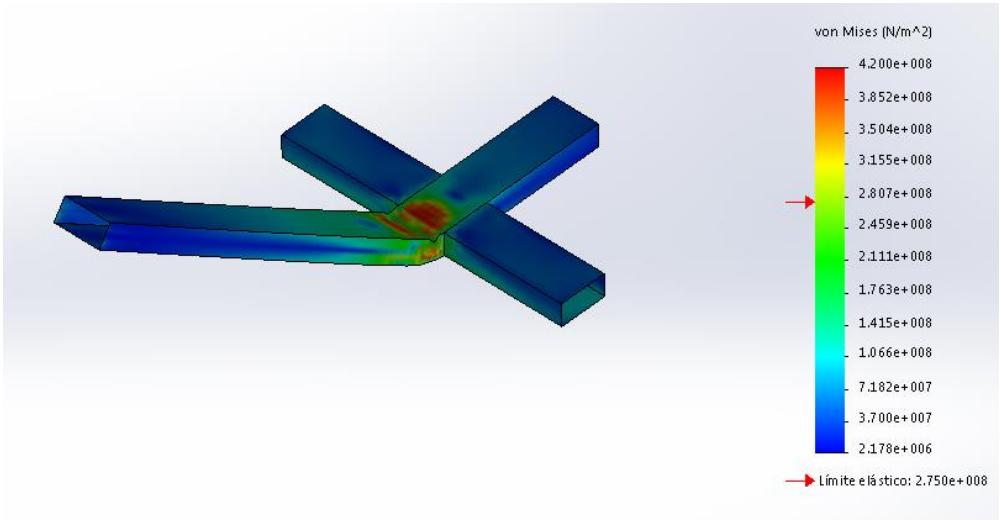


Figura 9. Deformación obtenida con el programa Solid works.

En la figura 10, se muestra el momento de reacción en los nodos (Nm), eje de ordenadas, en función del ángulo de giro(°), eje de abscisas.

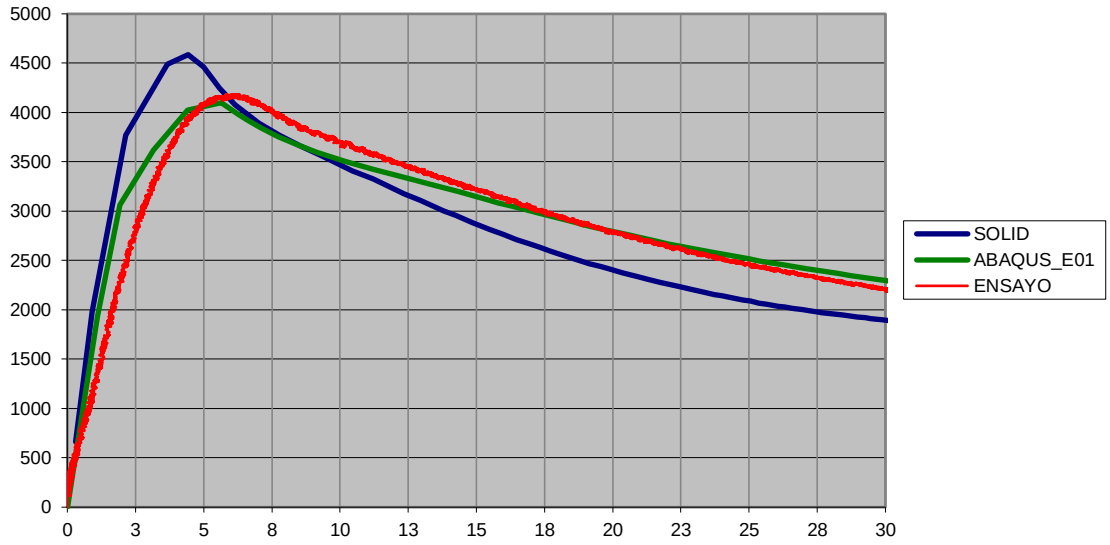


Figura 10. Curvas comparativas momento-giro del ensayo estático a flexión y los modelos de elementos finitos.

La diferencia que podemos apreciar en el periodo elástico es debido a que los elementos planos triangulares son más rígidos que los cuadrangulares.

5. MÉTRICAS DE VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

La validación de las métricas para las respuestas históricas se pueden ser agrupadas en dos grandes categorías: las basadas en un punto a punto de comparación, y las que utilizan otras bases de comparación. Ambas categorías cuantifican la forma de la onda (magnitud) y el tiempo de llegada (fase) contribuido a la evaluación global de la coincidencia. Normalmente las métricas de magnitud y fases separadas son desarrolladas, basadas en cualquiera de las dos integraciones de tiempo normalizados de las formas de onda, o diferencias de punto inteligente entre una medición y su correspondiente valor calculado.

Entonces la magnitud y métricas de fase se combinan para proporcionar un único valor que combina las diferencias de magnitud con las correspondientes diferencias de fase. Los valores pequeños de la métrica combinada indican buena coincidencia, y los números más grandes indican coincidencia más pobre.

5.1 Métrica de Sprague y Geers

Con el fin de evaluar el desempeño de los modelos de elementos finitos, las métricas de validación usadas fueron las propuestas por Sprague y Geers [5]. Si Mabaqus (θ) es la función del modelo en Abaqus y Msolid (θ) es la función del modelo en SolidWorks, entonces las integrales de tiempo se definen como:

ISBN: 978-987-1676-63-7

$$vmm = (\theta_f - \theta_i)^{-1} * \int_{\theta_i}^{\theta_f} (M_{solid}(\theta))^2 . d\theta$$

$$vcc = (\theta_f - \theta_i)^{-1} * \int_{\theta_i}^{\theta_f} (M_{abaqus}(\theta))^2 . d\theta \quad (1)$$

$$vmc = (\theta_f - \theta_i)^{-1} * \int_{\theta_i}^{\theta_f} \left[M_{solid}(\theta) * M_{abaqus}(\theta)\right] d\theta$$

vmm es la integral de la curva de la simulación en Solidworks, vcc es la integral de la curva de la simulación en Abaqus y vmc es la integral de la combinación de las simulaciones en Solidworks y Abaqus.

Donde θi < θ < θf es el intervalo de rotación en el historial de tiempo analizado. La magnitud del error está dado por:

$$Msg = \sqrt{\frac{vcc}{vmm}} - 1 \quad (2)$$

El error de fase está determinado por:

$$P = \frac{1}{\pi} cos^{-1}\left(\frac{vmc}{\sqrt{vmm\ vcc}}\right) \quad (3)$$

Finalmente Geers, incluye el factor del error global como:

$$Csg = \left(\sqrt{Msg^2 + P^2}\right. \quad (4)$$

Los valores obtenidos en el estudio se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Error de magnitud, fase y combinado de los modelos de elementos finitos.

Error en Magnitud (Msg)	Error de fase (P)	Error combinado (Csg)
0,027290289 (2.73%)	0,035955651 (3.60 %)	0,045139437 (4.51 %)

Todos los errores son inferiores al 5% incluido el combinado. Por lo tanto podemos considerar que existe una buena correlación entre ambas simulaciones.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que los dos programas poseen una muy buena aproximación del ensayo estático a flexión en la curva momento-giro. El modelo en solids Works presenta una mayor rigidez a flexión en la zona elástica hasta alcanzar el momento máximo, en la zona plástica presenta una menor resistencia respecto al ensayo físico. El modelo en Abaqus presenta una rigidez a flexión menor que el modelo en Solid Works en la zona elástica hasta alcanzar el

momento máximo. En la zona plástica el modelo en Abaqus presenta un mejor resultado que el modelo en Solid Works, acercándose más a la curva de ensayo.

7. CONCLUSIONES

En virtud de los resultados obtenidos, se aprecia que el modelo realizado con el programa Abaqus presenta una mejor aproximación a la curva de ensayo respecto al modelo en Solid Works. Esto se refleja en el momento máximo y la curva de deformación plástica. Las diferencias encontradas en los resultados arrojados por los modelos de elementos finitos radican especialmente en el tipo de malla empleada. Por lo tanto es conveniente utilizar para el mallado elementos cuadrangulares de cuatro nodos como los empleados en el modelo de elementos finitos realizado con Abaqus.

8. REFERENCIAS

[1] G.Cazzola, Study of the bending response of metal foam-filled beams applied to enhance the rollover behaviour of coach structures, International Journal of Crashworthiness, 2013

[2] L. Schwer, Validation metrics for response histories: perspectives and case studies, Engineering with Computers, 2006

[3] E.Alcala Fazio, Optimizacion de las superestructuras de autobuses y autocares sometidos a vuelco lateral, Ph.D. diss., Polythecnic University of Madrid, Spain, 1997.

[4] A. García Gracia, Estudio teórico y experimental del comportamiento de la superestructura de los vehículos de grandes dimensiones para el transporte de pasajeros bajo la acción de vuelco lateral, Ph.D. diss., Polytechnic University of Madrid, Spain, 1990.

[5] M.A. Sprague and T.L. Geers, A spectral-element/finite element analysis of a ship-like structure subjected to an underwater explosion, Compt. Methods Appl. Mech. Eng.195 (2006), pp. 2149–2167.

[6] Tjalling J. Ypma, Historical development of the Newton-Raphson method, SIAM Review 37 (4), 531–551, 1995.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA PREDICCIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS POR EL TRÁFICO EN ESTRUCTURAS

Ricardo D. Quinteros [1], Sergio Oller [2] y Liz G. Nallim [1]

[1] CONICET (INIQUI). Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina
correo-e: rdquinteros@conicet.gov.ar
[2] UPC. Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona Tech) – CIMNE, ESPAÑA

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estudio de la influencia de las vibraciones inducidas por el tránsito en estructuras. El desarrollo de una herramienta numérica, basada en el método de los elementos finitos, permite modelar este problema para así predecir y medir la influencia y analizar la mitigación del fenómeno de vibración y ruido por vibración. Para ello se realiza un modelo de elementos finito global (que incluye el modelado de la estructura principal, terreno y edificios circundantes), con la finalidad de tener resultados orientativos del conjunto, incluyendo sus condiciones de contorno. Un punto clave en el análisis resulta de establecer las acciones ocasionadas por el tráfico teniendo en cuenta las particularidades que éste origina, a través de impulsos que definirán los estados de carga a aplicar al programa de elementos finitos. Para el estudio y simulación del fenómeno mencionado, se considera un edificio considerado patrimonio histórico. Se analizan resultados de aceleraciones medidas en el lugar en el edificio y el espacio circundante. La metodología propuesta permite tener en cuenta las características tridimensionales del problema con un razonable esfuerzo computacional. Tener una herramienta numérica apropiada permite determinar la respuesta dinámica de estructuras. Además, será posible modelar alternativas con el fin de proponer las soluciones más convenientes para mitigar el efecto de las vibraciones generadas.

Palabras Claves: *Elementos Finitos, Vibraciones, Tránsito.*

1. INTRODUCCIÓN

Existen en la naturaleza numerosas fuentes de vibraciones. Con el desarrollo progresivo de la tecnología, las fuentes de vibración se han multiplicado y se han convertido en una preocupación para los residentes de edificios modernos, así como para aquellos que trabajan, visitan o desean preservar edificios históricos de valor patrimonial [1,2]. En particular, las vibraciones inducidas por el tráfico (el cual se ha incrementado de manera exponencial en los últimos años) se han convertido en un importante problema ambiental. Los problemas de las vibraciones inducidas por el tráfico sobre los edificios históricos tienen su origen en características comunes en distintas ciudades del mundo: el deterioro de las calzadas, la concentración de rutas de transporte público en calles adyacentes, etc. [3,4].

Puede considerarse que existen dos maneras en las cuales el tráfico puede inducir vibraciones en las edificaciones circundantes: vibraciones propagadas por el suelo y vibraciones propagadas por el aire [5]. Estas últimas son ondas sonoras de baja frecuencia que pueden excitar principalmente a las componentes no estructurales más livianas del edificio. Difícilmente estas vibraciones produzcan daños arquitectónicos o estructurales en las edificaciones [6,7]. A su vez, las vibraciones producidas por el tráfico se suelen caracterizar mediante tres componentes: la fuente, el medio de transmisión y el receptor [1]. Identificar y comprender cada uno de ellas simplifica el examen de su causa y la posterior discusión de las medidas correctivas. La fuente corresponde al contacto de los vehículos con la calzada cuando existen imperfecciones en ella, fuerzas de impacto y fuerza de frenado, lo que genera ondas que se propagan hacia abajo y radialmente [5]. Las principales variables que tienen efecto en las amplitudes de vibración son la velocidad del vehículo, su peso y tipo de suspensión, la rugosidad de la superficie de rodadura, y la rigidez de la superficie de desgaste y la sub-base. En cuanto al medio de transmisión, las ondas generadas se propagan por el suelo, van atenuándose con la distancia y el amortiguamiento natural del material. Sin embargo, a veces pueden ser canalizadas en una dirección determinada, debido a estratificaciones del suelo, de tal manera que puede haber incluso una amplificación [1]. El receptor son los edificios en general y sus ocupantes. Una vez que las ondas alcanzan las fundaciones de las construcciones, pueden amplificarse hasta cinco veces en su propagación hacia las plantas superiores, dependiendo de la naturaleza de la vibración (su frecuencia) y la susceptibilidad a la vibración de los elementos edilicios (vigas, paredes, losas, ventanas, etc.) que se rigen por su frecuencia natural y amortiguación [8].

Puede preocupar la posibilidad de efectos adversos a largo plazo de vibraciones en edificios históricos, especialmente aquellos que se encuentran en una condición débil. Estas vibraciones pueden no representar una amenaza inminente; pero su repetición, su incremento y su persistencia en el tiempo pueden contribuir a procesos de deterioro [2].

El efecto de las vibraciones del tráfico sobre los edificios ha sido objeto de estudio en los últimos años [3,5,9-10]. Estos trabajos están referidos especialmente a determinaciones

ISBN: 978-987-1676-63-7

experimentales, cuyos resultados pueden ser utilizados para evaluar si las mediciones obtenidas se encuentran dentro de valores aceptados por alguna normativa [11-12], o para usar valores de aceleraciones a modo de excitación en una edificación modelada numéricamente [13].

Resulta interesante, además, el estudio de la atenuación de las vibraciones, con el propósito de minimizar su incidencia a través de diversas soluciones propuestas, tales como el uso de pilares [14,15], zanjas rellenas con suelos estabilizados [16] y pantallas de atenuación [17,18].

Es importante notar que los modelos que emplean herramientas numéricas para predecir el comportamiento ante acciones dinámicas ocasionadas por el tráfico son escasos o, dependiendo del tipo de estructuras (especialmente mampostería), prácticamente inexistentes. Lo mismo se puede concluir en referencia a modelos numéricos que permitan establecer sistemas de mitigación.

2. OBJETIVOS Y CONTENIDOS DEL TRABAJO

Por las razones expuestas en la sección previa, es muy importante desarrollar herramientas numéricas que permitan abordar el tratamiento de las vibraciones inducidas por el tráfico en edificios históricos, estudiar las consecuencias sobre los mismos (daño en particular), y proponer diferentes alternativas de solución acordes al lugar de emplazamiento y, en caso de existir, a las normativas correspondientes. En este trabajo se propone un procedimiento general que permite estudiar la influencia de las vibraciones inducidas por el tráfico en estructuras. Para ello, se desarrolla y calibra una modelización computacional basada en el Método de los Elementos Finitos, que permite estudiar el fenómeno de vibración. El modelo de elementos finitos se caracteriza por ser global, abarcando el edificio en estudio, el terreno y los edificios circundantes. De esta manera, se logra tener resultados orientativos del conjunto incluyendo sus condiciones de contorno. Asimismo, se establecen las acciones ocasionadas por el tráfico, teniendo en cuenta las particularidades que éste origina, a través de impulsos que definen los estados de carga que se aplican a este programa. En una etapa posterior y como continuidad de este trabajo se plantea modelar diferentes alternativas con el fin de proponer las soluciones más convenientes para mitigar el efecto de las vibraciones generadas.

Para este estudio se ha elegido la torre campanario de la Basílica Menor y Convento de San Francisco de la ciudad de Salta (Argentina), que por su importancia, integra el corredor histórico más importante de la ciudad. Fue declarada Monumento Histórico Nacional en 1941. La torre campanario, realizada en cuatro cuerpos superpuestos que se aligeran hacia arriba y culminan en un remate, tiene una altura aproximada de 52 m y es considerada como una de las más altas de Hispanoamérica como cuerpo aislado (Figura 1).

ISBN: 978-987-1676-63-7



Figura 1. Vista satelital y vistas del Campanario de la Basílica de San Francisco

A efectos de garantizar la fiabilidad del procedimiento numérico desarrollado se realizan comparaciones con resultados experimentales obtenidos previamente [19]. Dichos resultados son respuestas dinámicas temporales y frecuenciales, en desplazamientos y aceleraciones, en distintos niveles del edificio y diferentes puntos del medio circundante. Asimismo, se han procesado tanto los resultados experimentales, como los numéricos para obtener lo valores en decibelios. La modelación numérica llevada a cabo en este trabajo implica un estudio de desarrollo e investigación sobre la valoración numérica de la transmisión de vibraciones desde una fuente hasta diversos puntos situados en el edificio seleccionado para el análisis. Para ello se ha considerado una simulación numérica basada en un modelo de elementos finitos tridimensionales que incluye el edificio y el entorno que lo rodea (terreno y otros edificios), siendo perfectamente capaz de capturar las características dinámicas del conjunto, con sus condiciones de contorno. El modelo ha sido solicitado por la acción dinámica que genera el tráfico en la intersección de las esquinas donde éste se emplaza y que se ha definido en este trabajo. Se han estudiado las vibraciones (en m/s^2 y dB) producidas en puntos preestablecidos del edificio, se han comparado los resultados obtenidos y concluido sobre ellos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Elementos finitos utilizados

La malla utilizada para el cálculo se compone de dos tipos de elementos (Láminas: triangulares y Volumen: hexaedros) [20], en función de la zona que debe discretizarse. Los elementos de láminas empleados, sin rotaciones, permiten el ensamblaje con los elementos sólidos [21]. Básicamente, los elementos de lámina se utilizan en el edificio, en las paredes y en la calzada. Por otro lado, los elementos de volumen se utilizan en el terreno y en los elementos situados en el borde que ejercen una función de absorción de las vibraciones para que estas, cuando lleguen al borde del modelo, no se reflejen nuevamente.

La discretización del dominio total se ha realizado con 24824 elementos, de los cuales 19608 son hexaedros y 5216 elementos triangulares, con un total de 24537 nodos.

Para el desarrollo del modelo se ha empleado el programa de elementos finitos ComPack [22].

La malla de elementos finitos

El sector analizado está compuesto por las calzadas de las dos calles perpendiculares que rodean el edificio, el terreno circundante y los edificios contiguos (Figura 1.a). Se ha modelado el terreno homogeneizado, la calzada pavimentada y los edificios circundantes; con el objetivo de analizar el comportamiento dinámico de la torre del campanario y validar el procedimiento numérico propuesto en este trabajo, a partir de la acción dinámica producida por el tráfico. Esto permitirá, en posteriores análisis, estudiar diferentes soluciones para mitigar el efecto de la vibración en diferentes construcciones.

La extensión de terreno considerado en el modelo para el estudio, es un bloque de 119 m en la dirección paralela a la calle Córdoba (ver Figura 1.a), 129 m en la calle perpendicular (Calle Caseros) y de 30 m de profundidad. A estas dimensiones hay que añadir 2 m en cada dirección, que corresponden al material con capacidad dinámica absorbente. En la Figura 2 se muestra una vista general en 3D del modelo de elementos finitos utilizado. Como se dijo en la sección previa, los edificios se han discretizado utilizando elementos de lámina sin rotación, sublaminados constitutivamente y con capacidad para considerar en el análisis las solicitaciones de flexión, cortante y torsión [23]. La tecnología de elementos utilizada, permite realizar una detallada representación de todas las subestructuras que componen el modelo global (terreno homogeneizado, edificio con muros de mampostería, calzada, cimentaciones, etc.). Toda esta tecnología está contemplada en el programa de elementos finitos explícito ComPack desarrollado por CIMNE y QUANTECH [22].

Restricciones cinemáticas

Se han restringido los desplazamientos de los nodos pertenecientes al borde exterior de los elementos absorbentes en la dirección perpendicular a la superficie a la que pertenecen.

ISBN: 978-987-1676-63-7

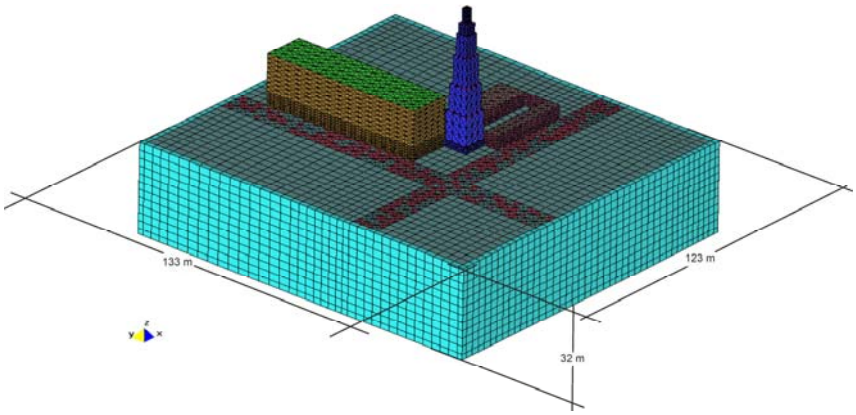


Figura 2. Vista general en 3D del modelo de elementos finitos

4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Las características y propiedades mecánicas de los materiales utilizados en todo el modelo de elementos finitos se detallan en la Tabla 1. Estos materiales resultan de la composición que se realiza con la teoría de Homogeneización [24] y las propiedades obtenidas por Toledo et al [25].

Tabla 1. Características mecánicas de los materiales utilizados en las distintas zonas del modelo

Nombre	Modulo elástico [MPa]	Coeficiente de Poisson	Densidad [Kg/m^3]	Periodo [s]	Amplitud [%]
Edificio-1-Pared	1200	0.3	1960	1,04	73.015
Edificio-2-Pared	1200	0.3	1960	1,04	73.015
Edificio-1-Losa	3000	0,3	2500	1,04	73.015
Edificio-2-Losa	3000	0,3	2500	1,04	73.015
Campanario Pared	900	0.15	1960	1,04	73.015
Campanario Losa	2390	0.22	2500	1,04	73.015
Calzada	34210	0,22	3200	0.7	73.015
Terreno	35	0,35	2500	0.68	13.86
Absorbente	10	0,22	1800	0,479	2,32E-04

5. ACCIONES PRODUCIDAS POR EL TRÁFICO

Con el fin de analizar la influencia del tránsito sobre la estructura, se definen los estados de cargas debido al paso de los vehículos que vienen dados por el impacto de las ruedas en las cámaras de inspección de las bocacalles, badenes y fuerzas de frenado. La zona de estudio coincide con el recorrido de varias líneas de colectivos urbanos que circulan por una de las calles de la intersección. Existe un semáforo en la mencionada esquina, y al ser las calles de mano única, implica que el sentido de los estados de carga coincide con el sentido de circulación y no se superponen. Las irregularidades están situadas en la intersección de las calles perpendiculares, siendo un total de 6 como puede observarse en la vista en planta del modelo de la Figura 3. Los resultados para el estudio en el periodo de tiempo analizado (15

ISBN: 978-987-1676-63-7

segundos), se han obtenido para una velocidad de circulación de 30 km/h, lo que determina los pulsos para la aplicación de las cargas en el tiempo mostrados en la Figura 4, y considerando una intensidad de las mismas correspondiente a los pesos de los vehículos (aproximadamente 11 tn para un colectivo urbano lleno y 1,5 tn para un automóvil) se obtienen las acciones ocasionadas por el tránsito que actúan en los puntos mencionados.

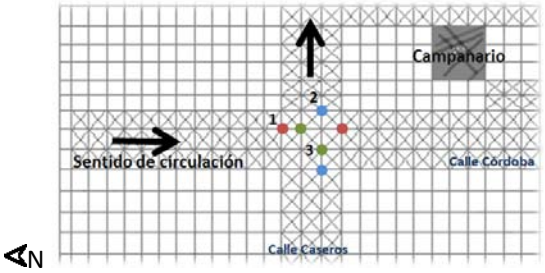


Figura 3. Ubicación de puntos de aplicación de cargas. ***1.*** Badenes en sentido de circulación norte-sur. ***2.*** Badenes en sentido de circulación oeste-este. ***3.*** Cámaras de inspección

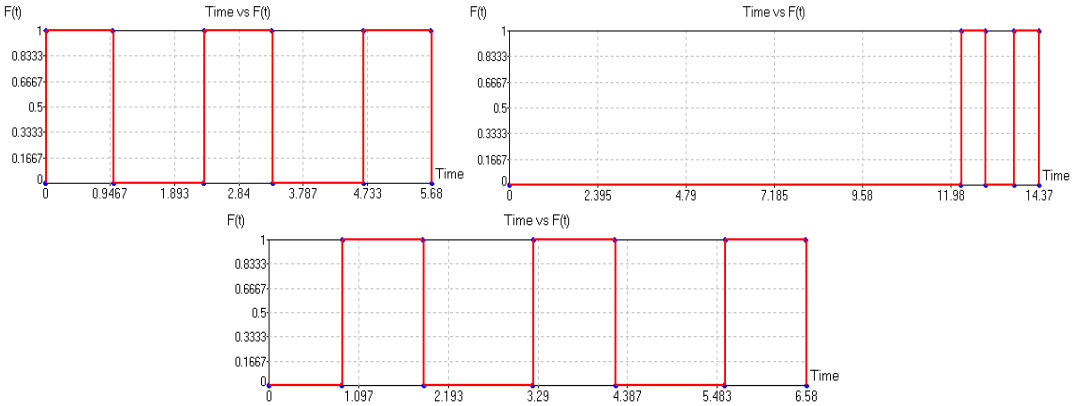


Figura 4. Pulsos para cargas correspondientes a ***1. 2. y 3.*** (de la figura anterior) respectivamente

6. RESULTADOS

A efectos de validar el modelo numérico, se comparan los resultados obtenidos mediante la simulación numérica del fenómeno con los obtenidos mediante mediciones experimentales [19]. Los puntos de comparación son aquellos correspondientes a las mediciones en los niveles +39.34 m (último punto accesible), +33.10 m (segunda campana), +23.86 m (primera campana), +17.84 m (nivel descanso) y +0.00 m (Nivel de terreno) (ver Figura 1.b).

En la Figura 5, a modo de ejemplo, se muestra la comparación de un acelerograma obtenido de manera numérica con aquél obtenido in-situ. El acelerograma resulta del punto de medición ubicado a nivel del terreno, y corresponde a las aceleraciones en la dirección *z* (ver Figura 2), y muestra un ajuste favorable para el periodo de 15 segundos correspondiente a la simulación numérica.

ISBN: 978-987-1676-63-7

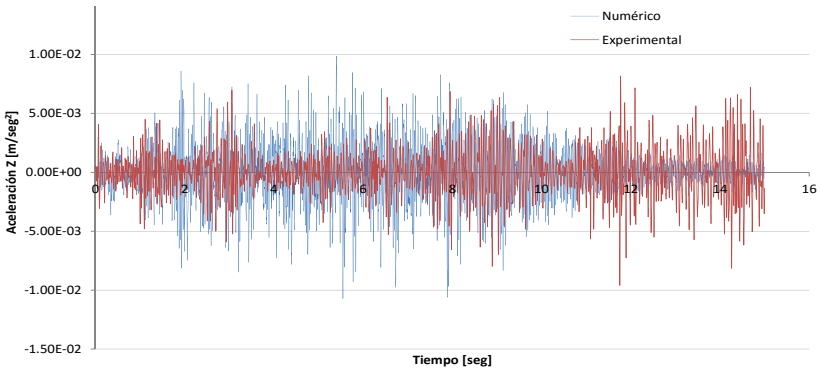


Figura 5. Comparación de Aceleración vs. Tiempo correspondiente a la medición a nivel de terreno

6.1. Respuestas Frecuenciales y Decibelios

En el modelado de vibraciones inducidas por el tránsito en edificios, resulta indispensable verificar que los niveles de vibración obtenidos no excedan los valores tolerables, de acuerdo con normativas vigentes, y con los protocolos y procedimientos de medida establecidos. Para ello es necesaria la utilización de una herramienta complementaria para analizar las intensidades de vibración en los puntos objeto de estudio. Existen varias normas nacionales e internacionales que ofrecen criterios para la exposición del ser humano y edificaciones a las vibraciones, tales como la Norma Internacional ISO 2631 (Parte 1 y 2) y su versión nacional, la norma IRAM 4078, el Instituto de Normalización Alemana DIN define límites admisibles de vibraciones para edificios en la reglamentación DIN 4150, la normativa Suiza SN 640312, el Real Decreto 1367/2007, entre otras. A este propósito se ha desarrollado un programa de cálculo y se describen a continuación los principales conceptos y técnicas implementadas relacionadas con la evaluación de los niveles de vibración.

La norma ISO 2631 define los requerimientos generales para la medida y análisis de vibraciones mecánicas y de choques, y para la evaluación de la exposición humana a las mismas. Establece procedimientos de medida de vibraciones y evaluación de sus niveles. La normativa establece diferentes métodos de evaluación y sus condiciones de aplicabilidad. El método implementado se conoce como "*running r.m.s*". Este método considera la presencia de choques o vibraciones transitorias usando la integración en pequeñas ventanas temporales. La magnitud de vibración se define como el valor máximo de la vibración transitoria (*maximum transient vibration value MTVV*) dado como el valor máximo en el tiempo de $a_w(t_0)$ definido como:

$$a_w(t_0) = \sqrt{\left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{\tau} \left[a_w(t) \right]^2 dt \right\}} \tag{1}$$

donde $a_w(t_0)$ es la aceleración instantánea con ponderación de frecuencia; τ es el intervalo de integración para realizar el promedio, es decir la longitud de la ventana; t es la variable de

integración y t_0 es el instante de tiempo de observación o tiempo instantáneo.

La forma en que las vibraciones afectan a las personas depende de su contenido frecuencial. La Norma ISO 2631 establece la función de ponderación de frecuencia para vibraciones en el interior de edificaciones. El dato de entrada es la historia temporal de la aceleración. Esta historia temporal es filtrada mediante los filtros adecuados y se obtienen las respuestas en amplitud de estos filtros en el dominio de la frecuencia. Las Figuras 6 y 7 muestran los valores MTVV con ponderación de frecuencia, en m/s^2 y en Decibelios (dB), para las frecuencias entre 1 y 125 Hz para los resultados obtenidos de manera numérica e in-situ a nivel de terreno y en el punto de medición más alto del campanario respectivamente.

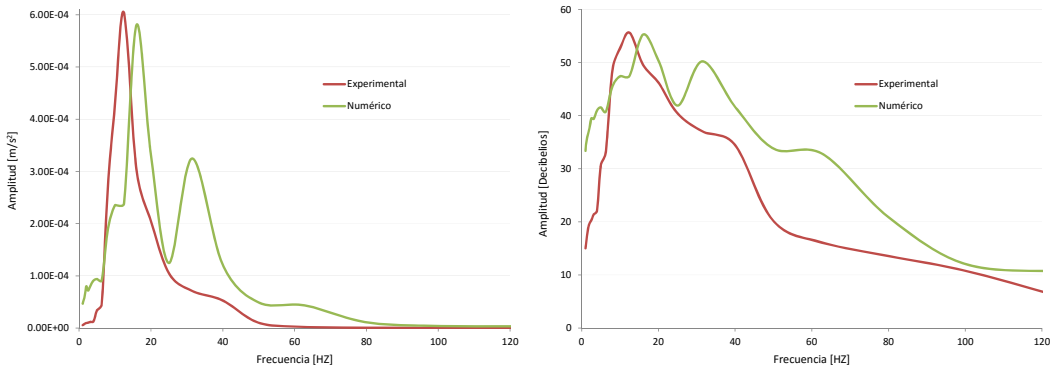


Figura 6. Comparación de aceleraciones MTVV con ponderación de frecuencia, en m/s^2 y en Decibelios (dB) correspondiente a la medición a nivel de terreno

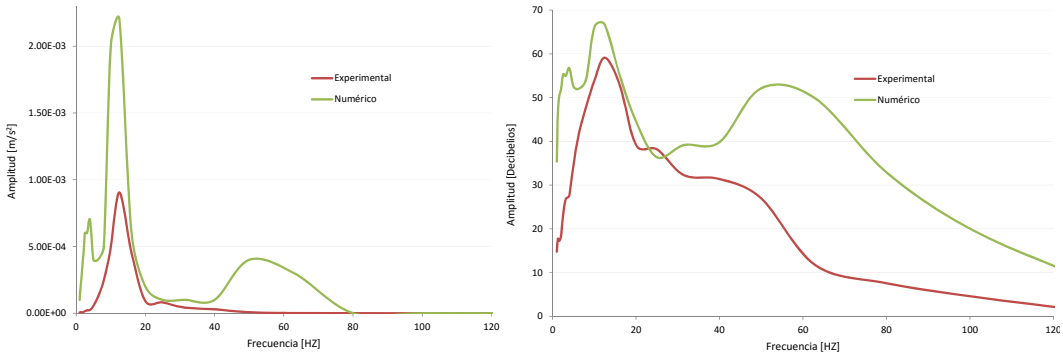


Figura 7. Comparación de aceleraciones MTVV con ponderación de frecuencia, en m/s^2 y en Decibelios (dB) correspondiente a la medición en el nivel más alto

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un procedimiento numérico general que permite evaluar las vibraciones inducidas por el tráfico en estructuras. Para el análisis se ha tomado la torre del Campanario de la Iglesia San Francisco, de la ciudad de Salta, un edificio histórico de valor patrimonial. Se puede observar que el modelo global de elementos finitos que se ha desarrollado describe razonablemente la estructura analizada junto con sus cimentaciones, el terreno circundante y la calzada. Asimismo, la simulación propuesta en este trabajo para la

acción dinámica inducida por el tráfico, describe correctamente la realidad. El modelo, la acción dinámica que simula tráfico y el procedimiento numérico de cálculo de la respuesta, muestra una gran capacidad para analizar las vibraciones dinámicas en todos los puntos del edificio en que se desee. Los resultados obtenidos con el modelo de elementos finitos aquí utilizado son coherentes con las mediciones llevadas a cabo "in-situ" por Kohan y Gea [19], lo cual permite una continuidad de la metodología planteada para modelar diferentes alternativas, proponiendo las soluciones más convenientes a efectos de mitigar el efecto de las vibraciones generadas.

Se ha supuesto que el tránsito vehicular aplica dos tipos de carga. Una, fundamentalmente vertical, se debe a las irregularidades en la calzada; la otra, con componente vertical y horizontal, se debe a las acciones de frenado.

Si resultara necesaria una mayor precisión en el cálculo de las frecuencias, aceleraciones, así como en los niveles de decibelios, etc., sería suficiente un modelo con más nivel de detallado (cerramientos, aberturas, tabiques, etc.) y una discretización más fina, lo cual solo repercutiría en un mayor coste computacional

Del análisis de las diversas normativas y criterios para la evaluación de la exposición de las vibraciones, se puede concluir de los resultados obtenidos que la magnitud de dichas vibraciones se encuentran por debajo de los límites de daño potencial edilicio, los valores de aceleraciones máximas se consideran no molestos y además no se supera el nivel de 75dB establecido por normativas internacionales. Es importante considerar que esta condición varía con el tiempo, por lo que resulta conveniente realizar evaluaciones periódicas que permitan valorar el estado del edificio en estudio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Rainer J.H. Effect of vibrations on Historic Buildings: An Overview. The Association for Preservation Technology Bulletin Volume XIV, No. 1. p. 2 -10. 1982

[2] Clemente P., Rinaldis D. Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations. Soil Dynamics and Earthquake Eng. Volume 17, Issue 5, Pages 289–296. 1998

[3] Crispino, M., y D'apuzzo, M. "Measurment and Prediction of Traffic-Induced Vibrtions in a Heritage Building". Journal of Sound and Vibration, 246(2), 319-335. 2001

[4] Kliukas, R., Jaras, A., y Kacianuaskas, R. "Investigation of Traffic-Induced Vibration in Vilnius Arch-Cathedral Belfry". Transport, 23(4), 323-329. 2008

[5] Hajek J, Blaney C, y Hein D. Mitigation of Highway Traffic-Induced Vibration. 2006 Annual Conference of the Transsportation Association of Canada, Pr. Eduard Island. 2006

[6] Watts, G. R. "Traffic Vibration and Building Damage". Research Report 146, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, Crowthorne, Berkshire. 1988

[7] Watts, G. R. "Traffic Induced Vibrations in Buildings". Research Report 246, Transportation and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire. 1990

[8] Mhanna M., Sadek M, Shahrour I. Numerical modeling of traffic-induced ground vibration. Computers and Geotechnics 39116–123. 2012

[9] François S, Pyl L, Masoumi H, Degrande G.The influence of dynamic soil–structure interaction on traffic induced vibrations in buildings.Soil Dyn.& Earthquake Eng.27:655–674. 2007

[10] Hunaidi, O., y Tremlay, M. “Traffic-Induced Building Vibrations in Montréal”. Canadian Journal of Civil Engineering, 24(5), 736-753. 1997

[11] Hunaidi O. Traffic Vibrations in Buildings. Construction Technology Updates - IRC, 39. 2000

[12] Hanson, C., Towers, D. A., y Meister, L. D. “Transit Noise And Vibration Impact Assessment”. FTA-VA-90-1003-06, Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportantion. 2006

[13] Hao, H., Ang, T. C., y Shen, J. “Building Vibration to Traffic-Induced Ground Motion”. Building and Enviroment, 36, 321-336. 2001

[14] ZhifeiShi J.H. Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for plane waves. Journal of Sound and Vibration 332: 4423–4439. 2013

[15] Lu J, Xu B, Wang J. A numerical model for the isolation of moving-load induced vibrations by pile rows embedded in layered porous media.Inter. Jour. of Solids and Struct. 46: 3771–3781. 2009

[16] Korkmaz K, Ay Z, Keskin S & Ceditoglu D. Investigation of Traffic-induced Vibrations on Masonry Buildings in Turkey and Countermeasures.Journ. of Vibr. and Control 17(1)3–10. 2011

[17] Massarsch K. R. Mitigation of Traffic-induced Ground Vibrations. 11th ICSDEE and the 3rd ICEGE Proceedings. Berkeley, California, USA. 2004

[18] Andersen L. and Augustesen A.H. Mitigation of traffic-induced ground vibration by inclined wave barriers -a three-dimensional numerical analysis. ICSV16, Kraków, Poland. 2009

[19] Kohan P. H. y Gea S. B. Efecto de las Vibraciones Producidas por el Tráfico sobre la Torre de Campanario de la Basílica San Francisco. Memorias del 9º EIPAC11.Salta, Argentina. 2011.

[20] Zienkiewicz O. & Taylor LR. The finite element method, McGraw-Hill, London,England,1991

[21] Flores FG & Oñate E. A rotation-free shell triangle for the analysis of kinked and branching shells. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 69 (7), 1521-1551. 2007

[22] CIMNE and Quantech-ATZ “COMPack”.Innovative Finite Element Code for non linear analysis of composite structures. Explicit finite element. 2008 http://tts.cimne.com/compack/

[23] Martinez X, Rastellini F, Flores F, Oller S, Oñate E. Computationally optimized formulation for the simulation of Composite materials and delamination failures.Comp.Part B:Eng.42,134–144.2010

[24] Quinteros, R., Oller, S., Nallim, L. Nonlinear homogenization techniques to solve masonry structures problems. Composite Structures, 94: 724–730. 2012

[25] Toledo M.W., Vargas I., Gea S.B., Nallim L.G. Características dinámicas del campanario de la basílica de San Francisco (Salta). Memorias del 9° EIPAC11. Salta, Argentina. 2011

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los integrantes del Aula CIMNE-ESEIAAT, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y Aeronáutica de Terrassa, en la provincia de Barcelona (España) por el apoyo en la realización de este trabajo, así como al CONICET y al CIUNSa por financiar esta investigación.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN DISPOSITIVO MECÁNICO PARA INSPECCIONAR LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES DEL REACTOR NUCLEAR TRIGA IPR-R1

Maritza R. Gual, Daniel A. M. Campolina, Amir Z. Mesquita, Rogério R. Rodrigues y Cláudio C. Lopes

Serviço de Tecnologia de Reatores – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear / Comissão Nacional de Energia Nuclear (CDTN/CNEN)
Campus da UFMG - Pampulha, Belo Horizonte, Brasil
maritzargual@gmail.com; campolina@cdtn.br;
amir@cdtn.br; rrr@cdtn.br; ccl@cdtn.br

RESUMO

Se diseñó y construyó en el *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear* (CDTN) de Brasil, un dispositivo para la inspección de los revestimientos o envolturas de los elementos combustibles irradiados del reactor nuclear de investigaciones TRIGA IPR-R1. El dispositivo permitirá la detección de la posible fuga de los productos de fisión gaseosos, mediante la medición de la actividad del Cs-137 contenida en muestras de agua. La prueba es llamada en inglés "*sipping test*". Este dispositivo es muy importante para prevenir las fisuras de las envolturas de los elementos combustibles.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología de cálculo para evaluar las tasas de dosis gamma en la superficie superior de la piscina del reactor con el código de simulación numérica basado en Monte Carlo MCNPX v 6.0.

Por primera vez se cuenta con un modelo del dispositivo *sipping* realizado con el código de Monte Carlo MCNPX. El modelo desarrollado es validado con medidas experimentales de las tasas de dosis gamma en la superficie superior de la piscina del reactor.

Palabras Claves: *Reactores nucleares, combustible nuclear, "sipping", productos de fisión,* Monte Carlo MCNPX

1. INTRODUCCIÓN

La parada anticipada de centrales nucleares debido a la fuga dos elementos combustibles fue decidida en muchos países (EUA, Japón, Francia, Bélgica, Finlandia, Suecia y Suiza) [1].

La identificación de una fuga de material radioactivo en los elementos combustibles de un reactor nuclear puede ser realizada por un método no destructivo llamado en inglés "*sipping test*". Es un método empleado para evaluar la integridad estructural del revestimiento de los elementos combustibles irradiados, el cual es basado en la detección de productos de fisión (en especial el isótopo Cs-137) que se fugan a la piscina del reactor, usualmente por medio de espectrometría gamma.

Básicamente este método consiste en colocar los elementos combustibles (EC) irradiados a ser analizados dentro de un recipiente, llamado de dispositivo *sipping* para recoger muestras de agua. Análisis radiométricos son realizados a esa agua recogida. La presencia del Cs-137 en esas muestras de agua indicará la existencia de algún defecto en la envoltura de los EC analizados.

Este método no sólo debe ser aplicado durante la operación de un reactor nuclear, si no también durante su desmantelación con el objetivo de evitar re-insertar EC dañados en una piscina de almacenamiento temporal. En caso de que el resultado sea negativo, indicará la continuidad del uso de esos EC.

Un dispositivo *sipping* fue diseñado y construido para el reactor TRIGA IPR-R1 en el Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. Para poder utilizar este método es necesario hacer un análisis dosimétrico que consiste en evaluar las tasas de dosis de radiación gamma en la superficie superior de la piscina donde los operadores se encontrarán manipulando el dispositivo *sipping* [2].

El objetivo de este trabajo es realizar el cálculo de las tasas dosis de radiación gamma con el código de transporte de partículas nucleares basado en el método de Monte Carlo MCNPX [3].

2. PARTES COMPONENTES DEL DISPOSITIVO *SIPPING*

El dispositivo *sipping* de los elementos combustibles irradiados del reactor TRIGA IPR-R1 construido en el CDTN está compuesto básicamente de las siguientes partes componentes [2]:

1- Tanque

Este tanque no es más que un tubo de Aluminio de diámetro interno de 120 mm y altura de 3 m cerrado en su extremidad inferior y abierto en su extremidad superior. Dentro del tanque irá una cesta construida también de Aluminio comercial. Este tanque permite el aislamiento del agua de la piscina del reactor. La cesta entrará por la parte superior y yendo hasta el fondo del tubo. En la parte superior posee una boquilla con unos orificios para poder sujetarlo con unos ganchos. Además posee otro orificio en la

ISBN: 978-987-1676-63-7

parte superior del borde inferior de la boquilla para marcar su posición encima del nivel del agua de la piscina.

2- Cesta

Esta consiste de tres tubos guías huecos unidos por una placa superior e inferior. Dentro de estos tubos huecos son colocados tres EC, a ser examinados.

3- Placa Base

La placa base se utiliza para colocar la cesta en el fondo del tanque. Entre la placa inferior y la placa base existen unos cuatro tubos inclinados que garantizarán la estabilidad de la cesta en el fondo del tanque.

4- Tubo central

La cesta posee un tubo central con un orificio. La función del mismo es permitir que la cesta sea colocada y retirada del tanque.

En la Figura 1 se presenta la foto del dispositivo *sipping* construido.



Figura 1: Foto de la cesta(a la izquierda) y el tanque (en la derecha) del dispositivo *sipping*.

El tanque del dispositivo *sipping* estará fijado al borde de la piscina del reactor. La cesta es sujetada por una cuerda amarrada a un gancho que se introduce en el orificio del tubo central. Esta cesta con los EC será izada manualmente. La cuerda se desliza por una roldana. La roldana será colocada en una grúa puente instalada encima de la piscina del reactor nuclear.

ISBN: 978-987-1676-63-7

3. MÉTODO DE CÁLCULO

El cálculo de las tasas dosis de radiación gamma serán realizadas con el código de transporte de partículas nucleares basado en el método de Monte Carlo MCNPX v. 6.0.

Este cálculo presenta diferentes etapas:

1- Simulación del reactor nuclear.
2- Simulación del dispositivo *sipping*.
3- Cálculo físico neutrónico del reactor nuclear.
4- Cálculo detallado del ciclo de operación del reactor nuclear (quema y decaimiento radiactivo).
5- Cálculo de las tasas dosis de radiación gamma será realizada en los puntos de interés.
6- Validación de los resultados con medidas experimentales.

En la Figura 2 se ilustra el diagrama esquemático del dispositivo *sipping* insertado dentro de la piscina del reactor TRIGA IPR-R1 con el operador en la superficie superior.

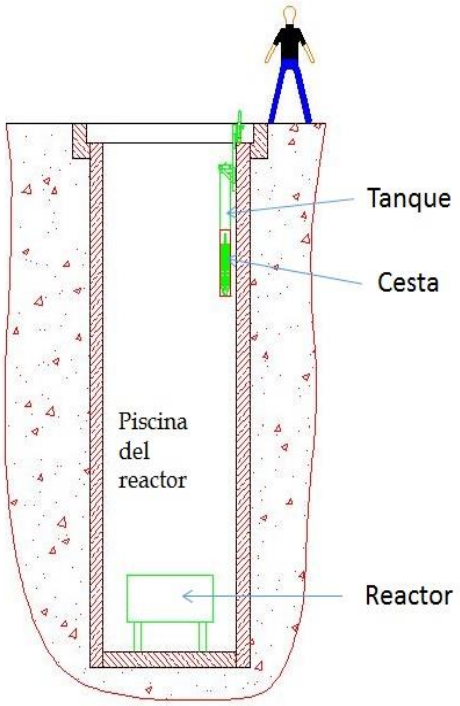


Figura 2: Diagrama esquemático del dispositivo *sipping* insertado dentro de la piscina del reactor TRIGA IPR-R1.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Para determinar las dosis gamma fue usado el estimador de fluencia de energía (tipo *f5) en MeV/cm^2 disponible en el código MCNPX. Usando las tarjetas DE y DF son introducidos los valores de los coeficientes de atenuación másico para el aire μ_{en}/ρ (en cm^2/g) disponibles en la página del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) [4] para obtener las dosis en MeV/g. Por medio del factor de multiplicación 1.6021e-10 y 3600 s/h, las dosis absorbidas son convertidas a Gy/h. Es usada la equivalencia de 1 J/Kg (unidad física) de dosis absorbida gamma corresponde a 1 Sv de dosis equivalente. Como los resultados obtenidos con el código MCNPX son promediados por partícula emitida por la fuente, es necesario multiplicarla por la emisión total de partículas gammas emitidas por segundo de cada elemento combustible (emisión de la fuente) para obtener las dosis reales del sistema. Más detalles de la simulación con el código de Monte Carlo MCNPX es descrita en un trabajo previo [5].

En la Figura 3 se ilustra el resultado de la simulación numérica del reactor con el dispositivo *sipping* insertado dentro de la piscina del reactor TRIGA IPR-R1 con el código de Monte Carlo MCNPX. Se observa el núcleo del reactor en la parte inferior y en la parte superior el dispositivo de prueba *sipping*.

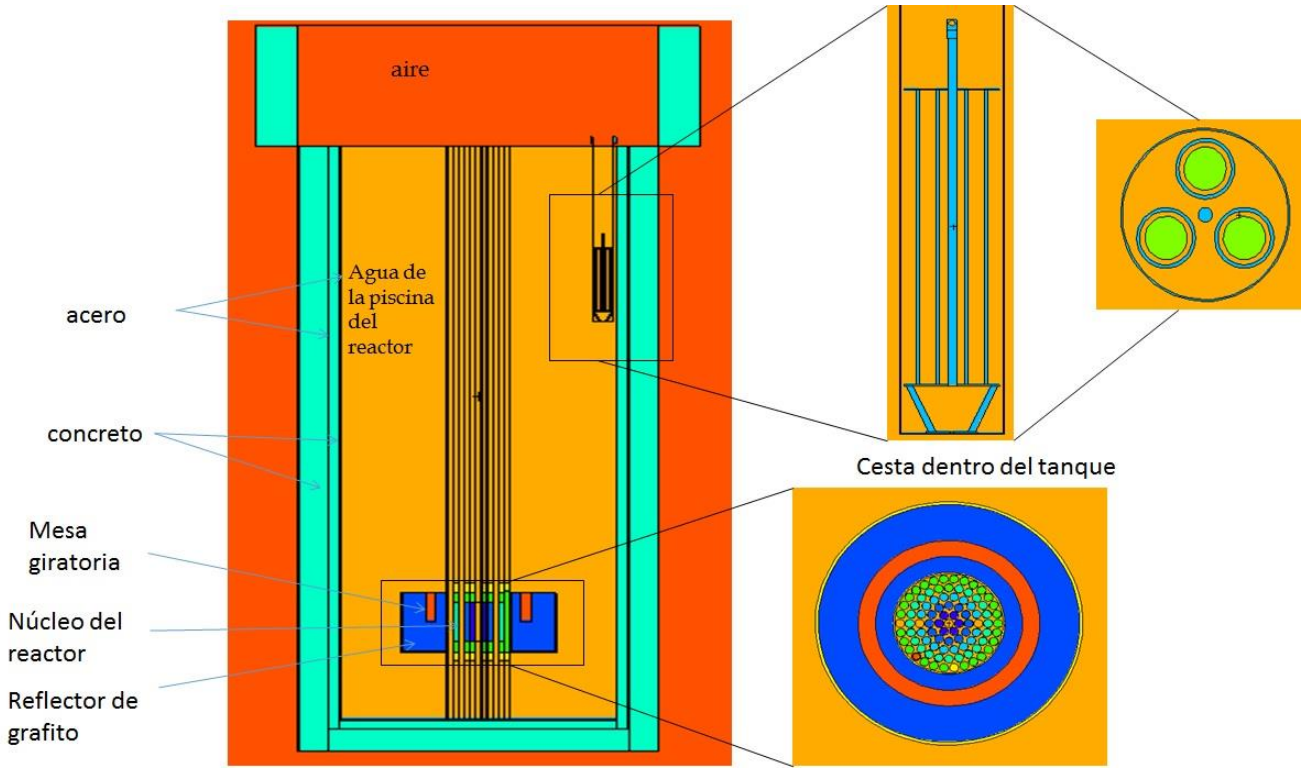


Figura 3: Simulación numérica del reactor con el dispositivo *sipping* insertado dentro de la piscina del reactor TRIGA IPR-R1 con el código de Monte Carlo MCNPX.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El resultado de la tasa de dosis gamma calculada con el código MCNPX en el borde de la piscina del reactor fue de 0,268 mSv/h. El error relativo asociado al cálculo fue menor del 5%.

A continuación el gráfico de las curva de isodosis en % alrededor del dispositivo *sipping* en el plano yz usando el código MATLAB.

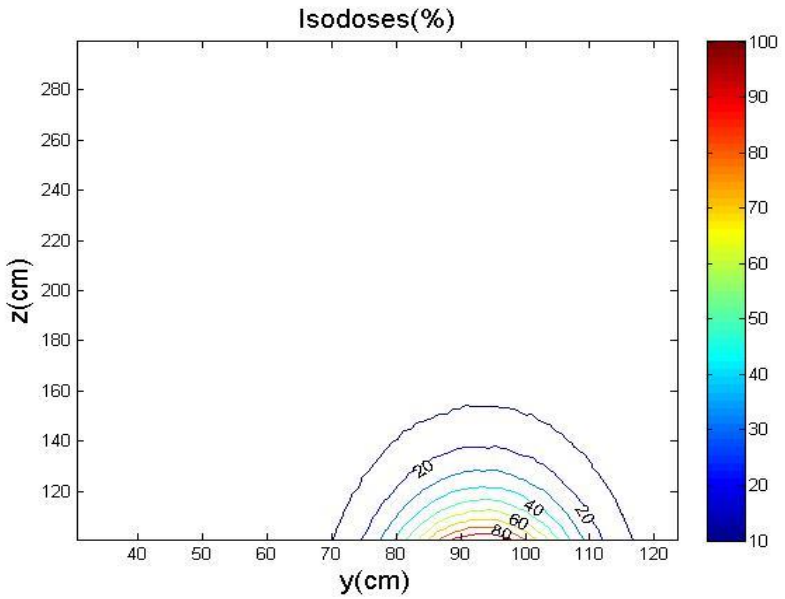


Figura 4: Curvas de isodosis en % de la distribución de las tasas de dosis alrededor del dispositivo *sipping* para el plano yz usando el código MATLAB.

Se observa un máximo de dosis en la posición donde se encuentra el dispositivo *sipping* y próximo al borde de la piscina es muy baja.

4. MÉTODO DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la validación de los cálculos se dispone de las medidas de las tasas de dosis con 1 EC del reactor TRIGA IPR-R1 [6]. Los resultados de la comparación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación entre las dosis calculadas y medidas experimentalmente.

Estimador	D (mSv/h) Calculada	D(mSv/h) Medida	% Diferencia
*F5	0,268	0,240	12

Los cálculos presentan un valor subestimado respecto a los resultados experimentales y la diferencia es menor del 13 %, lo cual es aceptado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. CONCLUSIONES

El Reactor Nuclear TRIGA IPR-R1 del CDTN, cuenta ahora con una metodología numérica de evaluación de las tasas de dosis de radiación gamma que recibirá el personal que va a maniobrar el dispositivo *sipping* basada en el código de simulación por Monte Carlo MCNPX.

6. REFERENCIAS

[1] Committee on the Safety of Nuclear Installations, Leaking Fuel Impacts and Practices, Nuclear Energy Agency, NEA/CSNI/R 10, 18-Jul, 2014.

[2] Rogerio Rivail Rodrigues, *Desenvolvimento e Implantação de Metodologia para Avaliação de Integridade Estrutural de Elemento Combustível do Reator Nuclear de Pesquisa TRIGA IPR-R1 pelo Método "SIPPING"*, Defesa de qualificação de doutorado PPG CDTN, Belo Horizonte, 2016.

[3] John S. Hendricks. et. al. LA-UR-08-2216, *MCNPX 2.6.0 Extensions*, Los Alamos National Laboratory, April 11, 2008.

[4] http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/air.html, visitada en 2016.

[5] Maritza R. Gual, Daniel Campolina, Mesquita, A.Z and R. R. Rodrigues, *Dosimetry assessment during the sipping test in the IPR-R1 TRIGA reactor using MCPX*, Enviado a Progress in Nuclear Energy, mayo 2016.

[6] Paulo F. Oliveira, Fausto Maretti Júnior e Antônio Carlos Rocha, *Medidas de taxa de dose em elemento combustível irradiado do reator TRIGA IPR-R1*, NI-SERTA-02/13, 2013.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al *Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear* (CDTN), *Comissão Nacional de Energia Nuclear* (CNEN) y a las agencias de financiamiento a la pesquisa brasileña: *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) y a la Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) por el apoyo. Al grupo de Servicios de Tecnología de Reactores (SETRE) que construyeron el dispositivo *sipping*.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

CÁLCULO ESTOCASTICO DE LA VELOCIDAD DE PRE IMPACTO EN UN SINIESTRO SIN HUELLAS DE FRENADO APLICANDO LA TEORIA DE LA CONFIABILIDAD

Simón R. [1], **Bersano C.** [2] **y Medina M.** [3]

[1] Laboratorio de Ingeniería Mecánica Forense - Escuela de Posgrado y Educación Continua - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR.
Av. Pellegrini 250 - 2000 Rosario - Pcia. Santa Fe - Argentina
Correo-e: ra.simon@hotmail.com
[2] Lab. Ingeniería Mecánica Forense – FCEIA – UNR
[3] Esc. Ciencias Básicas – FCEIA – Consejo de Investigaciones - UNR

RESUMEN

En este trabajo se presenta el cálculo de la velocidad pre impacto en un contexto pericial del caso de un automóvil, que luego de impactar a una motocicleta, se detiene a 46 metros del punto de impacto, sin dejar huellas de neumático en su trayectoria. Se parte del uso del modelo determinístico de movimiento uniformemente desacelerado, que relaciona la distancia recorrida en función de la desaceleración y del tiempo. El grado de certeza que se tiene en la determinación de la velocidad pre-impacto depende del error con que se obtuvieron el desplazamiento posterior del rodado y de la adopción de la variación de la desaceleración.

Por su naturaleza determinística el valor que arroja la velocidad, es absoluto y no se especifica el error ni el rango probable. El modelo estocástico propuesto utiliza la fórmula citada, como punto de partida. Las diferencias radican en que las variables se analizan como variables aleatorias, teniendo en cuenta sus valores medio y sus desvíos estándar, así como el tipo de distribución estadística que asumen. Se aplica la teoría de la confiabilidad mediante la función de falla (capacidad menos demanda). La capacidad (velocidad máxima) se relaciona con la demanda del sistema (modelo estocástico), de modo que los valores positivos corresponden a situaciones seguras y los negativos a situaciones de falla.

Se tienen en cuenta los parámetros estadísticos de las variables y se realizan simulaciones del tipo Monte Carlo, a través de las cuales se puede determinar la probabilidad acumulada de la velocidad del rodado.

Con la utilización de esta técnica, es posible presentar a los jueces dictámenes periciales más confiables a las autoridades encargadas de impartir justicia, que podría ser la diferencia entre la culpabilidad o la inocencia.

Palabras Claves: *Frenado, Modelo, Estocástico, Confiabilidad.*

1. INTRODUCCIÓN

Se analizará el siniestro en el cual un automóvil se detuvo a 46 m luego de haber embestido a la motocicleta, lo cual implica un proceso de desaceleración. Tenía cierta velocidad en el instante cuando colisionó a la moto, y se detuvo luego de recorrer la distancia señalada. Por lo tanto, hay plena evidencia de un proceso de frenado [7]. Pero no hubo bloqueo de ruedas (evidencia que no hay rastros de huellas sobre el pavimento).

La pregunta es: ¿se puede estimar la velocidad del automóvil al momento del impacto, con los datos que se tienen? Y de hacerse, ¿con qué grado de precisión? ¿Cuál es el rango posible?

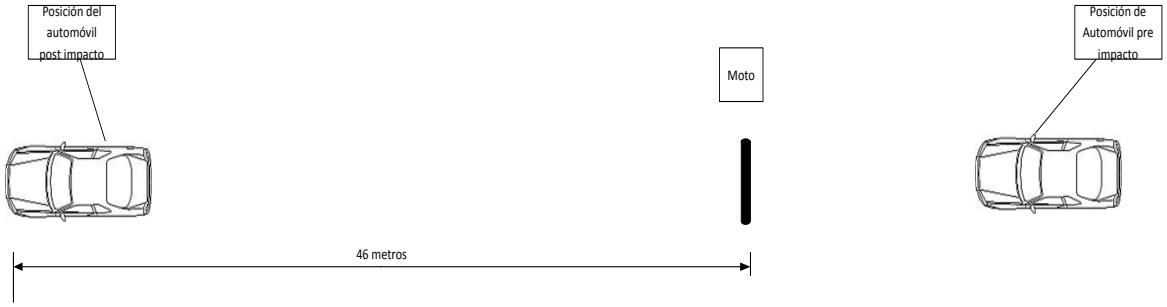
2. APLICACION A UN CASO PRÁCTICO

Se analizará desde el punto de vista pericial, el siniestro, donde un automóvil impacta a una motocicleta, luego recorre 46 metros y se detiene.

Las preguntas del Juez de la causa son:

- Cuál sería el rango probable de la velocidad de circulación del automóvil?
- Se superaron los 40 Km/hora?

Esquema del siniestro es:



El análisis pericial de un siniestro requiere del desarrollo de modelos físico-matemáticos, en este caso particular, se aplica el movimiento uniformemente desacelerado:

$$d = Vo \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (1)$$

$$t = \frac{Vo}{a} \quad (2)$$

Donde es:

d = distancia recorrido post-impacto = 46 m

Vo = velocidad pre-impacto

a = desaceleración

t = tiempo durante la desaceleración

Reemplazando (2) en (1) es:

$$d = Vo.t - \frac{1}{2}.\ a.t^2 = Vo.\left(\frac{Vo}{a}\right) - \frac{1}{2}.\ a.\left(\frac{Vo}{a}\right)^2 \quad (3)$$

$$d = \left(\frac{Vo^2}{a}\right) \quad -\frac{1}{2}\left(\frac{Vo^2}{a}\right) \quad = 46\ m = \frac{1}{2}\left(\frac{Vo^2}{a}\right) \quad (4)$$

2.1. Análisis y Resolución Determinística

De acuerdo a las distintas fuentes consultadas y analizadas (ver Referencias de [1] a [5]), el rango de la desaceleración pudo variar entre 1,1 a 2,8 m/seg^2.

Despejando de la ecuación (4), la velocidad Vo y reemplazando los valores estimados de la desaceleración, será:

$$Vo = \sqrt{2.46.a} = \sqrt{2.46.1,1} = 10,09\frac{m}{seg} = 36,21\ Km/h \quad (5)$$

$$Vo = \sqrt{2.46.a} = \sqrt{2.46.2,8} = 16,02\frac{m}{seg} = 57,72\ Km/h \quad (6)$$

Por lo tanto, las respuestas al juez serían:

- La velocidad del rodado puede variar **entre 36,21 a 57,72 km/h**
- Hay ocasiones que se **superen los 40 Km/hora y otros no** (esta indeterminado).

2.2. Análisis y Resolución Estocástica o Probabilística

Es posible determinar un límite de la velocidad probable, a pesar de la evidencia con alto grado de incertidumbre [7]. Dentro de las posibilidades que se pueden plantear con esta técnica de análisis, surge la resolución de la ecuación de la velocidad en forma estocástica, con los datos de la Tabla 1, donde se considera la aceleración ¨a¨ y el recorrido ¨d¨, como valores variables aleatorias, teniendo en cuenta sus valores medio y sus desvíos estándar (en ambos casos se considera distribución normal [6]) y el número 2 de la fórmula(5) determinístico.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1. Datos para el análisis estocástico

	Aceleración a	**Número de la Fórmula (5)**	**Recorrido d**	**Fórmula utilizada**
Valor medio	1,95 m/seg^2	2	46 m	$Vo = \sqrt{2.46.a}$
Desvio Standard	± 0,85	Valor determinístico	± 1	
Distribución de probabilidad	Normal	-	Normal	

Luego se ingresa la fórmula de la velocidad Vo (ecuación (5)) en planilla Excel y con el soporte del software, del Programa @Risk 5.5 de análisis de riesgos, se programa el simulador para que realice un ciclo de 10.000 iteraciones y el posterior cálculo empleando la técnica de Montecarlo (generador de números aleatorios) [8], se obtiene el siguiente resultado:

Valor medio de la Velocidad Vo: 13,1312 m/seg o sea 47,2723 Km/h

Desvió Standard: 3,0420 m/seg.

Las figuras 1 y 2 nos brindan la curva de probabilidad y probabilidad acumulada de la velocidad de circulación del automóvil, previa a la colisión, calculada en forma estocástica y en función de los datos de la Tabla 1.

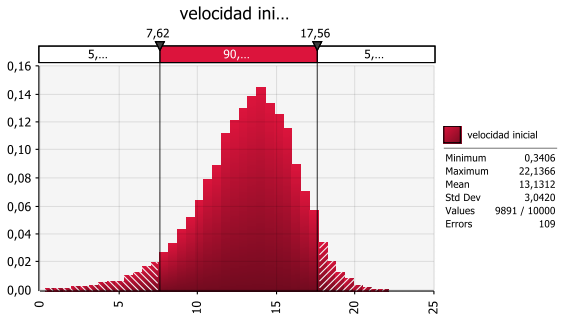


Figura 1: Curva probabilidad Vo

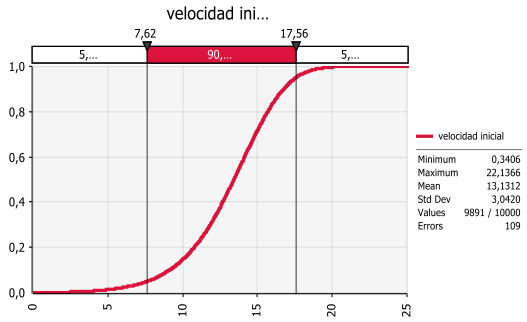


Figura 2: Curva probabilidad acumulada Vo

De las figuras, se observa que existe una probabilidad acumulada del 50% de que la velocidad sea igual a 13,1312 m/seg o 47,2723 Km/h. Además existe, una probabilidad acumulada del 90 % que el intervalo de la velocidad a la que circulaba estuviera comprendida entre los 7,62 y 17,56 m/seg o 27,43 Km/h y 63,22 Km/h.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.3. Cálculo estocástico utilizando la Función Falla F:

En el análisis de la fiabilidad o confiabilidad, hay una variable que es la capacidad y otra que es la demanda. Si se supone que el C es la capacidad y D es la demanda, entonces la ecuación (7) denota la función de falla o estado limite F. Cuando la función de falla es negativa, se ha producido un error [6].

En este trabajo, se utiliza como la capacidad (modelo estocástico) y se relaciona con la demanda del sistema (velocidad máxima permitida en la zona), de modo que los valores positivos corresponden a situaciones seguras y los negativos a situaciones de falla.

Con la utilización de la función falla o de estado limite, podemos determinar cuál es la probabilidad de que la velocidad pre-impacto supere un determinado valor, es decir si el vehículo circulaba a una velocidad superior a la permitida en la zona, o sea 40 km/h.

- **Llamando con C:** capacidad, a la fórmula que nos permitió obtener la velocidad de circulación previa al impacto Vo.
- **Llamando con D:** demanda del sistema o sea a la mayor velocidad permitida en esa calle igual a 40 Km/hora o sea 11,11 m/seg.
- **Función Falla F : C – D**

Tabla 2. Datos para la Función Falla

	Capacidad C	**Demanda D**	**Función falla F**
Valor medio	13,1312 m/seg	11,11 m/seg.	F = C - D
Desvio Standard	± 3,0420	Valor determinístico	
Distribución de probabilidad	Normal	-	

Se dispone la ecuación (7) función falla F, con los datos de la Tabla 2, en planilla Excel y con el soporte del software, Programa @Risk 5.5 de análisis de riesgos, se programa el simulador para que efectúe un ciclo de 10.000 iteraciones, empleando la técnica de Montecarlo. Se considera como capacidad el valor hallado en el punto 2.2, (con su valor medio, desvío estándar y distribución normal [6]), y como demanda el valor determinístico (máxima velocidad en el área). Luego, se obtiene el resultado mostrado en las Figuras 3 y 4 respectivamente, donde se observa la curva de probabilidad y probabilidad acumulada de la función falla F.

$$\mathbf{F = C - D = Vo – 11,11} \qquad (7)$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

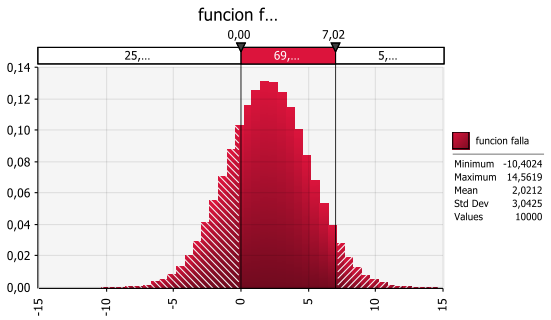


Figura 3: Curva de Probabilidad F

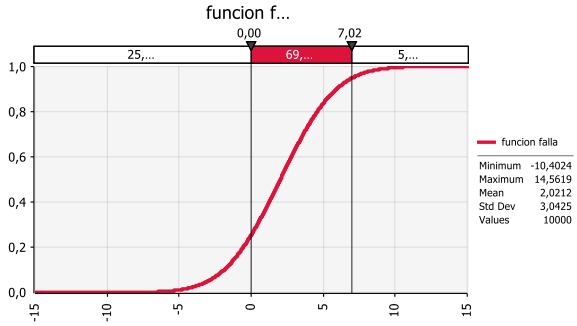


Figura 4: Curva de Probabilidad Acumulada F

De las figuras, se obtiene que la probabilidad acumulada de que se superen los **40 km/h es de 25,3 %** o sea valores simulados o escenarios que hacen que la C < D, en este caso situaciones donde se superen los 13,1312 m/seg.

Por el contrario, cuando C > D se tienen **74,7 %** (considerando el 69,7 % más el 5 % de la curva de probabilidad) o sea escenarios donde no se superen los 13,1312 m/seg o 40 Km/h..

2.4. Las respuestas a las preguntas planteadas por el Juez, con el uso del modelo estocástico y la función de falla, serían:

1 – Al considerar en el punto 2.2, la modelación estocástica, y como resultado al conjunto de todos los escenarios posibles de la velocidad de preimpacto del automóvil, se puede decir que existe una probabilidad acumulada del 50% de que la velocidad sea igual a 13,1312 m/seg o 47,2723 Km/h.

Además existe, una probabilidad acumulada del 90 % de que el intervalo de la velocidad a la que circulaba estuviera comprendido entre los 7,62 y 17,56 m/seg o 27,43 Km/h y 63,22 Km/h.

2 – Al presentar en el punto 2.3, la utilización de la función falla, para acotar el rango de estimación de la probabilidad y establecer si el límite de velocidad en la zona fue superado o no, se puede decir que existe una probabilidad acumulada del 25,3 % de que el vehículo circulara a una velocidad mayor a los 40 Km/h. Además existe una probabilidad acumulada del 74,7 % de que el vehículo circulara a una velocidad menor o igual a los 40 Km/h.

3. CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una metodología de investigación y análisis pericial, aplicable al análisis de casos de alta irresolución. La ingeniería forense, uno de cuyos objetos más difundidos es la determinación de las causas de los siniestros viales, debe abordar en general casos de gran complejidad en el que las evidencias, si bien no son claras y no están correctamente determinadas

ISBN: 978-987-1676-63-7

y registradas en la instrucción previa, presentan un alto nivel de incertidumbre en la aplicación de modelos físico-matemáticos que relacionen hechos compatibles con el evento ocurrido.

A partir de la Teoría de la Confiabilidad y de la Aplicación de Modelos Estocásticos, puede ofrecerse a los jueces dictámenes periciales con mayor confiabilidad y calidad. Los métodos probabilísticos permiten conocer un cierto nivel de certeza y establecer como se podría comportar un sistema en estudio. Lo aparentemente preciso, Vo = 36,21 a 57,72 Km/h resultados del modelo determinístico, introduce una propagación de incertidumbre y que podría ser la diferencia entre la culpabilidad o la inocencia. Establecer rangos de probabilidad, es una manera de describir el grado de certidumbre o verosimilitud, o bien la posibilidad de que el evento esperado sea cierto, dentro del rango analizado.

Todos los recursos del investigador de ingeniería aplicada al ámbito forense, se reducen a correlacionar las evidencias recogidas en el lugar del hecho, con fenómenos físicos estudiados y analizados. Finalmente, se muestra como la interacción entre los resultados, aplicados con ciertos criterios, proporcionan resultados ciertos y precisos; resultados de confiabilidad. Este sería un primer paso en la aplicación de modelos estocásticos a los distintos procedimientos que se emplean en la reconstrucción de accidentes viales.-

4. REFERENCIAS

[1] A.A.S.H.T.O (American Asociación Hightway and Transportación Officials) define a los fines de diseño geométrico dos calidades de frenado: Frenado lento: con desaceleraciones menores a 1.1 m/seg^2 - Frenado Normal: con desaceleraciones del orden de 1.7 a 2.8 m/seg^2.

[2] Manual de la técnica del automóvil de Bosch – 3rs. Edición - editorial Reverte sa. : 3,75 m/seg^2.

[3] Según la NHTSA – año 2011: Frenada normal genera una desaceleración de 0,1 a 0,2 g = 0,98 a 1,96 m/seg^2 - Frenada brusca llega hasta 0,4 g = 3,92 m/seg^2.

[4] H. Bruno – Investigación accidentes de tránsito - Seguridad vial - 1 a 2 m/seg^2 para frenadas corrientes - 4 a 6 m/seg^2 para frenadas violentas.

[5] Determination of Stopping sight Distance, de la NCHRP Report n° 400 , Trasportation Research Borrad, 1977, una desaceleración confortable para que los pasajeros no sufran daños es de: 1,64 a 2,49 m/seg^2 - máximo 0,32 g = 3,14 m/seg^2.

[6] Richl L., Sayed T, Univ. of British Columbia , Evaluating the Safety risk of Narrow Medians and Restricted Sight Distance, Paper prepared for presentation at the Risk Management in Geometric Design Session of the 2005 , Annual Conference of the Transportation Association of Canadá Calgary, Alberta.

[7] García, A., Reconstrucción e investigación de accidentes de tránsito. Ed. Nueva Librería. 2011.

[8] Martínez, E., "Cálculo de cotas de error en Accidentología usando Técnica de Monte Carlo". Ciencia Energética, 25:25. 1994.-

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

LA SIMULACION COMPUTACIONAL APLICADA EN LA INGENIERIA. EL CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 2

Héctor Sanzi

Grupo de Investigación de Ingeniería Estructural GIIE
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Haedo
Paris 532 Haedo (1706), Buenos Aires, Argentina
correo-e: tecsaing@tecsaing.com.ar

RESUMEN

Las plantas de procesamiento tales como petroquímicas, refinerías, químicas, compresoras, nucleares, etc., utilizan recipientes a presión, tanques, tuberías y equipos que operan en condiciones severas.

Actualmente, la tecnología utilizada en el diseño de tales plantas, permite controlar los componentes a altas o bajas presiones y/o temperaturas, muchas veces en condiciones desfavorables para los materiales seleccionados, pero manteniendo en todos los casos, los límites de seguridad de las mismas.

En los últimos años se han incorporado nuevas especificaciones que junto a la selección apropiada de los materiales, incorporados en el diseño y fabricación, ayudan al diseñador a obtener un diseño optimizado y seguro.

En general la mayoría de los recipientes instalados en estas plantas industriales, se diseñan y fabrican bajo los alcances del Código ASME Sección VIII División 1.

Adicionalmente y en estos últimos casos, cuando se requiere un diseño con un mayor grado de exactitud, donde prima la seguridad y/o economía, el uso de la División 2 de la Sección VIII, permite determinar su comportamiento estructural bajo la combinación de diferentes estados de carga, ya sea estático, dinámico, incluyendo el térmico.

Cabe mencionar que aquellos componentes sometidos a cargas cíclicas, donde aparece el fenómeno de fatiga, es mandatorio para el código, la utilización de la División 2.

En este último aspecto, el diseño bajo los lineamientos de la División 2, se puede realizar bajo dos procedimientos establecidos en dicho código, a saber:

- Parte 4: Diseño por Reglas
- Parte 5: Diseño por Análisis (incluye la utilización de la Simulación Computacional)

En este trabajo se estudian los alcances de dicho código y se presentan estudios de casos, utilizando la Parte 5, mediante la Simulación Computacional y “Stress Analysis”.

Palabras Claves: *Simulación Computacional, ASME VIII División 2.*

1. INTRODUCCIÓN

Las plantas industriales de alta capacidad tecnológica, tales como petroquímicas, refinerías, químicas, alimenticias, metalúrgicas, nucleares, etc., poseen componentes contenedores de presión, cañerías y equipos operando en condiciones extremas, Figura 1.



Figura 1: Recipientes Contenedores de Presión

En la actualidad, la tecnología alcanzada en el diseño de dichas plantas, permiten operar con sus equipos a elevadas presiones y temperaturas o en situaciones desfavorables en cuanto a la degradación o corrosión de los materiales, pero manteniendo los límites de seguridad y control requeridos por la planta. En los últimos años han surgido nuevas especificaciones destinadas a la adecuada selección de los materiales y a cumplir con requerimientos de análisis más exigentes, los cuales se incorporan en el diseño, la fabricación y la inspección. Un “Diseño Seguro” se complementa con:

- Rangos de temperatura (altas y bajas)
- Selección de materiales
- Existencia de defectos (Mecánica de Fractura)
- Cargas dinámicas, tensiones residuales, fatiga y concentración de tensiones

Por otro lado, el correcto funcionamiento de dichas plantas exige del control de especialistas con un alto grado de conocimiento y preparación, con el fin de mantener y asegurar operativos a sus equipos. Durante el servicio, el control de las variables operativas del proceso, el aseguramiento de la calidad, el mantenimiento planificado de los equipos y el conocimiento de la vida remanente, son los factores preponderantes que hacen a la planta segura. En este aspecto es aplicable las Prácticas Recomendadas de API 579 “Fittness For Service” [1], entre otras.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Las normas utilizadas para el diseño de recipientes contenedores de presión permiten dimensionar sus partes componentes, incluyendo su sistema de soportación, bajo todos los estados de carga actuantes, con el objeto de asegurar su integridad una vez instalados y operando en la planta.

El diseño y fabricación de la mayoría de los recipientes contenedores de presión instalados en una planta de proceso se llevan a cabo bajo los lineamientos del Código ASME Sección VIII División 1 [2]. Para aquellos equipos que dependiendo de las exigencias operativas en cuanto a los niveles de presión y temperatura, la seguridad y el perjuicio económico que significaría una posible falla, la planta, el "Propietario" ("Owner") podrá definir el uso de la División 2 [3], cuyo diseño debe ser realizado por un ingeniero matriculado.

2. CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 2

El diseño de un componente contenedor de presión bajo los lineamientos de la División 2 [3], puede ser realizado mediante dos metodologías de análisis, la Parte 4 denominada "Diseño por Reglas", donde se presentan expresiones, en general analíticas, que permiten dimensionar las distintas partes componentes, mientras que la Parte 5, "Diseño por Análisis", utiliza como procedimiento de cálculo la Simulación Computacional a través del Método de Elementos Finitos.

En acuerdo con el párrafo 4.1.5.1 de la Parte 4, el espesor de diseño obtenido considera:

- El cálculo del espesor de diseño se determinará según los métodos incorporados en la Parte 4 "Diseño por Reglas", incluyendo las combinaciones de carga y casos indicados en el 4.1.5.3.
- Como alternativa, el espesor de diseño se puede establecer utilizando los procedimientos de la Parte 5 "Diseño por Análisis", incluso si este espesor es inferior al establecido según Parte 4.
- En cualquier caso, el espesor de diseño no será menor que el espesor mínimo especificado en 4.1.2, incluyendo el margen de corrosión requerido según se indica en 4.1.4.

La División 2 [3], describe todos los requerimientos de aplicación de un diseño por análisis, utilizando los resultados de un "Stress Analysis", los cuales se basan en los modos o mecanismos de falla posibles, tales como:

- **Protección Contra Colapso Plástico**
- **Protección Contra Falla Local**
- **Protección Contra Colapso por Pandeo**
- **Protección Contra Falla por Carga Cíclica**

ISBN: 978-987-1676-63-7

Protección Contra Colapso Plástico, es el método más utilizado para el diseño de un componente de presión, el cual dispone de tres métodos de análisis alternativos para evaluar su integridad:

- **Método de Análisis de Tensiones Elásticas**
- **Método de Carga Límite**
- **Método de Tensiones Elastoplásticas**

Las tensiones se calculan usando un análisis elástico, clasificado en categorías y limitadas a los valores admisibles establecidos conservativamente para que no se produzca un colapso plástico.

El procedimiento de evaluación estructural basado en el análisis de tensiones elásticas proporciona una aproximación del comportamiento estructural del componente bajo la Protección Contra el Colapso Plástico. De todas maneras una estimación más precisa se puede lograr usando un análisis de tensiones elastoplástica para encontrar cargas límite y de colapso.

3. METODO DE ANALISIS DE TENSIONES ELÁSTICAS

Se basa según los lineamientos del Criterio de Clasificación de Tensiones, donde se debe interpretar e identificar las tensiones según su naturaleza en Primarias y Secundarias, dependiendo del tipo de carga aplicada.

En la Figura 5.1 del Código se establecen los criterios establecidos para verificar la integridad de un componente y los límites admisibles de tensiones, cuya definición se presenta en la Figura 5.1 del Código ASME Sección VIII División 2 [3], (Figura 2),siendo:

- La Tensión Primaria de Membrana General, Pm, es la Tensión Primaria Equivalente promedio a través del espesor de una sección producida solo por presión interna y cargas mecánicas especificadas, excluyendo discontinuidades y concentraciones.
- La Tensión Primaria de Membrana Local, Pl, es la Tensión Primaria Equivalente promedio a través del espesor de una sección, producida solo por presión interna y cargas mecánicas especificadas, incluye discontinuidades y concentraciones.
- La Tensión Primaria de Flexión, Pb, es la componente de la Tensión Primaria proporcional a la distancia a partir de la superficie media del sólido, producida solo por presión interna y cargas mecánicas especificadas, excluyendo discontinuidades y concentraciones.
- Tensión Secundaria Membrana más Flexión, Q, auto-equilibrada necesaria para satisfacer la continuidad de la estructura. Ocurre en discontinuidades, causada por presión interna, cargas mecánicas o por un diferencial de expansión térmica. Excluye concentraciones locales.
- Las tensiones de Pico, F, son utilizadas para fatiga.

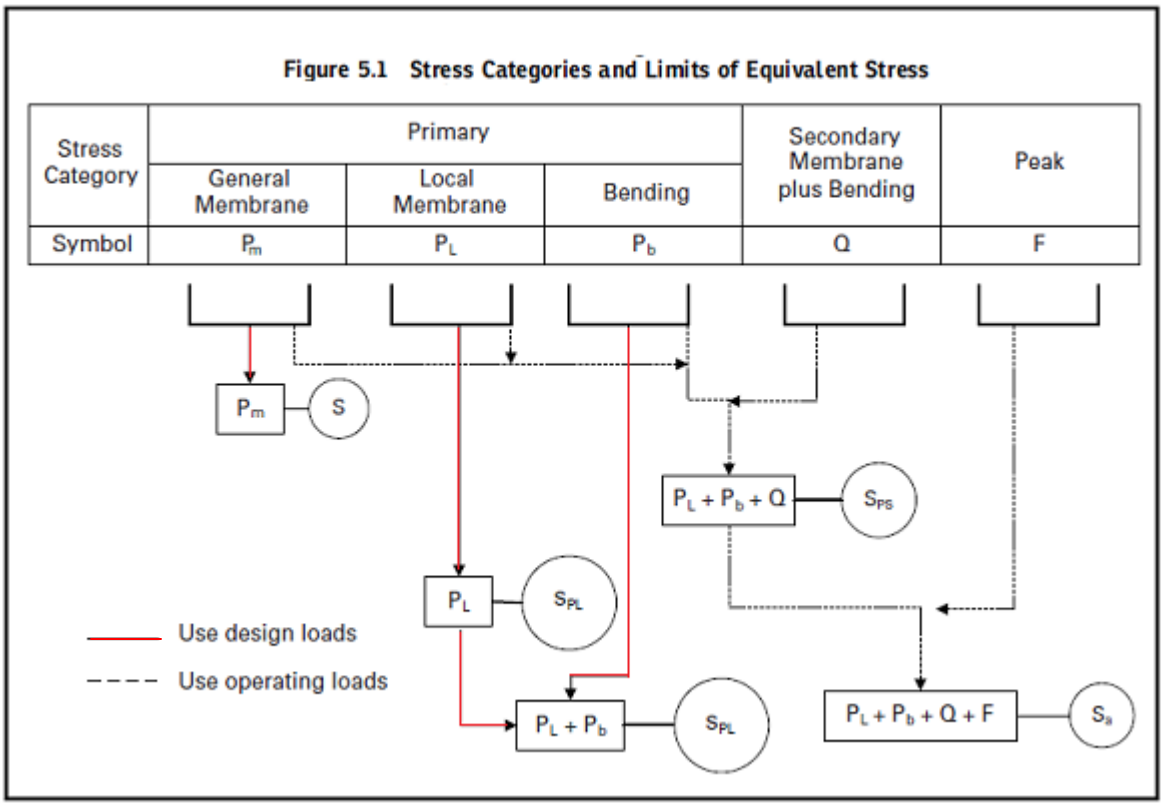


Figura 2: Categoría y Límites de Tensiones

Como se mencionó, si bien la División 2 es utilizada en general para el diseño de componentes especiales, es una práctica recomendada de uso habitual, su aplicación en la División 1 cuando se requiere el diseño de alguna parte componente cuya evaluación no esté incluida. En este caso, se utiliza el Criterio de Aceptación de la División 2 pero utilizando las tensiones admisibles de la División 1. En este trabajo se presentarán dos estudios de casos que tiene en cuenta esta recomendación.

4. SIMULACION COMPUTACIONAL

El Método de Elementos Finitos es una herramienta de cálculo alternativa, utilizada ampliamente en la ingeniería donde el continuo es dividido y modelado como un ensamblado de regiones discretas, llamadas elementos finitos.

En el análisis estructural, la variable del problema consiste en la determinación del campo de desplazamientos de un componente sometido a una combinación de estados de cargas, donde a partir de la Teoría de la Elasticidad, se determina su estado tensional.

El objetivo del método es la Simulación Numérica de una estructura para un estado combinado de cargas, obteniendo su respuesta estructural elástica o plástica, térmica, dinámica u otra.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Un estudio de integridad estructural combina los resultados obtenidos de la Simulación Computacional con los requerimientos del código, aplicando el Criterio de Clasificación de Tensiones del la Sección VIII División 2 [3], que conducen en su conjunto a un estudio de tensiones o "Stress Analyis". En el cuadro siguiente presenta el esquema descripto, Figura 3.

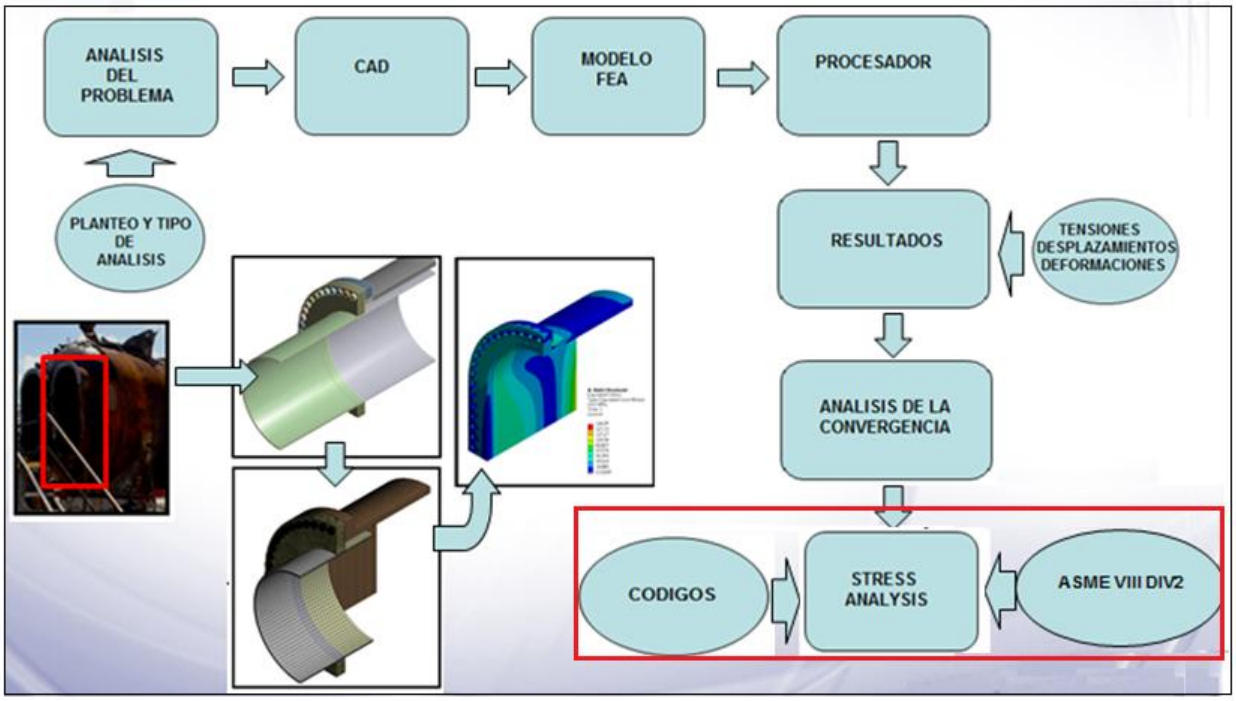


Figura 3: Esquema Descriptivo del Proceso de Análisis

El procedimiento de evaluación, consta de una secuencia de análisis de cuatro pasos:

4.1. Idealización del problema

En esta etapa se analiza que tipo de teoría de elasticidad mejor responde al tratamiento del problema, incluyendo el carácter de las deformaciones de la estructura, ya sea como elástico lineal, no lineal, pequeñas o grandes deformaciones, estados cuasi-estáticos o dinámicos, etc.

4.2. Planteo del Modelo

Una vez realizada la interpretación del problema físico, se selecciona el modelo que mejor permita describir el comportamiento de la estructura, con la posibilidad de encarar, en una etapa inicial, modelos sencillos y simplificaciones, ya sean en una, dos o tres dimensiones.

4.3. Análisis de los resultados y convergencia de la solución

Los resultados del análisis, tales como reacciones, deformaciones, tensiones, entre otros. El analista deberá asegurar que el modelo plantado se corresponde con los resultados esperados,

teniendo en cuenta las magnitudes alcanzadas y los niveles mínimos y máximos de las variables, con el objeto de asegurar la convergencia de la solución.

4.4. Análisis de Tensiones o "Stress Analysis"

Los resultados obtenidos, en general desplazamiento, deformaciones y tensiones, son utilizados adecuadamente para compararse con los parámetros admisibles dados por el código de aplicación. En el uso de la Parte 5 del Código ASME Sección VIII División 2 "Diseño por Análisis" [3], permite diseñar componentes contenedores de presión, tomando como parámetro de comparación, las tensiones equivalentes de Von Mises.

5. ESTUDIOS DE CASOS

Se presentan dos aplicaciones o "Estudios de Casos", que consisten en el diseño y verificación de diferentes partes componentes de equipos utilizados en la industria del petróleo y sus derivados. Dichos estudios fueron resueltos a partir del método de elementos finitos bajo los lineamientos del Código ASME Sección VIII División 1 [2], utilizando el Criterio de Clasificación de tensiones de la Divisón 2 [3]. Para el análisis se han empleado modelos tridimensionales desarrollados con el programa ANSYS [4].

5.1. Verificación de la integridad estructural de la unión de un Nipolet con el Caño Colector de un skid de gas.

Ante la necesidad de conocer la integridad estructural de la unión entre el Nipolet y el Colector, como se presenta en la Figura 4, cuyos resultados fueron previamente obtenidos a partir un estudio de flexibilidad de cañerías, es que se plantea un modelo local para conocer el nivel de tensiones a partir del método de elementos finitos, considerando un análisis lineal elástico.

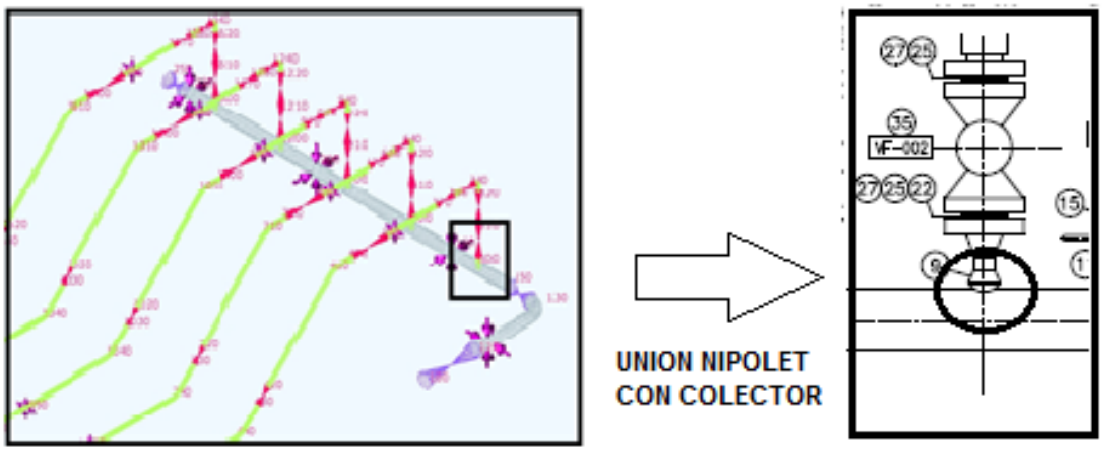


Figura 4: Detalle dimensional del colector

La norma de aplicación es ANSI/ASME B31.3 [5], donde se determinan las tensiones de Von Mises, aplicando el Criterio de Clasificación de Tensiones de la División 2 [3].

Se plantea un modelo localizado de la unión mediante elementos sólidos tridimensionales del Programa ANSYS [4], Figura 5, teniendo en cuenta los estados de cargas presentes, es decir, presión interior y las de la cañería sobre la brida del Nipolet, obtenidas del estudio previo.

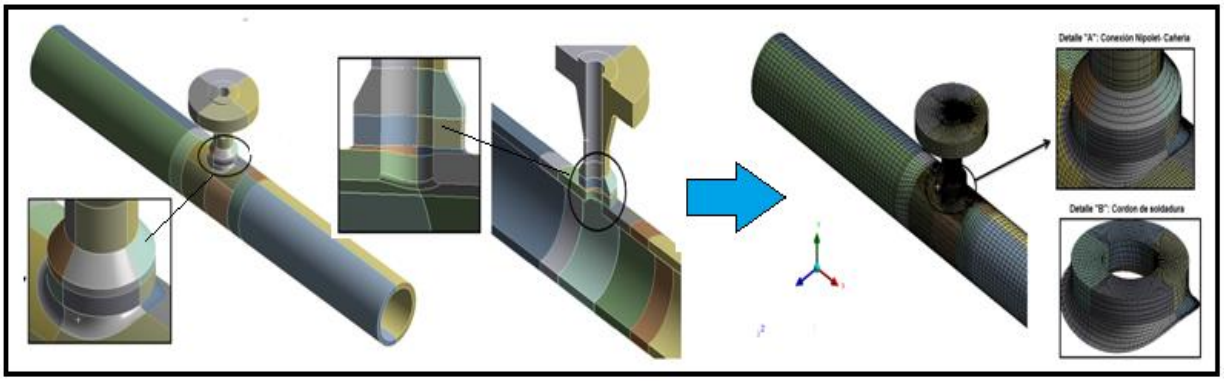


Figura 5: Modelo de Elementos Finitos

Una vez obtenidos los resultados y por el tipo de modelo seleccionado, se debe proceder a la realizar la linealización de tensiones, con el objeto de obtener en forma separada, los efectos de Membrana y Membrana más Flexión, requeridos por el procedimiento incorporado en la División 2. En las Figuras 6 y 7 se presentan las tensiones de Von Mises y la linealización mencionada respectivamente.

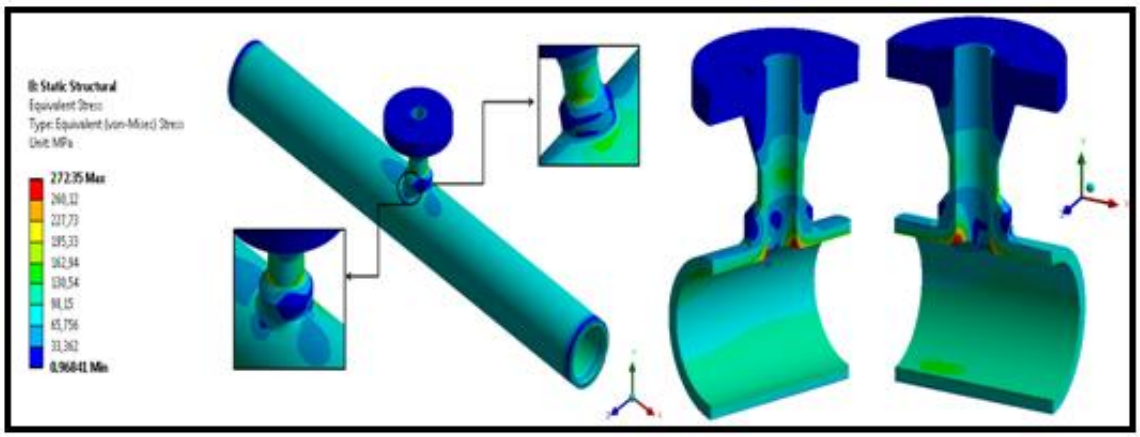


Figura 6: Tensiones de Von Mises

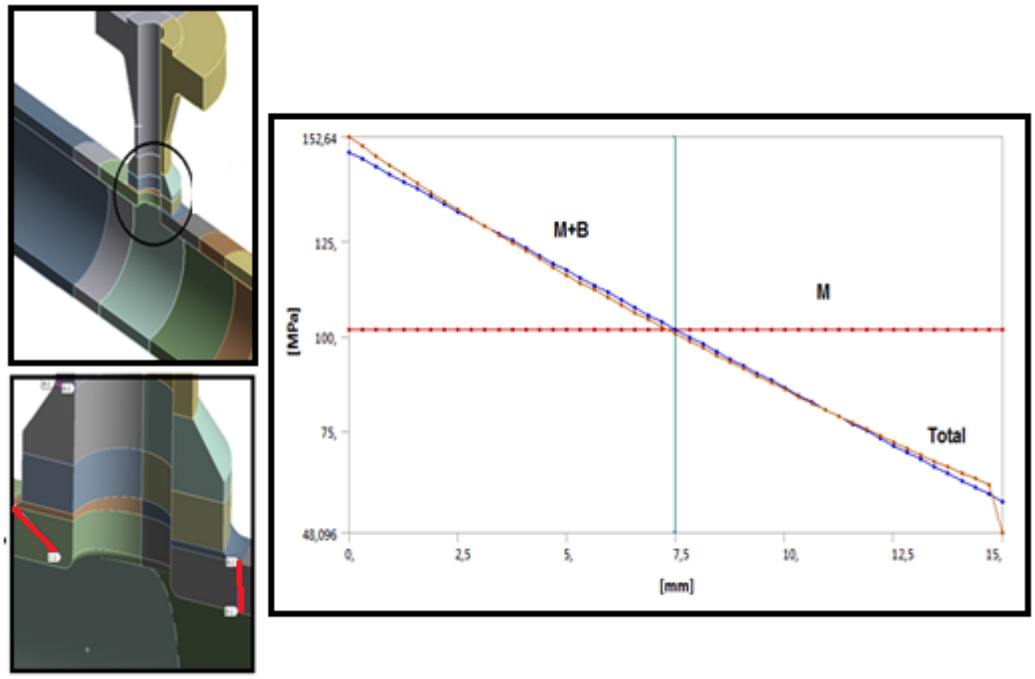


Figura 7: Linealización de tensiones

5.2. Verificación del diseño de la unión de la conexión oblonga con el cabezal de un calentador de petróleo, en acuerdo con el Código ASME Sección VIII División 1.

El Código ASME Sección VIII División 1 [2], no incluye el diseño de este tipo de conexiones sobre el cuerpo contenedor de presión, como se muestra en la Figura 8. En este caso particular es necesario dimensionar no solo la unión entre ambas partes componentes sino también el espesor del cuello de la conexión. Considerando los alcances de la División 2, es aceptable la utilización del Criterio de Clasificación de Tensiones, pero utilizando la tensión admisible de la División 1.

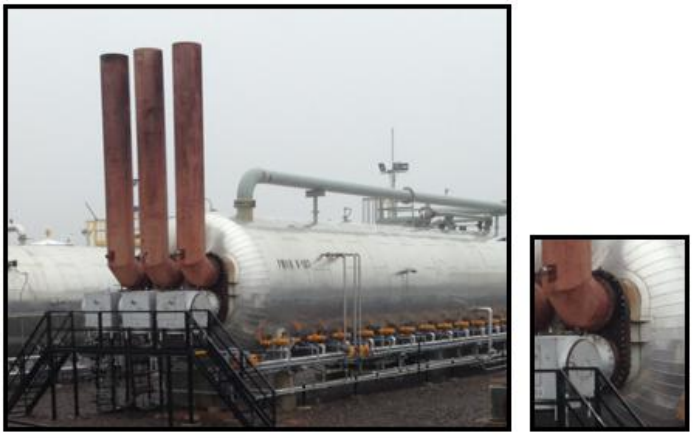


Figura 8: Esquema dimensional de Conexión oblonga sobre cabezal

ISBN: 978-987-1676-63-7

Con el objeto de dimensionar la conexión y verificar el nivel de tensiones en la unión con el cabezal, se propone un modelo de elementos finitos a partir de un análisis lineal elástico.

En la Figura 9 se presenta el modelo de cálculo empleado utilizando elementos sólidos tridimensionales del Programa ANSYS [4], para los estados de cargas presentes, mientras que a diferencia del estudio de caso anterior, no es necesario y a criterio del diseñador, llevar a cabo el procedimiento de linealización, considerando que el nivel de tensiones máximo de flexión alcanzado, son inferiores a las admisibles de membrana, Figura 10.

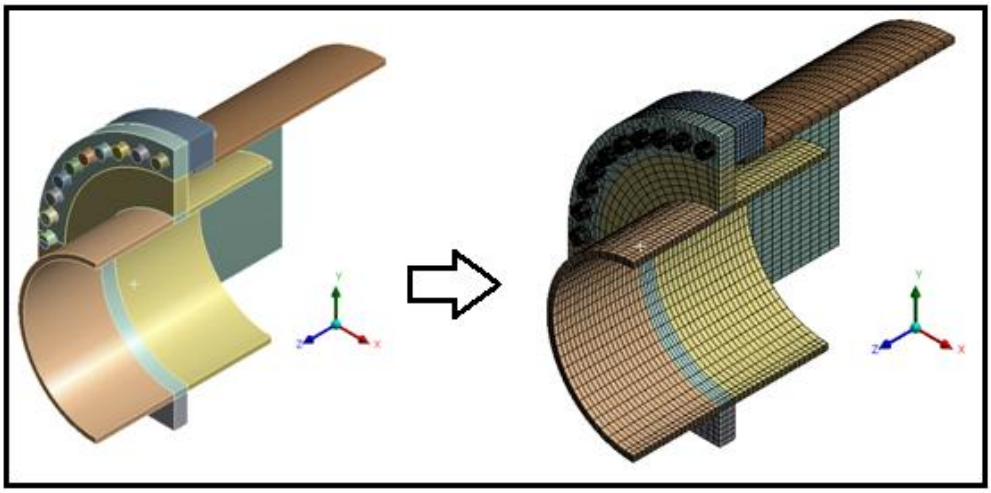


Figura 9: Modelo de Elementos Finitos



Figura 10: Tensiones de Von Mises

6. CONCLUSIONES

El diseño o la verificación estructural de recipientes contenedores de presión en acuerdo con los códigos de aplicación, incluyendo el análisis de posibles modos de falla y degradación, permiten

ISBN: 978-987-1676-63-7

asegurar su integridad ante los diferentes estados de cargas que se presentan durante la operación a lo largo de su vida útil.

En este camino, los códigos de diseño junto con especificaciones propias de cada compañía, permiten establecer el mínimo espesor requerido para el estado de carga de presión interior o exterior, mientras que para otros estados de carga, el especialista deberá utilizar procedimientos, de acuerdo a su conocimiento y experiencia, adecuados y suficientes para asegurar la integridad del componente.

Como ya fue mencionado, el diseño y fabricación de la mayoría de los equipos instalados en una planta de proceso, se llevan a cabo bajo los lineamientos del Código ASME Sección VIII División 1 [2], mientras que dependiendo de los niveles de presión y temperatura operativos, la seguridad y el perjuicio económico que significaría una posible falla, la planta o el “Propietario” (“Owner”) podrá definir el uso de la División 2 [3], cuyo diseño deberá ser realizado por un ingeniero matriculado. En ambos casos se determina el dimensionamiento de las diferentes partes componentes sometidas a presión, incluyendo su sistema de soportación, considerando todos los estados de carga presentes.

Si bien la División 2 es utilizada para el diseño de componentes especiales, es una práctica de uso habitual su utilización en la División 1, cuando se requiere el diseño o la verificación de una parte componente que no esté incluida en dicha División. En este caso, se utiliza el Criterio de Aceptación de la División 2 utilizando las tensiones admisibles de la División 1.

Bajo esta última consideración, en este trabajo se ha presentado dos estudios de casos para determinar la integridad estructural de una conexión del tipo oblonga sobre el cuerpo del cabezal de un recipiente contenedor de presión y el estudio de integridad de la unión Nipolet con el colector.

La Simulación Computacional es una herramienta utilizada en la ingeniería que le permite al analista diseñar o verificar componentes con un alto grado de seguridad. Es fundamental su aporte y experiencia en el desarrollo del estudio, de aquí como “Mandatorio” para el código, en el uso de la División 2, el concepto del “Registered Professional Engineer”.

REFERENCIAS

[1] Fittness For Servicies, API579, Edición 2014
[2] ASME Code, Sección VIII División 1, Edición 2015
[3] ASME Code, Sección VIII División 2, Edición 2015
[4] ANSYS Program, Versión 14.5
[5] ANSI/ASME B31.3, Edición 2014

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DINÁMICA ESTRUCTURAL DE ALAS RECONFIGURABLES: UN ESTUDIO PARAMÉTRICO

Marcos L. Verstraete[1,2,3], Sergio Preidikman[1,3] y Rodolfo Duelli[2]

[1] Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.
spreidikman@unc.edu.ar

[2] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Campus Universitario, Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina. Tel/Fax: 0358-4676246,
rduelli@ing.unrc.edu.ar

[3] CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, Buenos Aires, Argentina. mverstraete@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN

Una nueva tecnología, conocida como *morphing wings,* promete una generación de vehículos aéreos no-tripulados (UAVs) con alas que cambian de forma durante el vuelo, del mismo modo que lo hacen las aves. Para lograr la materialización de tales UAVs existen, todavía, barreras técnicas que deben ser superadas. Un aspecto que resulta muy importante en el desempeño de vuelo de estos nuevos UAVs, que aún no es completamente entendido, es el aspecto aeroelástico. Los grandes cambios de geometría que experimentan las alas producen cambios en las características aerodinámicas y en las propiedades estructurales (frecuencias naturales y modos de vibrar) de la estructura alar, lo que influye de manera significativa en la respuesta aeroelástica. La predicción de los cambios en las propiedades estructurales antes mencionadas resulta importante y ayuda a mejorar la comprensión del comportamiento aeroelástico de UAVs con alas reconfigurables.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un código computacional que permite predecir la variación de las frecuencias naturales y modos de vibrar de una estructura alar, producto del cambio de geometría del ala. Este cambio se describe mediante la evolución de los ángulos de diedro asociados al ala. El código desarrollado en este trabajo determina automáticamente las frecuencias y los modos de vibrar para un conjunto predeterminado de esos ángulos. Para determinar las propiedades dinámicas del ala configurable se resuelve un problema de autovalores generalizado. Las matrices de masa y de rigidez asociadas a este problema se obtienen mediante el método de los elementos finitos. Los resultados permiten comprender la variación de las frecuencias naturales y el cambio en las formas modales de la estructura alar debido a la variación de los ángulos de diedro del ala.

Palabras Claves: *Morphing wings, dinámica estructural, aeroelasticidad.*

1. INTRODUCCIÓN

En estos últimos años, los vehículos aéreos no-tripulados (UAVs) han sido un tópico de investigación muy importante en el campo de la ingeniería aeronáutica debido a sus potenciales aplicaciones civiles, científicas y comerciales [1]. Las investigaciones en las diferentes disciplinas que abarca la tecnología asociada a los UAVs fueron dando lugar a diseños de aeronaves no-tripuladas cada vez más eficientes convirtiéndolas en una herramienta muy valiosa debido a su flexibilidad, seguridad, facilidad de uso y costo relativamente bajo para su funcionamiento, lo que favoreció su utilización en diferentes situaciones. Las operaciones que se asignan a estas aeronaves autónomas o pilotadas de manera remota resultan cada vez más exigentes y requieren niveles de prestaciones cada vez más elevados. Esta necesidad de mejorar la funcionalidad de los UAVs inspiró la generación de una nueva clase de aeronaves no-tripuladas (*Morphing Aircraft*) que utilizarán una nueva tecnología denominada *morphing wing* [2]. La idea fundamental de esta tecnología consiste en un ala capaz de cambiar radicalmente y de manera dinámica su forma geométrica durante el vuelo, como lo hacen las aves, utilizando mecanismos no tradicionales.

Entre los numerosos conceptos de alas reconfigurables que se encuentran en la literatura, el denominado *folding wing* es el que más atención ha recibido por parte de la comunidad científica [3-5]. Este concepto consiste en un ala constituida por diferentes partes (segmentos de alas) que pueden moverse una respecto de la otra. Aunque algunos prototipos de alas *morphing* han sido construidos y probados mostrando las ventajas y beneficios que tiene asociada esta nueva tecnología, todavía existen barreras técnicas que deben ser superadas [6]. Un aspecto que resulta muy importante en el desempeño de vuelo de estos avanzados UAVs, y aún no es completamente entendido, es el aspecto aeroelástico. Los grandes cambios de geometría que experimentan las alas producen importantes cambios en la distribución de las cargas aerodinámicas y en las propiedades estructurales (frecuencias naturales y modos de vibrar), lo que influye de manera significativa en la respuesta aeroelástica de la aeronave. La predicción de los cambios en las propiedades naturales de la estructura resulta muy importante y ayuda a mejorar la comprensión en el comportamiento aeroelástico. Diversos estudios analíticos, numéricos y experimentales han sido desarrollados [5,7,8] con el fin de predecir y entender, en una primera etapa, la dinámica estructural del concepto *folding wing* y, en una segunda etapa, su comportamiento aeroelástico. Para llevar a cabo un estudio aeroelástico de un modelo de ala reconfigurable resulta necesario disponer de una herramienta computacional que permita analizar cada una de las configuraciones que pueden adquirir las alas [9]. Todo ello implica generar el modelo estructural y el aerodinámico para cada configuración, lo que resulta ineficiente si no se utiliza un procedimiento automatizado. Pocos esfuerzos han sido dirigidos en el desarrollo de una herramienta eficiente que implemente un procedimiento que permita realizar estudios paramétricos de la dinámica estructural de alas reconfigurables [7,9].

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este trabajo se presenta el desarrollo de un código computacional que permite llevar a cabo un estudio paramétrico de la dinámica estructural de alas reconfigurables. El código es capaz de predecir la variación de las frecuencias naturales y los modos de vibrar de una estructura alar, producto del cambio de geometría del ala. Como parte del trabajo se presenta una serie de resultados con el fin de ilustrar la aplicación del código computacional desarrollado. Es importante mencionar que este esfuerzo es parte de un proyecto de mayor envergadura cuyo objetivo final es el desarrollo de un modelo para investigar el comportamiento aeroelástico de UAVs con alas reconfigurables.

2. MODELO ESTRUCTURAL

2.1. Generalidades

La estructura propuesta para el modelo *folding wing* está constituida por un conjunto de vigas que se conectan entre ellas para formar un "esqueleto estructural" del ala como se muestra en la Figura 1. Para definir la geometría del modelo se utiliza un sistema de coordenadas cartesiano ortogonal (*x*, *y*, *z*). Debido a la simetría que posee la estructura con respecto al plano *xz*, el modelo sólo se desarrolla para el ala derecha (AD). La estructura del AD es dividida en dos partes: la Estructura del Ala Interna (EAI) y la Estructura del Ala Externa (EAE).

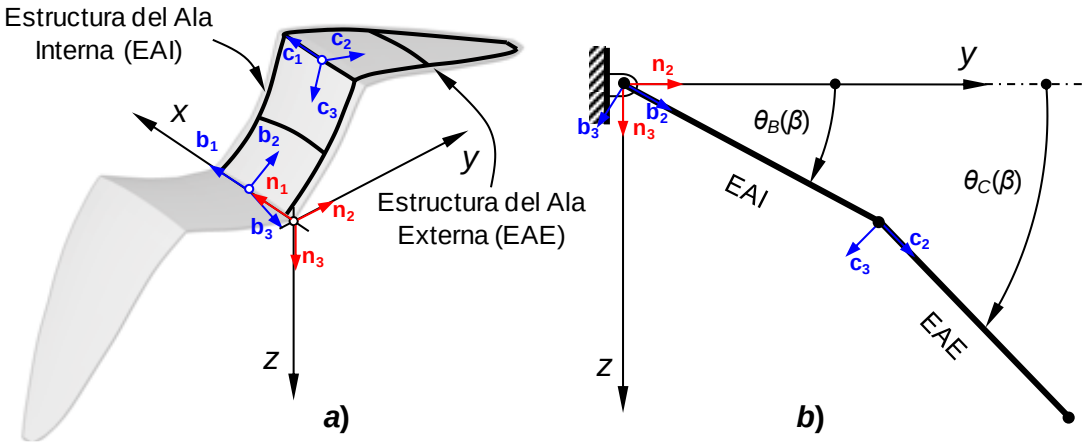


Figura 1: modelo de la estructura alar e interpretación geométrica de los ángulos θ_B y θ_C.

Con el fin de parametrizar la geometría del ala resulta conveniente introducir 3 sistemas de referencia. El primero es un sistema de referencia inercial o Newtoniano **N** que tiene asociado una base ($\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$, $\mathbf{n}_3$). Esta base tiene asociada, además, el conjunto de coordenadas (*x, y, z*) antes mencionado. El segundo sistema de referencia, **B**, se encuentra fijo a la EAI y tiene asociado una base ($\mathbf{b}_1$, $\mathbf{b}_2$, $\mathbf{b}_3$). El tercer sistema, **C**, está fijo a la EAE y tiene asociado una base ($\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$, $\mathbf{c}_3$). Los vectores unitarios $\mathbf{n}_i$, $\mathbf{b}_i$ y $\mathbf{c}_i$ (para i=1, 2, 3) conforman bases ortonormales y dextrógiras (satisfacen la regla de la mano derecha). Se asume que el origen de **B** es coincidente con el origen de **N**.

La geometría completa de la estructura alar es expresada en el sistema **N**, mediante la siguiente ecuación,

$$\begin{aligned} \{\mathbf{r}_{EAI}\}_N &= [\mathbf{T}_{NB}]\{\mathbf{r}_{EAI}\}_B \\ \{\mathbf{r}_{EAE}\}_N &= [\mathbf{T}_{NB}]\{\mathbf{R}_{BC}\}_B + [\mathbf{T}_{NB}][\mathbf{T}_{BC}]\{\mathbf{r}_{EAE}\}_C \end{aligned} \tag{1}$$

donde $\{\mathbf{r}_{EAI}\}_N$ y $\{\mathbf{r}_{EAI}\}_B$ es el vector posición de un punto de la EAI expresado en los sistemas **N** y **B** respectivamente. $\{\mathbf{r}_{EAE}\}_N$ y $\{\mathbf{r}_{EAE}\}_C$ es el vector posición de un punto de la EAE expresado en los sistemas **N** y **C** respectivamente. $\{\mathbf{R}_{BC}\}_B$ es el vector posición del origen del sistema **C** con respecto del sistema **B** que se encuentra expresado en **B**. $[\mathbf{T}_{NB}]$ y $[\mathbf{T}_{BC}]$ son las matrices de transformación de coordenadas (o de rotación) del sistema **B** al **N** y del sistema **C** al **B** respectivamente. Las matrices antes mencionadas, cuyas expresiones se presentan en la ecuación 2, están escritas en términos de los ángulos θ_B y θ_C, que son los ángulos de diedros asociados a la EAI y a la EAE respectivamente. Esos ángulos son expresados en función de un parámetro β que se le denomina *parámetro de configuración*; de esta manera la geometría del ala queda parametrizada por medio de β.

$$[\mathbf{T}_{BC}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_C - \theta_B) & -\sin(\theta_C - \theta_B) \\ 0 & \sin(\theta_C - \theta_B) & \cos(\theta_C - \theta_B) \end{bmatrix} \quad [\mathbf{T}_{NB}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_B) & -\sin(\theta_B) \\ 0 & \sin(\theta_B) & \cos(\theta_B) \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.2. Formulación mediante elementos finitos

La deformación elástica de un medio continuo es un problema gobernado por un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. En este trabajo para tratar la deformación de la estructura del ala se utiliza el Método de los Elementos Finitos (FEM) que permite discretizar espacialmente el conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, y así obtener un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias en el tiempo.

Cada una de las vigas que constituye la estructura alar considerada en este trabajo se divide espacialmente en un número finito de elementos que están conectados en puntos llamados nodos estructurales. Los elementos y los nodos constituyen la malla de la estructura o la malla de elementos finitos. Las propiedades de las vigas se asumen constantes a lo largo de cada elemento.

2.2.1. Ecuaciones de movimiento de un elemento

En el procedimiento de elementos finitos, en una primera etapa, las ecuaciones de movimiento se desarrollan para cada elemento de la estructura [10] expresadas en un sistema de coordenadas cartesiano ortogonal (ξ, η, ζ) asociado al elemento (sistema local).

ISBN: 978-987-1676-63-7

En este trabajo se considera un elemento de viga de Euler-Bernoulli constituido por dos nodos, y cada nodo tiene asociado 6 grados de libertad: 3 correspondientes a desplazamientos y 3 correspondientes al giro [11]. El campo de desplazamientos dentro del elemento de viga se aproxima como el producto entre una matriz de interpolación [**S**] que contiene un conjunto de funciones dependientes de las coordenadas del sistema local ξ, η y ζ, y un arreglo $\mathbf{u}_e$ que contiene los grados de libertad asociados a los nodos del elemento, conocido como vector de coordenadas nodales [11-12]. Una vez definida la interpolación del campo de desplazamientos, se escribe la energía de deformación y la energía cinética asociada al elemento de viga, las cuales son reemplazadas en las ecuaciones de Lagrange [13] para finalmente llegar a la expresión que describe la dinámica de un elemento de la malla de elementos finitos,

$$[\mathbf{M}_e]\ddot{\mathbf{u}}_e + [\mathbf{K}_e]\mathbf{u}_e = \mathbf{f}_e \tag{3}$$

donde $\mathbf{f}_e$ son las fuerzas generalizadas asociadas al elemento, los dos puntos sobre $\mathbf{u}_e$ representa la derivada segunda de los grados de libertad con respecto al tiempo. [$\mathbf{K}_e$] y [$\mathbf{M}_e$] son respectivamente las matrices de rigidez y de masa asociadas al elemento *e* [11].

2.2.2. Ecuaciones de movimiento de la estructura

Las ecuaciones de movimiento de la estructura alar se obtienen mediante un procedimiento que permite ensamblar las ecuaciones de movimiento asociadas a cada uno de los elementos que componen el sistema estructural [10]. Esto implica ensamblar las matrices de masa y de rigidez, y el vector de cargas nodales de cada elemento. Luego del procedimiento de ensamble se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que gobierna la dinámica de la estructura alar,

$$[\mathbf{M}]\ddot{\mathbf{u}} + [\mathbf{K}]\mathbf{u} = \mathbf{F} \tag{4}$$

donde **u** es el vector que contiene todos los grados de libertad de la estructura, [**M**] y [**K**] son respectivamente las matrices de masa y de rigidez globales, y **F** es el vector de carga que representa las fuerzas y momentos aplicados sobre los nodos de la malla de elementos finitos. El vector de grados de libertad **u**, las matrices de masa [**M**] y de rigidez [**K**], y el vector de carga **F** se encuentran expresados en el sistema (*x*, *y*, *z*).

2.3. El problema generalizado de autovalores

Para el caso de vibraciones libres la ecuación de movimiento expresada en la ecuación (4) se transforma en

$$[\mathbf{M}]\ddot{\mathbf{u}} + [\mathbf{K}]\mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{5}$$

Proponiendo una solución de la forma

$$\mathbf{u} = \Phi e^{-i\lambda t} \tag{6}$$

la expresión (5) puede reescribirse de la siguiente manera,

$$\left([\mathbf{K}] - \lambda[\mathbf{M}]\right)\Phi = 0 \tag{7}$$

donde λ es el autovalor asociado al modo Φ, que está relacionado con la frecuencia natural ω como $\lambda=\omega^2$. La ecuación (7) representa el problema generalizado de autovalores, que permite obtener las frecuencias naturales y modos de vibrar de la estructura [10].

3. ALGORITMO DEL CÓDIGO COMPUTACIONAL

La implementación numérica del modelo presentado en la sección 2 resulta en un código computacional que permite predecir la variación de las frecuencias naturales y modos de vibrar de una estructura alar asociada al concepto *folding wing*. En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo que describe el código computacional antes mencionado, el cual fue desarrollado con el software Matlab.

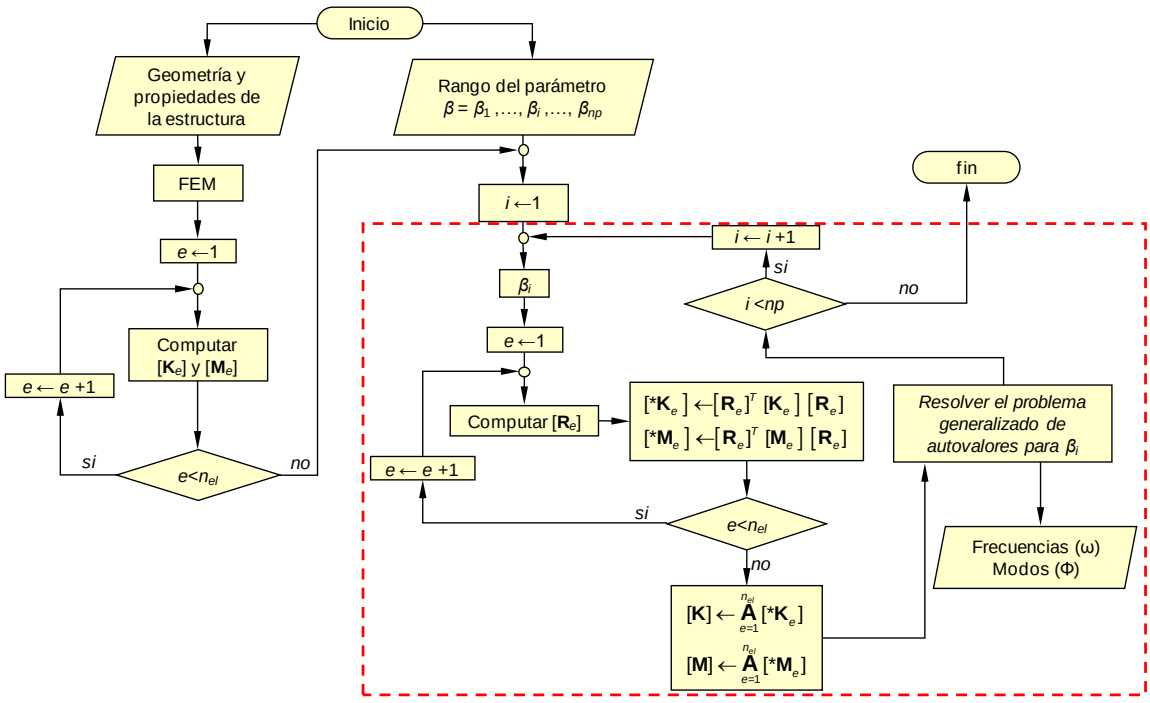


Figura 2: diagrama de flujo del código computacional.

El código recibe la información de la estructura del ala y un conjunto de *np* valores predeterminados de los parámetros de configuración *β*. Luego, mediante el FEM se obtienen las matrices de masa $[\mathbf{M}_e]$ y de rigidez $[\mathbf{K}_e]$ asociadas a cada elemento de la malla estructural. Es importante mencionar que estas matrices se computan una sola vez. Luego, para cada

parámetro β se realiza el procedimiento que se indica con un recuadro en líneas de puntos en la Figura 2 y se describe brevemente a continuación. Primero se computa la matriz $[\mathbf{R}_e]$ asociada a cada elemento de la malla estructural. Esta matriz permite llevar a cabo una trasformación de coordenadas desde el sistema local del elemento hacia el sistema global. Con $[\mathbf{R}_e]$ se obtienen las matrices de masa $[^*\mathbf{M}_e]$ y de rigidez $[^*\mathbf{K}_e]$ de cada elemento expresadas en el sistema global. Se ha utilizado el símbolo * para indicar que las matrices están escritas en (x, y, z). Una vez completado este paso, se obtienen las matrices de rigidez $[\mathbf{K}]$ y de masa $[\mathbf{M}]$ de la estructura ensamblando las matrices $[^*\mathbf{K}_e]$ y $[^*\mathbf{M}_e]$ de los elementos. Este ensamblaje se representa en el diagrama de flujo mediante el operador *ensamble* $\mathbf{A}$ [10]. Finalmente se computan las frecuencias naturales y los modos de vibrar de la estructura utilizando la función *eig* disponible en Matlab [14].

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1. Verificación del código desarrollado

Wang y Dowell [8] obtuvieron experimentalmente las frecuencias naturales de un modelo de ala reconfigurable que implementa el concepto *folding wing.* En este trabajo, con fin de verificar el código desarrollado, se computan numéricamente las frecuencias del modelo de ala reconfigurable antes mencionado y luego son comparadas con los resultados experimentales.

El modelo del ala es una placa plana, compuesta por el ala interna y externa, constituida de material de acrílico que tiene asociadas las siguientes propiedades: densidad = 1187 kg/m^3, modulo de Young = 3.18GPa y modulo de corte 1.35 GPa. La planta alar es rectangular y las dimensiones se indican en la Figura 3a. El modelo solo permite la variación del ángulo de diedro asociado al ala externa; con lo que la relación entre los ángulos θ_B y θ_C y el parámetro β es $\theta_B = 0$ y $\theta_C = \beta$. La malla de elementos finitos cuenta con 21 elementos de igual longitud.

El cálculo numérico de las frecuencias se realizó para un conjunto del parámetro de configuración β que va desde β=0° hasta β=75°, con un salto de $\Delta\beta$ = 15°. En la Figura 3b se comparan los resultados numéricos contra los experimentales para las cuatros primeras frecuencias naturales. Se puede observar claramente que el código predice la tendencia en la variación de las frecuencias naturales. Además, las magnitudes de estas frecuencias se estiman con un error aceptable. La mayor diferencia ($e_{r\,max}$) se presenta para el segundo modo en flexión, que es del orden del 10 %. Las diferencias que aparecen pueden atribuirse a que el modelo experimental contiene tres láminas de acero que son utilizadas para conectar el ala interna con el ala externa, las cuales han sido contempladas en el modelo numérico incluyendo un elemento con las propiedades y geometría de esas láminas, lo que puede no representar fielmente el modelo experimental.

ISBN: 978-987-1676-63-7

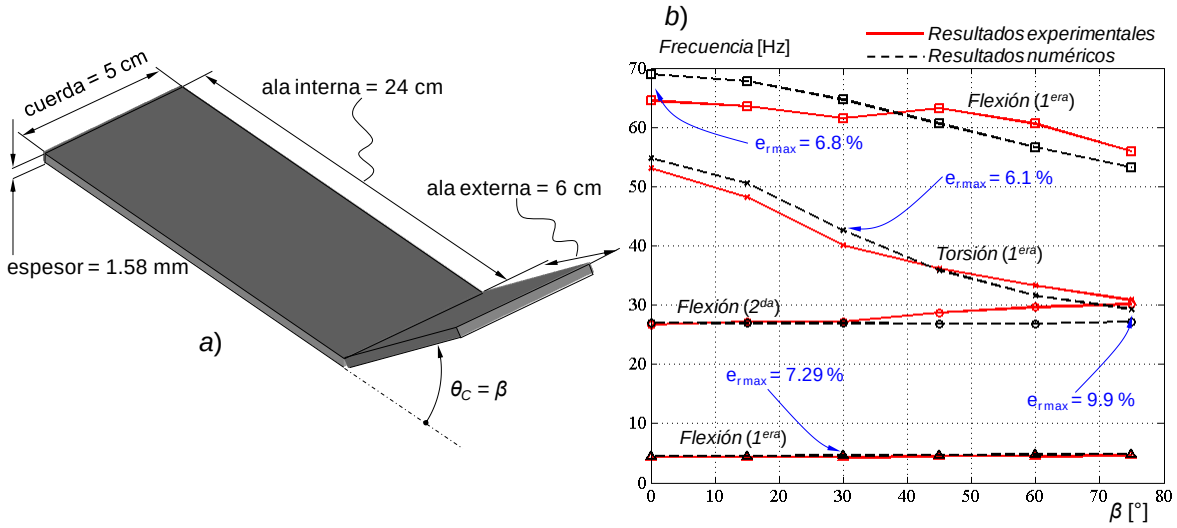


Figura 3:*a*) modelo de ala reconfigurable. *b*) comparación de frecuencias naturales.

4.2. Estudio paramétrico para un modelo de ala reconfigurable

Con el fin de mostrar la aplicación del código desarrollado se lleva a cabo un estudio paramétrico del comportamiento dinámico de un modelo de ala reconfigurable que utiliza el mecanismo *folding wing* para cambiar la forma de las alas. En la Figura 4 se muestra el esqueleto estructural del ala discretizado en 21 elementos, donde se ha incluido la superficie aerodinámica del ala discretizada en cuadriláteros (malla aerodinámica). Esta malla, que será utilizada en futuros esfuerzos para estudiar el comportamiento aeroelástico, mejora la interpretación de la deformación del ala y es por ello que será considerada en las formas de los modos. Las vigas que constituyen la estructura son de sección rectangular (ancho=2 cm, alto=0.6 cm), y el material asociado es el mismo que se utilizó en el ejemplo anterior (sección 4.1). Para reconfigurar el ala se impone la relación $\theta_B = -\beta$ y $\theta_C = \beta$.

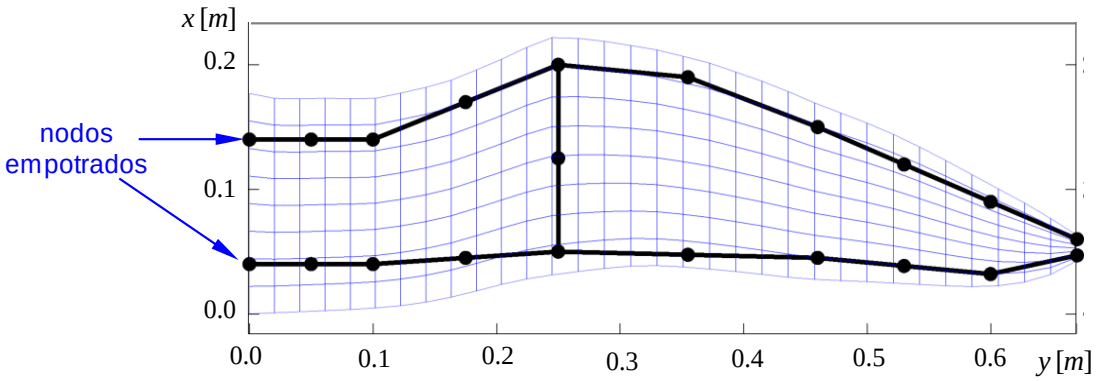


Figura 4: Geometría de la estructura del ala reconfigurable.

Se realizaron simulaciones para un conjunto del parámetro de configuración β que va desde β=0° hasta β=45°, con un salto de $\Delta\beta$ = 1°. En la Figura 5 se presenta la variación de las seis primeras frecuencias naturales de la estructura alar. En la Figura 5a se observa que a medida

que se incrementa β, la primera frecuencia crece muy lentamente y la segunda decrece con mayor velocidad; se puede observar que la diferencia entre ellas se hace cada vez más estrecha. La frecuencia asociada al tercer modo crece al principio hasta alcanzar un máximo cerca de β = 5° y después comienza a disminuir. En la Figura 5b, se puede ver que la cuarta frecuencia tiene un comportamiento creciente con el incremento de β, e inversamente, las frecuencias 5 y 6 decrecen lentamente con algunas oscilaciones.

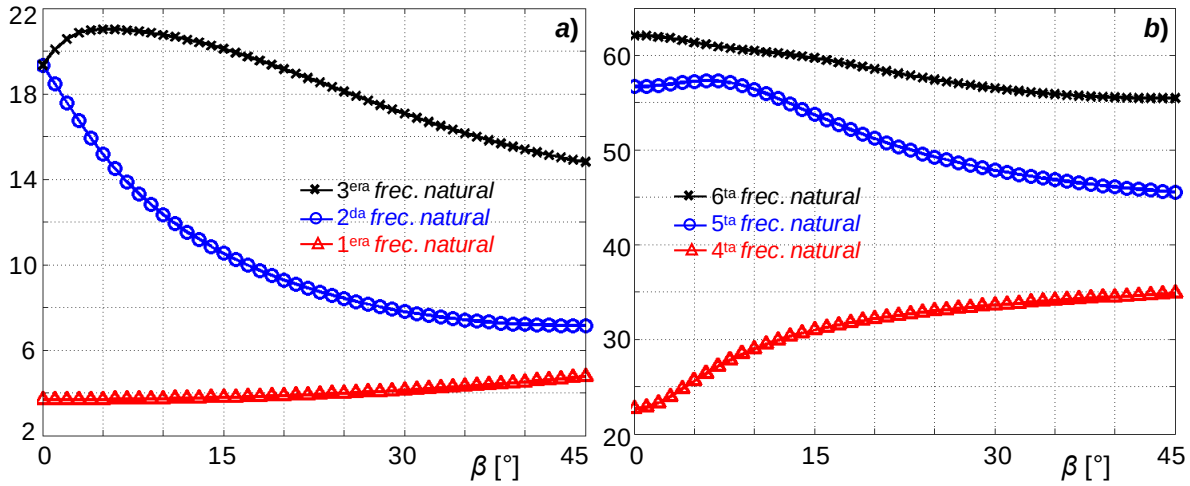


Figura 5: Variación de las primeras 6 frecuencia naturales.

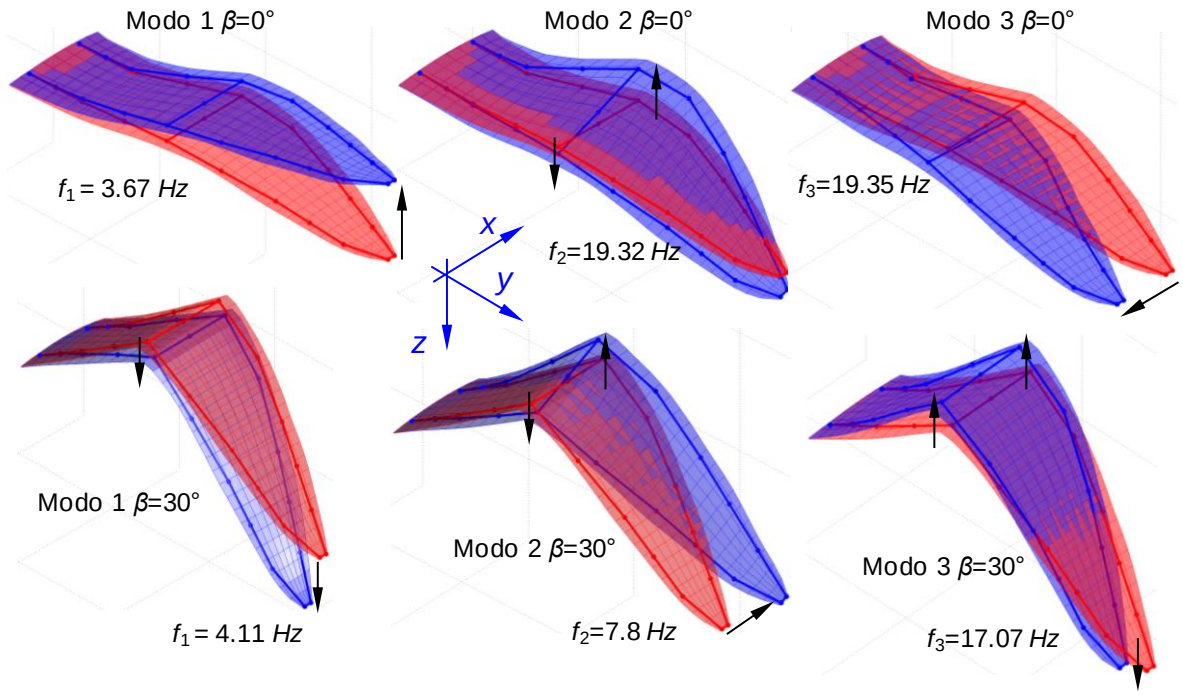


Figura 6: primeros 3 modos para dos configuraciones definidas por β=0° y β=30°.

ISBN: 978-987-1676-63-7

En la Figura 6 se muestran los primeros 3 modos de la estructura para dos configuraciones del ala dadas por los valores β=0° y β=30°. Es posible notar que se ha incluido la superficie aerodinámica para brindar una imagen más detallada de la deformada del ala. La deformación de la malla aerodinámica se obtuvo realizando un procedimiento de interpolación multivarible utilizando funciones de base radial [15]. Las imágenes en color rojo corresponden a la estructura en el estado no deformado mientras que las imágenes en color azul corresponden a la estructura deformada (forma del modo). En esta Figura se ha indicado con flechas en color negro el sentido de la deformación con el fin de mejorar la interpretación de la forma de los modos. Se puede observar, para ambas configuraciones β=0° y β=30°, que el primer modo corresponde a la flexión transversal en la dirección z. Además, para las dos configuraciones, el segundo modo corresponde al primer modo en torsión, y es posible ver que para β=30° hay una componente de deformación de la EAE en la dirección de *x* que es provocada por la torsión de la EAI. Para β=0° el tercer modo corresponde a la flexión en la dirección *y*, sin embargo para β=30° el tercer modo corresponde a la flexión en la dirección *z*.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el desarrollo de un código computacional que permite llevar a cabo estudios paramétricos del comportamiento dinámico de estructuras de alas reconfigurables que utilizan el mecanismo *folding wing* para cambiar su forma. El código es capaz de predecir la variación de las frecuencias naturales y los modos de vibrar de una estructura alar, que resulta como producto del cambio de geometría del ala, el cual se describe mediante la evolución de los ángulos de diedro de la EAI y de la EAE. Para determinar las propiedades dinámicas del ala reconfigurable se resuelve un problema de autovalores generalizado. Las matrices de masa y de rigidez asociadas a este problema se obtienen mediante el método de los elementos finitos. El código fue verificado con resultados experimentales disponibles en la literatura que corresponden a un modelo de ala que implementa el concepto *folding wing*. Además, se presentaron algunos resultados numéricos de un estudio paramétrico de un modelo de ala reconfigurable. Estos resultados permitieron comprender el comportamiento de las frecuencias naturales de la estructura del ala frente a la variación de sus ángulos de diedro. Se presentaron algunas de las formas modales para dos configuraciones del ala. La inclusión de la malla aerodinámica, que en futuros esfuerzos será utilizada en un estudio aeroelástico, permitió brindar una imagen más detalla de la deformada del ala. El modelo asociado al código aquí presentado constituye una base para el desarrollo de un modelo que permita estudiar el comportamiento aeroelástico de vehículos aéreos no tripulados con alas que cambian de forma o alas reconfigurables.

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. REFERENCIAS

[1] Sarris Z., *Survey of UAV applications in civil markets*. 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation. June, 2001, Dubrovnik, Croatia.

[2] Thill C., Etches J., Bond I., Potter K. and Weaver P. *Morphing skins*. The Aeronautical Journal, vol. 112, pp. 117-139, 2008.

[3] Love M., Zink S. and Weisshaar T. *Validation of the Lockheed Martin morphing concept with wind tunnel testing*. 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007.

[4] Abdulrahim M. and Lind R. *Control and Simulation of a Multi-Role Morphing Micro Air Vehicle*. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, San Francisco, California, 2005.

[5] Tang D. and Dowell E. H., *Theoretical and Experimental Aeroelastic Study for Folding Wing Structures*. Journal of Aircraft, vol. 45, no. 4, pp. 1136-1147, 2008.

[6] Vasista S., Tong L., and Wong K. C. *Realization of Morphing Wings: A Multidisciplinary Challenge*. Journal of aircraft, vol. 49, no. 1, 2012.

[7] Liska S., and Dowell E. H. *Continuum Aeroelastic Model for a Folding-Wing Configuration*. AIAA Journals, vol. 47, no. 10, pp. 2350-2358, 2009.

[8] Wang I., and Dowell E. H. *Structural Dynamics Model of Multisegmented Folding Wings: Theory and Experiment*. Journal of Aircraft, Vol. 48, No. 6, pp. 2149-2160, 2011.

[9] Zhao Y., Hu H. *Parameterized aeroelastic modeling and flutter analysis for a folding wing*. Journal of Sound and Vibration, vol. 331, vo. 2, pp. 308-324, 2012.

[10] Hughes T.J.R. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications, Mineola, NY, 2000.

[11] Bucalem M.L. and Bathe K-J. *The Mechanics of Solids and Structures –Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

[12] Zienkiewicz O. C. *El Método de los Elementos Finitos*, Reverté, España, 1980.

[13] Shabana A. A. *Dynamics of Multibody Systems*, fourth edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.

[14] http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/eig.html, consulta: mayo de 2016.

[15] Buhmann M., *Radial Basis Functions*. Cambridge University Press, 2005.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

PROPAGACION DE INCERTIDUMBRE EN LOS PATRONES DE VIBRACION DE CABLES DE TRANSMISION DE ELECTRICIDAD

Damián F. Campos [1], **Marcelo T. Piovan** [2] **y Germán G. Keil** [1]

[1]Dpto. Mecánica Aplicada - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 Neuquén – Prov. del Neuquén - Argentina
correo-e: damian.campos@fain.uncoma.edu.ar
german.keil@fain.uncoma.edu.ar

[2]Centro de Investigaciones de Mecánica Teórica y Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional FRBB y CONICET. 11 de Abril 461, Bahía Blanca. Argentina.
correo-e: mpiovan@frbb.utn.edu.ar

RESUMEN

El estudio de la dinámica de cables, para transmisión de electricidad de alta tensión, es una actividad que mantiene una vigencia muy marcada a nivel internacional y especialmente en nuestro país debido a la extensión de los plazos de vida útil y las complicaciones de mantenimiento. Esto último es remarcable para distintas regiones del país y épocas del año. En consecuencia, diversos y más amplios estudios que conlleven a estimar con mayor detalle la condición de funcionamiento de tales componentes, son necesarios y en algunos casos acuciantes.

La dinámica de cables de transmisión de alta tensión puede representarse por medio de modelos matemáticos de diversa complejidad bajo concepciones lineales o no lineales. Los modelos de cables a su vez pueden ser concebidos como estructuras de viga unidimensionales o bien como cuerdas. Cada modelo ofrece, de suyo, ventajas y desventajas a título computacional y/o representativo [1]. Aun así, cada modelo posee un conjunto de parámetros (densidad, módulo de elasticidad, fuerzas, etc.) que tienen de por sí, una variabilidad o incertidumbre lo cual fundamenta el empleo de estudios estadísticos.

Para encarar la dinámica de una estructura/modelo matemático con parámetros inciertos se suele emplear una técnica denominada Enfoque Probabilístico Paramétrico. El mismo, contempla el uso del método de Monte Carlo [2] para efectuar un conjunto de realizaciones, partiendo de aceptar a los parámetros inciertos como variables aleatorias con distribuciones definidas según las condiciones del problema.

En este trabajo se efectúa un estudio sobre la propagación de incertidumbre debida a parámetros del modelo matemático de cable empleando el enfoque de cuerda vibrante. Se coteja la variabilidad en la respuesta en el dominio temporal del modelo. Las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias asociadas a los parámetros se deducen, a partir de las condiciones del problema, empleando el Principio de Máxima Entropía de información.

Palabras Claves: *Vibraciones estocásticas, incertidumbre paramétrica, cables.*

Área Temática: D- Diseño y Proyecto de Componentes y Máquinas.

1. INTRODUCCIÓN

En las líneas de transmisión eléctrica, los conductores están sometidos a distintos tipos de vibraciones mecánicas. Las vibraciones de mayor criticidad son las denominadas vibraciones eólicas en el rango de frecuencias comprendidos entre 10 y 50 Hz. Dado que, este tipo de vibraciones, se presentan frecuentemente pueden ocasionar daños por fatiga del material, limitando la vida útil del conductor. Debido a las altas inversiones de capital comprometidas en los proyectos de líneas de transmisión se requiere prestar especial atención a los efectos que pueden ocasionar las vibraciones sobre los conductores.

A partir de la década de 1930, el amortiguador tipo “Stockbridge” y dispositivos similares han sido utilizados exitosamente para amortiguar las vibraciones de los conductores. Sin embargo, se conocen casos en los que el conductor ha sufrido severos daños en los puntos de sujeción del mismo, es decir en sus grapas. Obviamente esto se debe al hecho de que las características dinámicas del conductor y el amortiguador no han sido correctamente compatibilizadas. Es por esto que se le debe prestar especial atención a los modelos utilizados para analizar este tipo de problemas.

Como una primera aproximación al problema planteado es muy útil conocer el comportamiento dinámico del conductor en distintas condiciones de servicio. Para ello se puede abordar el problema con modelos que consideran a los cables como estructuras de viga unidimensionales o bien como cuerdas. En este trabajo se utiliza el modelo de cuerda vibrante, lo cual da resultados aproximados en la respuesta del mismo, pero es empleado por algunos autores [3] por su simplicidad y considerando que el autoamortiguamiento del cable es muy bajo en comparación con el que proporcionan los amortiguadores que se montan al cable.

Estos modelos matemáticos tienen diversa complejidad bajo concepciones lineales o no lineales. Cuando una cuerda vibra, la longitud de la misma también fluctúa, causando oscilaciones en la tensión de la cuerda. Estas oscilaciones longitudinales ocurren a aproximadamente dos veces la frecuencia de vibración transversal. El acoplamiento entre las oscilaciones longitudinales y transversales de la cuerda es esencialmente un fenómeno no lineal que no es capturado por los clásicos modelos lineales adoptados para analizar este tipo de problemas. La no linealidad de este sistema se debe a que la fuerza restitutiva de la cuerda es proporcional a un término cúbico del desplazamiento vertical de la posición de equilibrio.

En nuestro análisis vamos a considerar la ecuación diferencial que modela matemáticamente el problema teniendo en cuenta las no linealidades presentes del sistema luego de tensar la cuerda, asumiendo una fuerza del tipo sinusoidal.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Dado que el conjunto de parámetros (densidad, módulo de elasticidad, fuerzas, etc.) considerados en el modelo tienen de por sí, una variabilidad o incertidumbre asociada a la real determinación de los mismos es necesario utilizar herramientas estadísticas para su correcta evaluación.

Se propone la aplicación del Enfoque Probabilístico Paramétrico, el cual, contempla el uso del método de Monte Carlo [2] para efectuar un conjunto de realizaciones, partiendo de aceptar a los parámetros inciertos como variables aleatorias con distribuciones definidas según las condiciones del problema. La distribución de densidad de probabilidad de cada variable asumida como aleatoria se determina empleando el principio de Máxima Entropía [4], según el cual se deducen las distribuciones de probabilidades, que para una información dada, logra obtener la máxima incertidumbre de respuesta.

2. DESCRIPCION DEL MODELO DETERMINISTICO PARA LA CUERDA

Para deducir la ecuación de movimiento que rige el comportamiento del sistema bajo estudio, se toma como referencia el modelo representado en la Figura 1. En el mismo se considera una masa sujeta a dos resortes idénticos y fijos de longitud natural $\boldsymbol{l}_0$ y constante $\boldsymbol{k}$. La masa puntual es libre de moverse en el plano x-y.

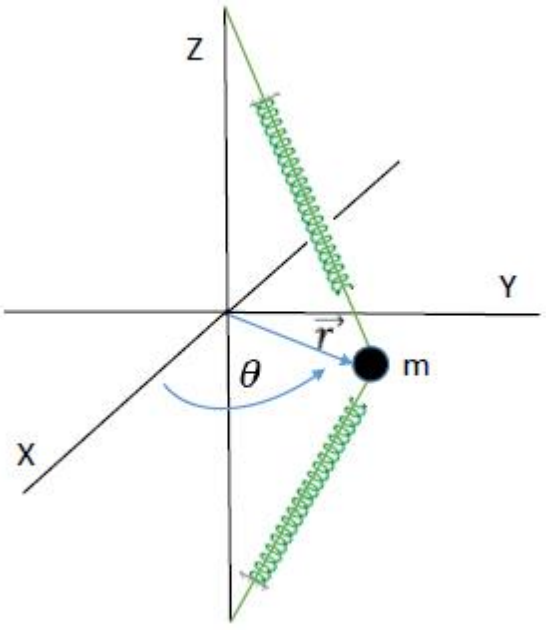


Figura 1: Modelo para la descripción de las oscilaciones de una cuerda.

La masa es libre de moverse en el plano xy (se adoptan coordenadas polares).

En este apartado las definiciones más importantes, para comprender las expresiones, son las siguientes:

ω_0: Frecuencia natural del sistema.

ω: Frecuencia de excitación.

l_0: Longitud inicial de la cuerda.

λ: Constante de amortiguamiento.

K: Constante no lineal (rigidez).

La fuerza restauradora que los resortes ejercen sobre la masa es:

$$F = -4kr(1 - l_0/\sqrt{l^2 + 4r^2} \tag{1}$$

Donde l es el estiramiento de los resortes y r es la coordenada radial.

Realizando una expansión en series de potencias de (r/l) para $r < l$, de la ecuación (1), la fuerza nos queda:

$$F = -4k(l - l_0)\left(\frac{r}{l}\right) - 8kl_0\left[\left(\frac{r}{l}\right)^3 - 3\left(\frac{r}{l}\right)^5 + \cdots\right] \tag{2}$$

Expresión que puede ser aproximada por:

$$F = m\ddot{r} \cong -4k(l - l_0)\left(\frac{r}{l}\right)\left[1 + \frac{2l_0}{(l - l_0)}\left(\frac{r}{l}\right)^2\right] \tag{3}$$

Lo cual da como resultado una fuerza restauradora cúbica, con un término no lineal cuando $l \cong l_0$. Definiendo:

$${\omega_0}^2 \cong \left(\frac{4k}{m}\right)\left(\frac{(l - l_0)}{l}\right) \tag{4}$$

$$K \cong \frac{2l_0}{l^2(l - l_0)} \tag{5}$$

La ecuación (3) toma la forma:

$$\ddot{r} + {\omega_0}^2 r(1 + Kr^2) = 0 \tag{6}$$

La ecuación (6) representa una ecuación diferencial en dos dimensiones, no lineal y conservativa. Su comportamiento depende únicamente de la relación l_0/l. Si $l_0 < l$, $r = 0$ es un punto de

ISBN: 978-987-1676-63-7

equilibrio estable y representa una cuerda vibrando en su modo fundamental. Para el caso que $l_0 > l$, el origen es un punto de equilibrio inestable, pero existen dos puntos de equilibrio estable alrededor de este, en $r = \pm l$, este caso representa el comportamiento de una banda elástica. Para nuestro caso particular se estudiará solamente la condición $l_0 < l \ \ (K > 0)$. La ecuación (6) representa un sistema libre y sin rozamiento, pero en este trabajo analizaremos la ecuación considerando un término de amortiguamiento y la acción de una fuerza exterior, por lo que tenemos:

$$\ddot{r} + \lambda\dot{r} + {\omega_0}^2 r(1 + Kr^2) = f(\omega t) \tag{7}$$

La ecuación (7) se puede reescribir en forma adimensional considerando la siguiente transformación:

$$\tau = \omega_0 t \quad ; \quad s = r/l_0 \tag{8}$$

Reemplazando (8) en (7), obtenemos:

$$s'' + \beta s' + (1 + \alpha s^2)s = g(\gamma\tau) \tag{9}$$

Donde:

$$\beta \equiv \frac{\lambda}{\omega_0} \quad ; \quad \alpha \equiv K l_0^2 \quad ; \quad g \equiv \frac{f}{l_0 \omega_0^2} \quad ; \quad \gamma \equiv \frac{\omega}{\omega_0} \tag{10}$$

Si ahora consideramos que los extremos de la cuerda son fijados de tal forma que solamente permiten que esta vibre en un solo plano, la ecuación (9) se convierte en la ecuación forzada de Duffing [6]:

$$x'' + \beta x' + (1 + \alpha x^2)x = g(\gamma\tau) \tag{11}$$

La ecuación (11) asume que el movimiento está confinado en el plano x-z (ver Figura 1). El término forzante generalmente se describe como una excitación periódica de la forma:

$$g(\gamma\tau) = G\cos(\gamma t) \tag{12}$$

3. DESCRIPCION DEL MODELO ESTADISTICO PARA LA CUERDA

En la sección anterior se presentaron las ecuaciones que describen el modelo determinístico para resolver el sistema no lineal de la cuerda vibrante. Se debe tener en cuenta que existe la posibilidad de que los parámetros de la ecuación diferencial presenten una importante aleatoriedad. Debido a esto se adopta un modelo probabilístico, el cual es construido seleccionando parámetros inciertos y deduciendo las variables aleatorias correspondientes

basándose en la información disponible. Tales parámetros se admiten como variables aleatorias sujetas a las siguientes exigencias:

- Se trata de variables reales acotadas entre valores reales.

- Se conocen los límites de tales valores reales y también se conoce el valor nominal del modelo determinístico

- Las variables aleatorias son estadísticamente independientes.

- Se emplea el Principio de Máxima Entropía para calcular las distribuciones probabilísticas de las variables aleatorias.

En base a lo explicitado anteriormente, se usa el Principio de Máxima Entropía, debido a que el mismo permite la construcción de las funciones de densidad de probabilidad de las variables aleatorias garantizando la consistencia (con la información disponible) y la física del problema. El Principio de Máxima Entropía se define de la siguiente forma:

$$p_V^{opt} = \underset{p_v \in \mathrm{B}}{\arg max} S(p_V) \tag{13}$$

Donde, p_V^{opt} es la óptima función de densidad de probabilidad tal que $S\left(p_V^{opt}\right) \geq S(p_V), \forall p_V \in \mathrm{B}, y\ S$ es la medida de la entropía, mientras que B es un conjunto admisible de funciones de densidad de probabilidad que satisfacen los datos conocidos de las variables aleatorias y las restricciones físicas. La medida de entropía S se define de la siguiente forma:

$$S(p_V) = -\int_{\Xi} p_V ln(p_V) dv \tag{14}$$

Donde Ξ es el soporte de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias teniendo en cuenta el proceso de optimización.

En este trabajo se adopta una distribución de probabilidad uniforme de forma tal que:

$$p_{v_i}(v_i) = 1_{\left[L_{v_i}, U_{v_i}\right]}(v_i) \frac{1}{U_{v_i} - L_{v_i}}, i = 1,2, \ldots \tag{15}$$

Donde $1_{\left[L_{v_i}, U_{v_i}\right]}$ es la denominada función de soporte genérica para las variables aleatorias a emplear en el modelo estocástico, en tanto que L_{v_i} y U_{v_i} son los límites inferior y superior de la variable aleatoria v_i. Con el fin de realizar las simulaciones estadísticas se emplea, en este trabajo, la función $unifrnd\left(L_{v_i}, U_{v_i}\right)$ de Matlab. Para esto, los límites inferior y superior deben ser tales que:

$$L_{v_i} = V_i\left(1 - \delta_i \sqrt{3}\right) \tag{16}$$

$$U_{v_i}=V_i\left(1+\delta_i\sqrt{3}\right) \tag{17}$$

Siendo V_i y δ_i, el valor nominal determinístico y el coeficiente de variación de la variable aleatoria correspondiente. Para que la respuesta esté acotada y no sea divergente el coeficiente de variación debe ser tal que $\delta_i \in \left[0,1/\sqrt{3}\right]$.

Una vez que las variables aleatorias son definidas apropiadamente entonces la ecuación diferencial estocástica puede ser escrita a través de las ecuaciones (11) y (12) de la siguiente forma:

$$\bar{x}'' + \bar{\beta}\bar{x}' + \bar{x} + \bar{\alpha}\bar{x}^3 = \bar{G}cos(\bar{\gamma}t) \tag{18}$$

Entendiendo que con $\bar{\beta},\ \bar{\alpha},\ \bar{\gamma}$, $y\ \bar{G}$ se identifican variables aleatorias y por lo tanto la respuesta $\bar{x}$ es aleatoria. Acto seguido, se emplea el método de Monte Carlo para simular la respuesta estocástica de la cuerda, lo cual implica la solución de la ecuación determinística para realizaciones estadísticamente independientes con cada una de las variables aleatorias involucradas. Finalmente se debe mantener el proceso de simulación dentro de un nivel de aproximación definido, para ello se debe calcular la convergencia de la media cuadrática de la respuesta estocástica $\bar{x}$, utilizándose la siguiente expresión:

$$Conv(N_{SM}) = \sqrt{\frac{1}{N_{SM}}\sum_{j}^{N_{SM}}\left(\int_A \left\|\bar{x}_j - x\right\|^2 d\tau\right)} \tag{19}$$

Donde $\bar{x}_j$ es la respuesta estocástica de la realización j-ésima, x es la respuesta determinística y NSM es el número de simulaciones del método Monte Carlo.

4. APLICACIÓN NUMÉRICA

Para llevar adelante la simulación numérica de la respuesta estocástica de la cuerda se implementa la rutina de cálculo mediante una aplicación que integra recursos de Matlab y FlexPDE. Como se puede observar en la Figura 2, en primera instancia se ingresan los datos del problema en Matlab, considerando las variables determinísticas, luego genera las variables aleatorias de acuerdo al algoritmo de cálculo propuesto en el punto anterior. Una vez que se definen las variables, envía los datos al programa desarrollado en FlexPDE para que resuelva las ecuaciones diferenciales determinística y estocástica, los resultados obtenidos son almacenados por Matlab y una vez que la secuencia de cálculo se repite tantas veces el valor adoptado para la cantidad de realizaciones del método de Monte Carlo, procesa la información y presenta los

histogramas de cada variable aleatoria y la respuesta estocástica de la amplitud adimensional del desplazamiento de la cuerda. En forma paralela realiza el análisis de convergencia definido en (19).

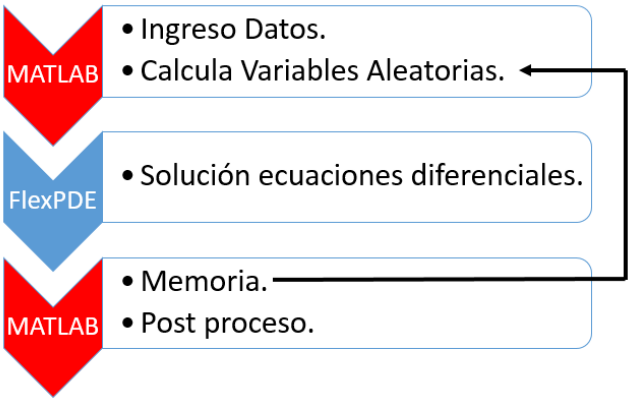


Figura 2: Esquema rutina de cálculo.

Para efectuar el estudio estocástico, las variables aleatorias tienen valores medios o expectativas dadas por [5] $(\beta = 0{,}0037, \alpha = 86{,}2, \gamma = 0.99, G = 52)$. Para estos estudios se adoptan diversos rangos de incertidumbre inicial asociadas a los coeficientes de variación de las variables aleatorias. En la Figura 3 se muestra un ejemplo típico de convergencia de la simulación estocástica efectuada en este caso para un valor $\delta_i = 0.025$ en todas las variables aleatorias. Obsérvese que a partir de 150 realizaciones se puede considerar que la convergencia se encuentra dentro de un 5% de admisibilidad.

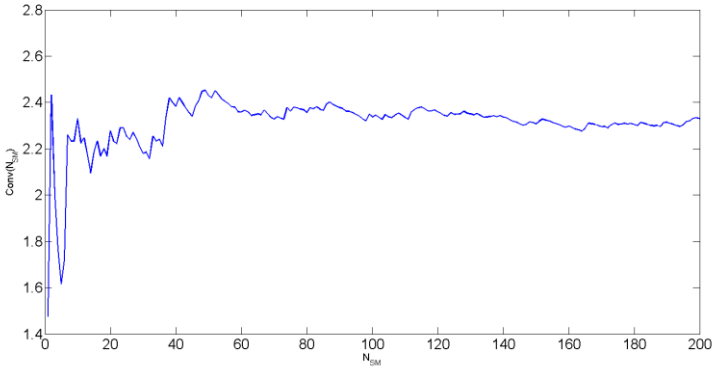


Figura 3: Variación de la función de convergencia.

En la Figura 4 se muestra el histograma de ocurrencias para uno de los parámetros adoptados como variables aleatorias uniformes. Si bien, el histograma no tiene una semejanza inmediata con

ISBN: 978-987-1676-63-7

una distribución uniforme se debe destacar que el mismo corresponde a un dominio muestral de 200 realizaciones con las cuales se ha logrado una convergencia aceptable de hasta el 5%. En el caso de efectuarse simulaciones con mayor número de realizaciones (algo muy costoso, computacionalmente hablando), se tendrían distribuciones con mayor detalle.

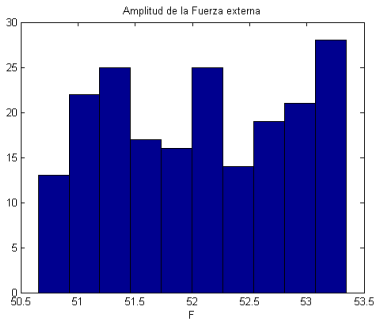


Figura 4: Histograma obtenido para una de las variables aleatorias.

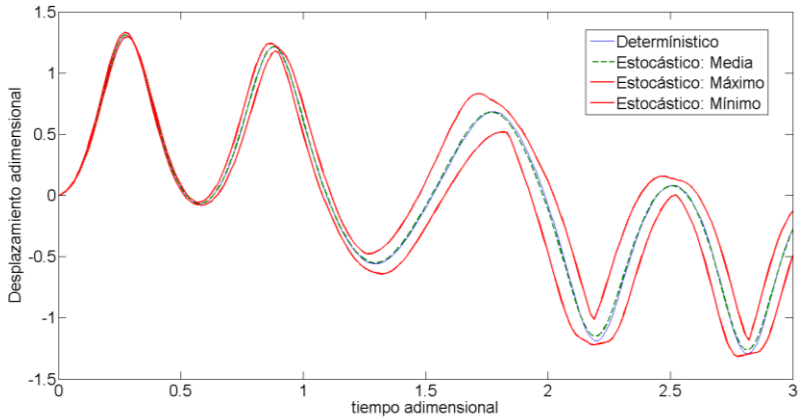


Figura 5: Variación del desplazamiento con δ=0.025 en el forzamiento y en la frecuencia.

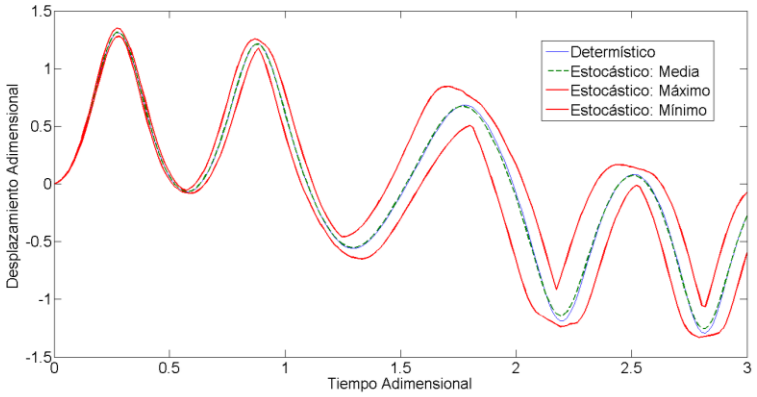


Figura 6: Variación del desplazamiento con δ=0.025 en todas las variables aleatorias.

ISBN: 978-987-1676-63-7

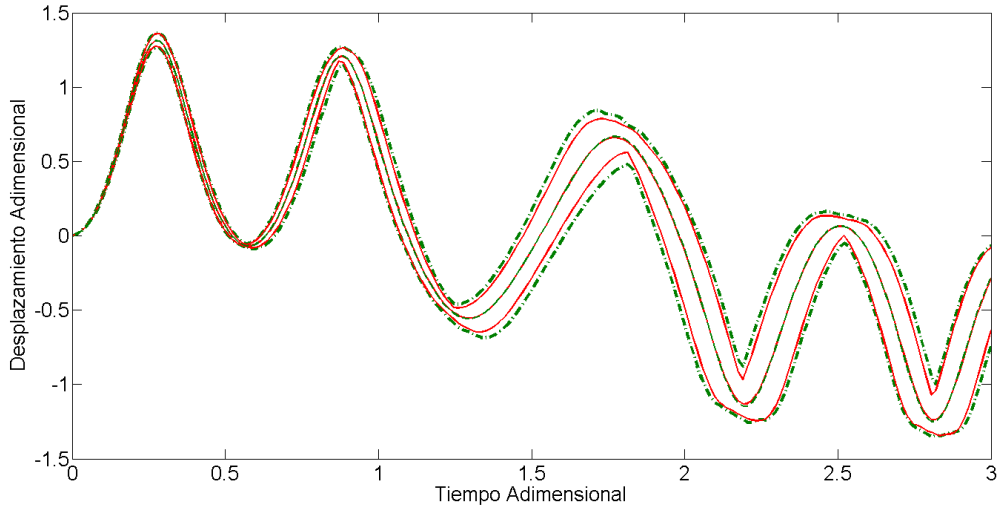


Figura 7: Comparación con δ=0.025 en el forzamiento y en la frecuencia. En el resto de variables aleatorias se tiene δ=0.025 (trazo lleno) y δ=0.050 (trazo punteado).

En la Figura 5 se muestra la respuesta temporal del desplazamiento lateral adimensional considerando que solo el forzamiento y la frecuencia de excitación son las únicas variables aleatorias (con coeficiente de variación del 2.5%), mientras que las demás entidades pasibles de ser aleatorias son consideradas determinísticas para fines de cálculo comparativo. En la misma, se indican la respuesta del cálculo determinístico, la media del cálculo estocástico y los límites máximos y mínimos para todo el proceso. Nótese que la respuesta nominal es muy cercana y concordante con la media estocástica. A su vez se puede observar que en la medida que transcurre el tiempo adimensional la propagación incertidumbre en la respuesta es cada vez mayor. Algo similar se puede colegir de la Figura 6, donde se expone la respuesta temporal considerando todos los parámetros como variables aleatorias con coeficiente de variación del 2.5%. Se puede percibir un ligero incremento en la incertidumbre de la respuesta.

En la Figura 7 se efectúa una comparación de la influencia de los parámetros asociados a las características del cable (es decir, rigidez elástica, masa, amortiguamiento y rigidez no lineal), manteniendo los parámetros de forzamiento con la misma incertidumbre de las figuras anteriores, es decir con un coeficiente de variación del 2.5%. Así pues se puede observar que un incremento del 100% en el coeficiente de variación de tales parámetros (es decir de 0.025 a 0.050) incrementa ligeramente la incertidumbre de la respuesta adimensional. A pesar de ello, se puede notar que las respuestas medias son muy concordantes.

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio sobre la propagación de incertidumbre asociada a parámetros de un modelo de cuerda no lineal aplicable a las vibraciones laterales de cables de transmisión eléctrica. Se ha empleado el método paramétrico probabilístico junto con el principio de máxima entropía para deducir las distribuciones de las variables aleatorias a partir de la información disponible. Se ha observado que a pesar de fijar coeficientes de variación relativamente pequeños en las variables aleatorias asociadas a los parámetros del modelo, se obtiene una dispersión que es cada vez mayor en la medida que avanza el tiempo. A pesar de ellos las respuestas medias de todos los cálculos estocásticos son bastante concordantes.

Este es un aporte moderado en el estudio de aspectos estocásticos asociados a cables de transmisión eléctrica, sin embargo no debe ser considerado definitivo pues no se ha efectuado un análisis en el dominio de la frecuencia, el cual puede arrojar detalles de propagación de incertidumbre más ricos, en virtud de lo observado para otros problemas estocásticos en la literatura abierta internacional. Sin embargo tal estudio formará parte de futuras ampliaciones del presente.

6. REFERENCIAS

[1] L.D. Lutes, S. Sarkani, Stochastic analysis of structural and mechanical vibrations. Prentice-Hall, New Jersey, U.S.A., 1997.

[2] C. Bucher, Computational analysis of randomness in structural mechanics. CRC Press, Leiden, The Nederland's, 2009.

[3] K. Anderson & P. Hagedorn. On the energy dissipation in spacer dampers in bundled conductors of overhead transmission lines. Journal of Sound and Vibration, Vol. 180, No. 4, pp. 539-556, 1995.

[4] E.T.Jaynes, Information theory and statistical mechanics. The Physical Review, vol. 106, No. 4, pp 620-630, 1957.

[5] Nicholas B. Tufillaro, Nonlinear and chaotic string vibrations. Am. Journal of Phys., Vol.57, No. 5, pp. 408-414, 1989.

[6] Shanmuganathan Rajasekar y Miguel A.F. Sanjuan, Nonlinear Resonances. Springer International Publishing, 2016.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad del Comahue y a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional a través del PID 2194TC por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de esta publicación y a CONICET.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANALISIS ESTRUCTURAL DE BOGIE EN TANQUE CISTERNA SEMIRREMOLQUE

Julián Salafia[1], Pablo A. Hormazábal[1], Bruno E. García[1], Cristian Dominguez[1], Germán Franco[1], Walter Giordano*[1-2] y Rodrigo Paz[1-3]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica - Facultad Regional San Nicolás
Universidad Tecnológica Nacional - Colon 332 - San Nicolás - Buenos Aires, Argentina
e-mail: gemeco@frsn.utn.edu.ar
[2] Tanque Fangio S.A - Ruta 32 Km. 2,2 Pergamino Buenos Aires Argentina.
[3] CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina
INTEC - Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química
CIMEC - Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería
Güemes 3450, Santa Fe – Argentina - Livermore Software Technology Corp. - California, USA

RESUMEN

El Grupo de Estudio en Mecánica Computacional (GEMeCo) del Departamento Mecánica de la Facultad Regional San Nicolás dependiente de la Universidad Tecnológica Nacional mediante convenio de cooperación mutua con la empresa “Tanques Fangio SA”, dedicada a la fabricación de vehículos de carga para el transporte de combustibles líquidos; tomó como objetivo de trabajo evaluar el comportamiento de la estructura del bogie en tanque cisterna semirremolque.

Un equipo de trabajo de profesionales e investigadores de ambas instituciones, dan forma a este proyecto, que es fruto de trabajos sistemáticos basados en los conocimientos existentes, derivados de la experiencia práctica, aplicadas a necesidades locales de mejora de los bogies ya existentes.

Se estudia el diseño actual estimando los esfuerzos internos a los cuales se encuentran sometidos los distintos componentes, rediseñando, de ser necesario, piezas del equipo; a partir de una relación favorable costo beneficio.

El trabajo se inició analizando la información brindada por la empresa, la experiencia desarrollada por ésta y la búsqueda bibliográfica. Se procedió al análisis de cargas estáticas de la estructura, separando el bogie de sus componentes secundarios, y considerando la carga máxima transportada por el semirremolque.

La modelización y el mallado tridimensional permitieron estimar los esfuerzos internos a los cuales se encuentran sometidos los distintos componentes, mediante la simulación por cálculo de elementos finitos. El procesamiento y la obtención gráfica de resultados permitieron verificar que los valores de tensión se encuentran dentro de los límites permisibles.

Palabras Claves: *Bogie, Análisis Estructural, Semirremolque, Simulación, Elementos Finitos.*

1. INTRODUCCIÓN

Como antecedente a este proyecto se analizó el estado tensional y de deformaciones de dos diseños de tanques semirremolque de aleación de aluminio construidos por la empresa "Tanques Fangio S.A." de la ciudad de Pergamino. Este estudio se cita en las Referencias de este trabajo y fue presentado oportunamente en un congreso reciente [5].

El bogie es la estructura de chasis que contiene los ejes y ruedas que permiten su traslación. Con el fin de continuar trabajando conjuntamente con la empresa, se decidió estudiar el comportamiento del mismo a raíz del surgimiento de una oportunidad de mejora de su diseño. Basándose en el análisis de proyectos similares, citados al final de este trabajo, se comenzó el desarrollo de esta investigación [1, 2, 3, 4].

El proyecto consiste en la modelización del bogie de un tanque semirremolque de aluminio para transporte de combustibles líquidos (nafta, gasoil).

El objetivo que se busca es modelizarlo mediante un software comercial paramétrico para luego someterlo a condiciones de carga similares a las reales, y de esta manera analizar el estado tensional resultante, que servirá para tomar decisiones en cuanto a la mejora y optimización del diseño.

El modelo fue realizado utilizando el software SolidWorks Professional en base a planos constructivos provistos por la empresa Tanques Fangio S.A. Los modelos del tanque y el bogie se aprecian en la figura 1.

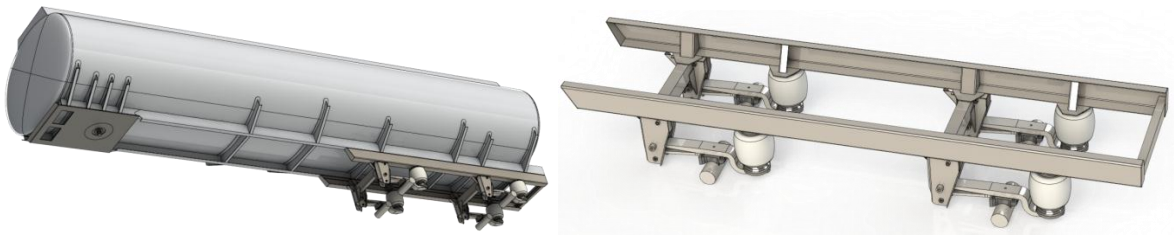


Figura 1. Tanque de semirremolque y bogie

2. METODOLOGÍA

Para la modelización por elementos finitos (FEM) se procedió a la discretización del modelo mediante malla de sólidos, definiendo para ello elementos cuadráticos de alto orden.

En función del tipo de cargas se realizaron dos modelos de malla. Uno para el caso de cargas simétricas y otro modelo para cargas asimétricas (Figuras 2 y 3).

ISBN: 978-987-1676-63-7

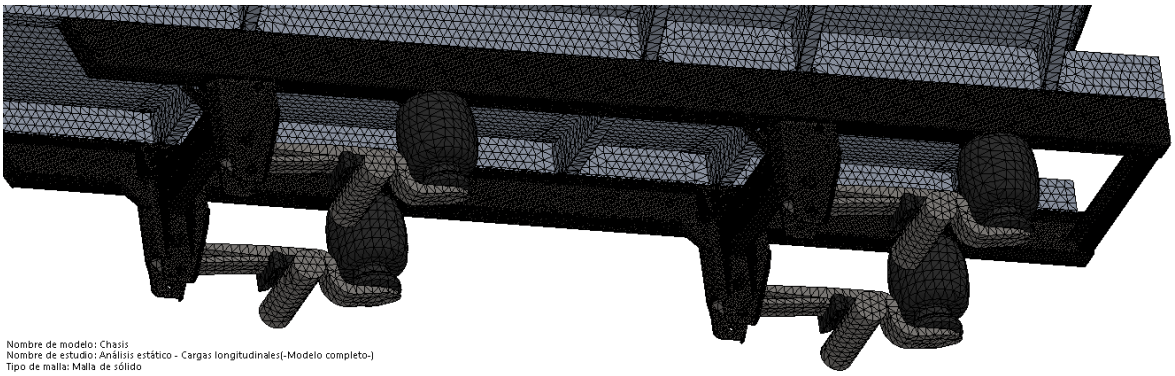


Figura 2. Malla de solido de modelo completo

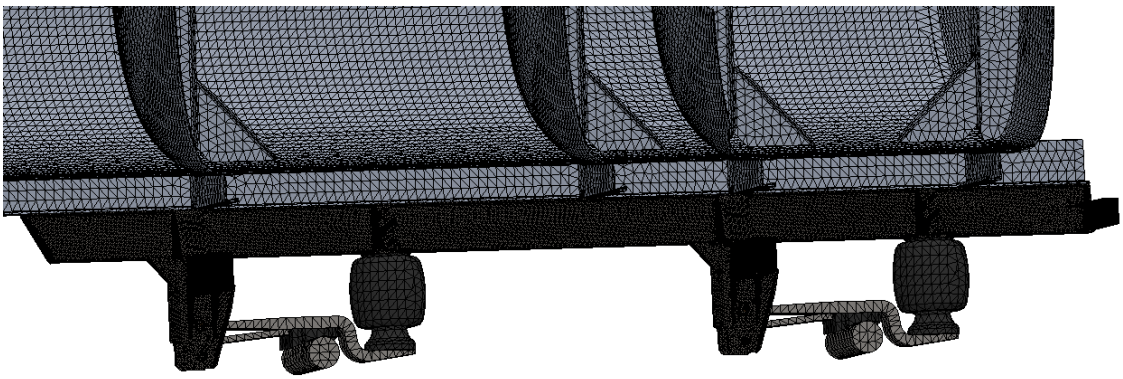


Figura 3. Malla de sólido de mitad simétrica del modelo

Las cargas y condiciones de borde para ambos modelos se colocaron basándose en los valores recomendados en las especificaciones DOT [6].

El mallado del tanque de aluminio propiamente dicho fue realizado únicamente a los fines de colocar las cargas, y sólo interesa el modo en que transmite las mismas al bogie, por lo que se utilizó un mallado relativamente grueso para el mismo (40mm) y se aplicó un control de mallado en el chasis (10mm) con un cociente de aspecto de sus elementos de 1,4 a fin de obtener valores de tensión precisos.

2.1. Materiales

El material constitutivo de los tanques es una aleación de aluminio cuya especificación se basa en la EN 5083 [9], mientras que el chasis y planchón de apoyo de la quinta rueda está formado por chapa de acero al carbono ASTM A-36 [8]. Las propiedades mecánicas del acero utilizado para el bogie se resumen como sigue: Densidad =7,85 gr/cm^3; Módulo elástico = 201 GPa; Tensión de límite elástico =250 MPa; Tensión límite de rotura =410 MPa.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.2. Cargas

Las cargas empleadas se basaron en los siguientes datos:

- Peso propio de estructura (tanque de aluminio + chasis de acero).
- Peso debido al combustible líquido contenido en los 6 compartimientos.

Estas cargas, determinadas automáticamente por el software en función de su densidad, fueron afectadas de coeficientes de aceleración dinámica basados en las especificaciones DOT [6], dados de la siguiente manera (figura 4):

Sentido vertical → 1,7g

Sentido longitudinal → 0,75g

Sentido transversal → 0,4g

Por medio del software SolidWorks se modelizó esta situación a través de cargas inerciales (carga de gravedad), las cuales se fijaron en función de estos coeficientes. Como estas cargas sólo contemplan a la parte estructural, se tuvieron que agregar cargas de presión que simulan la presencia del combustible líquido contenido.

Los tres estados de carga se simularon en tres situaciones diferentes.

A) Cargas verticales puras, incrementadas un 70%.

B) Cargas longitudinales, debido a cargas de desaceleración (0,75g) + cargas verticales por gravedad (1g).

C) Cargas transversales, debido a efectos dinámicos durante viraje del vehículo (0,4g) + cargas verticales por gravedad (1g).

Las cargas se aprecian en las figuras 4, 5, 6 y 7.

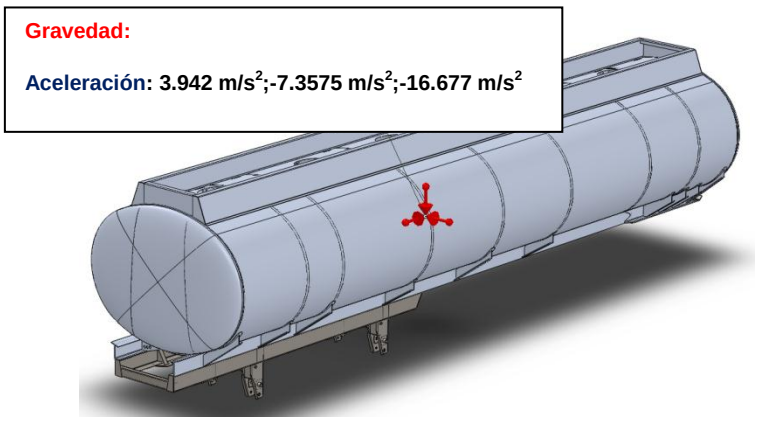


Figura 4. Fuerzas inerciales aplicadas a la estructura

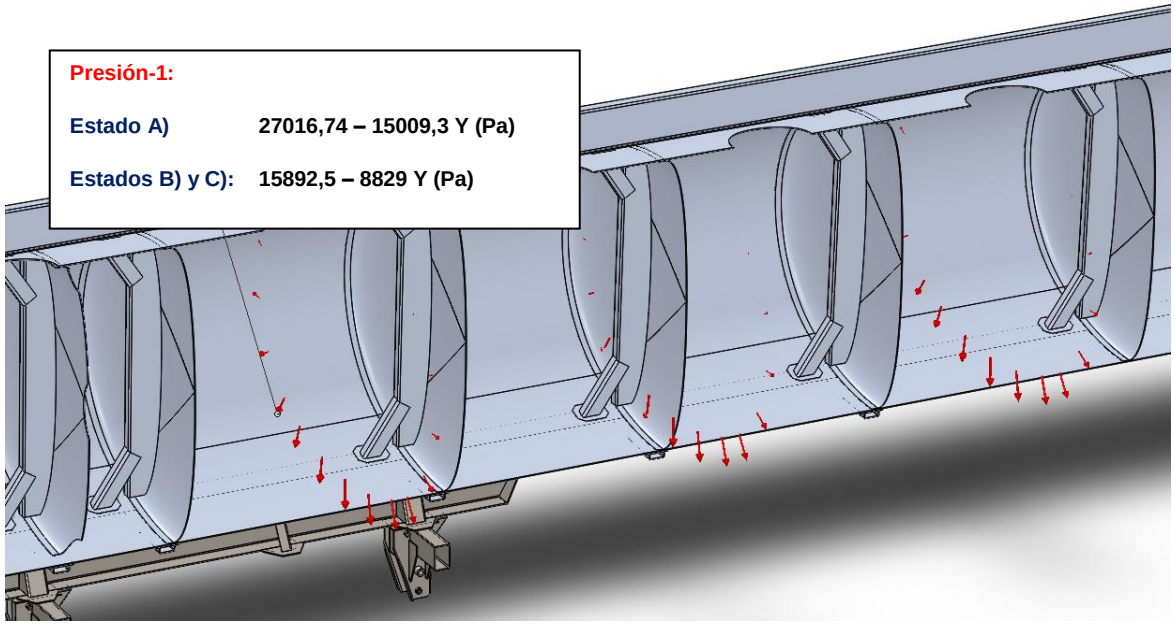


Figura 5. Fuerza inercial ejercida por el combustible en sentido vertical (1,7g)

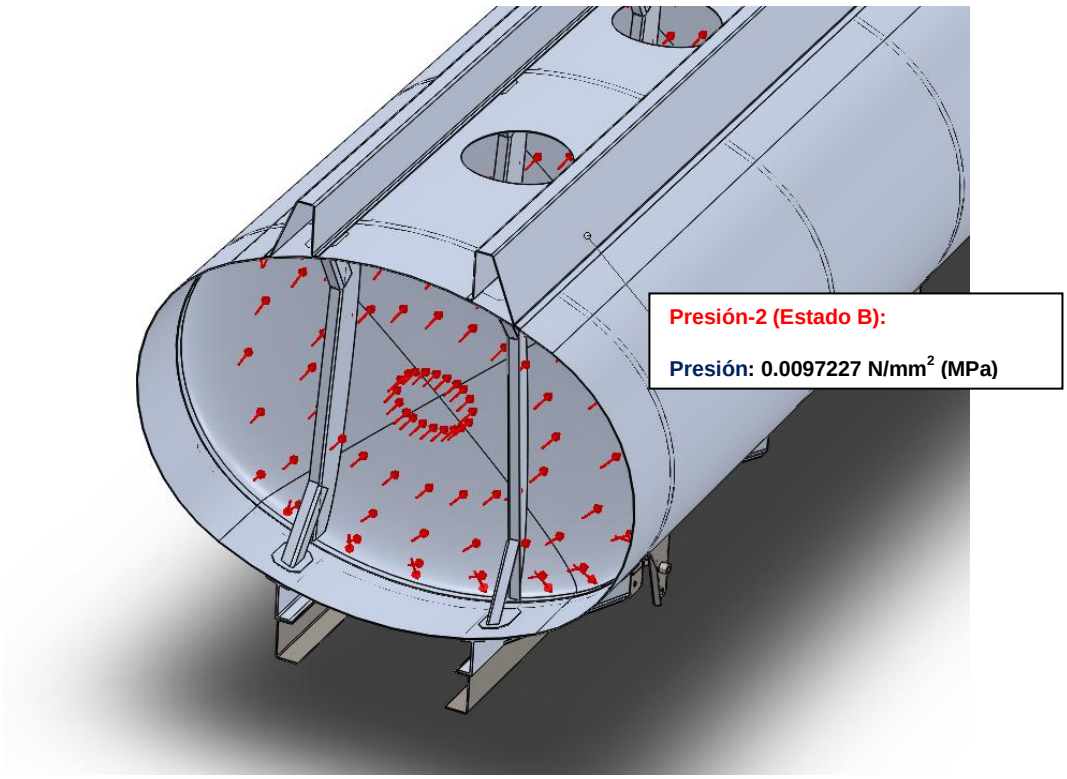


Figura 6. Fuerza inercial ejercida por el líquido en sentido longitudinal (0,75 g)

ISBN: 978-987-1676-63-7

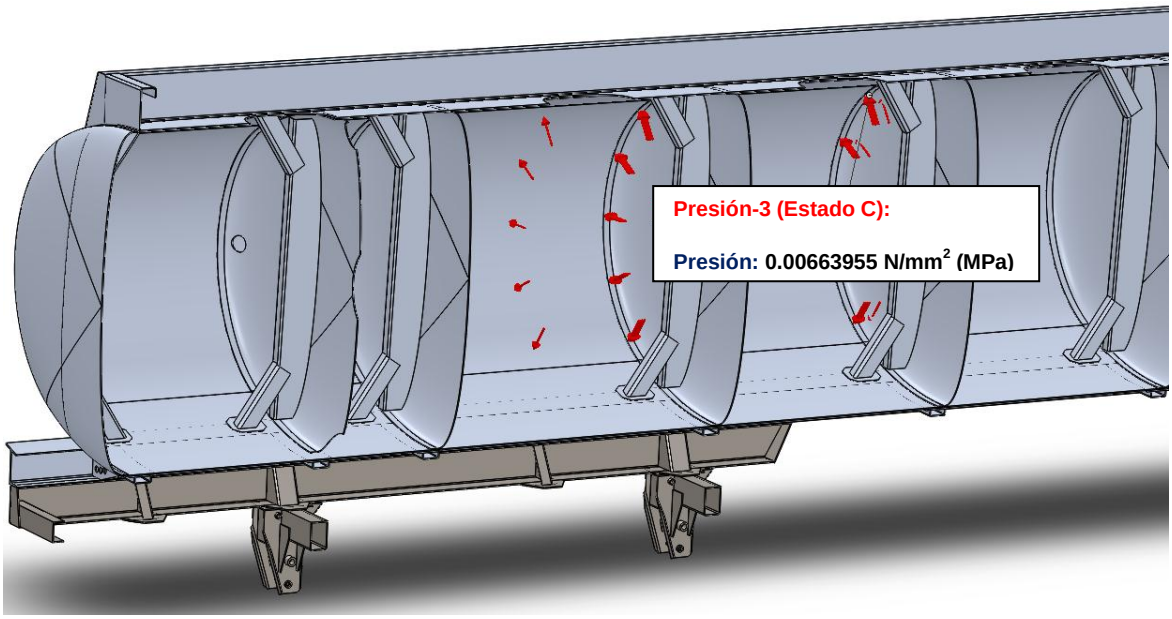


Figura 7. Fuerza inercial ejercida por el líquido en sentido transversal (0,4 g)

Para la determinación de las cargas de presión se tuvo en cuenta la densidad del combustible líquido y los coeficientes inerciales ya mencionados, así como el volumen de cada compartimiento y los valores de área de las secciones afectadas por la presión del fluido.

Para el caso de la figura 5 se consideró el gradiente de presión debido a la altura de presión del líquido. Para ello se fijó un sistema coordenado con su origen en el fondo del recipiente. De esta forma la presión es máxima en su origen, y su valor decrece linealmente hasta la superficie, donde ésta se anula.

2.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde se fijaron según se muestra en las figuras 8 y 9, estableciéndose restricciones fijas a los ejes de las ruedas. En la zona delantera del tanque (perno rey y planchón de arrastre) se fijó una restricción vertical del planchón y una del tipo de bisagra fija al perno rey.

Para el estado de cargas ‘A’ se tomó la mitad del modelo (cortada con un plano longitudinal vertical) y se asignó una condición de rodillo a todas las superficies cortadas que restringe grados de libertad de rotación de las caras cortadas y su traslación en sentido normal al plano. De esta manera se logra obtener una malla con la mitad de elementos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

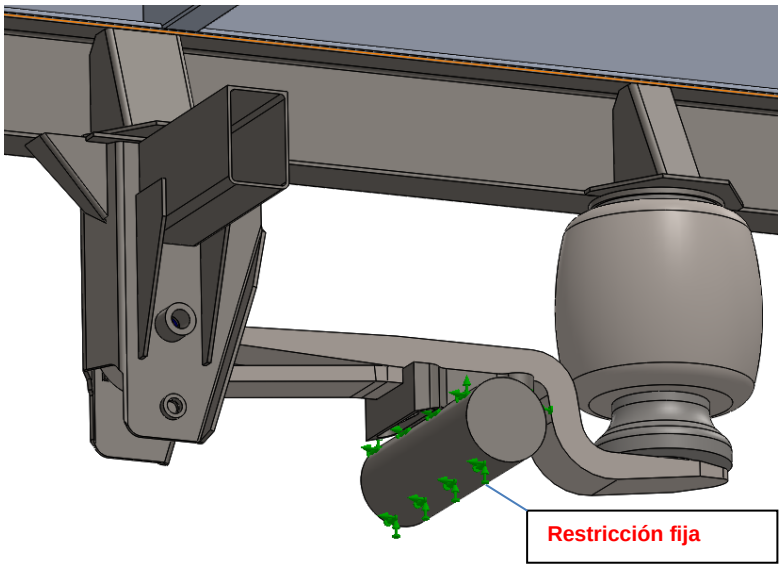


Figura 8. Restricciones fijas en ejes de ruedas

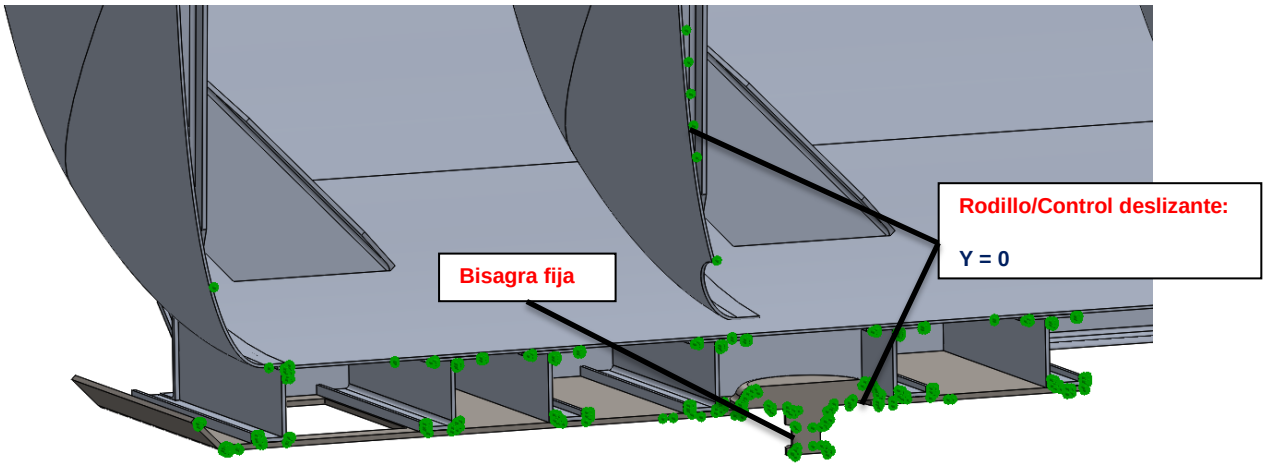


Figura 9. Restricción vertical del planchón de arrastre, restricción de traslación del perno rey y restricción de traslación normal de las caras de simetría

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizó un solver del tipo Iterativo para la simulación de los estados tensionales.

Los resultados se aprecian en las siguientes figuras:

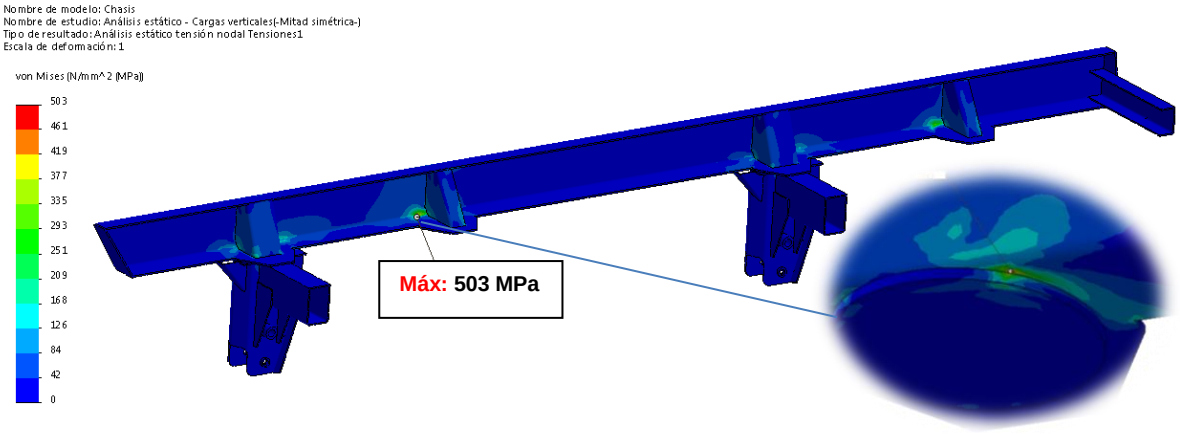


Figura 10. Distribución de tensiones de Von Mises – Estado de cargas 'A'

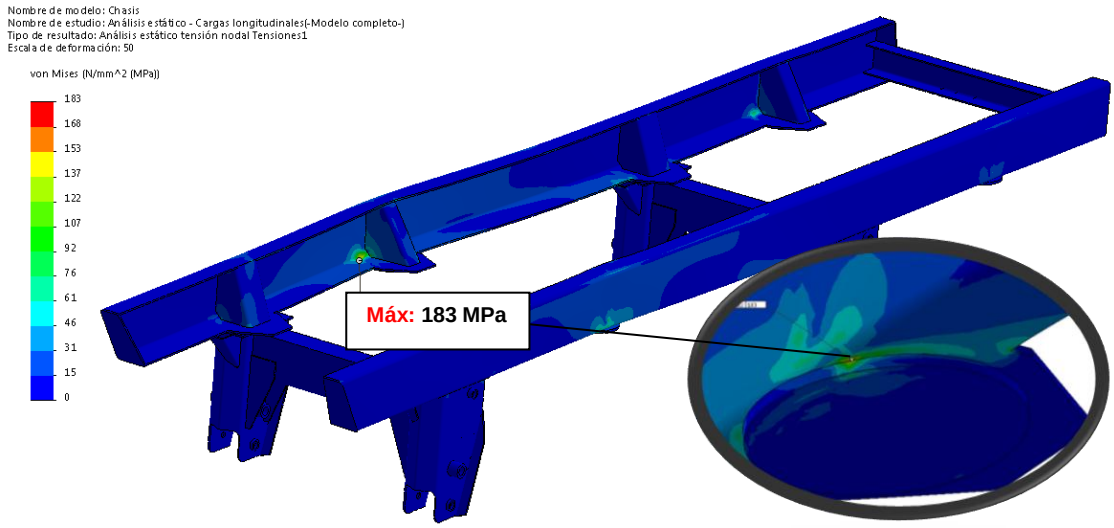


Figura 11. Distribución de tensiones de Von Mises – Estado de cargas 'B'

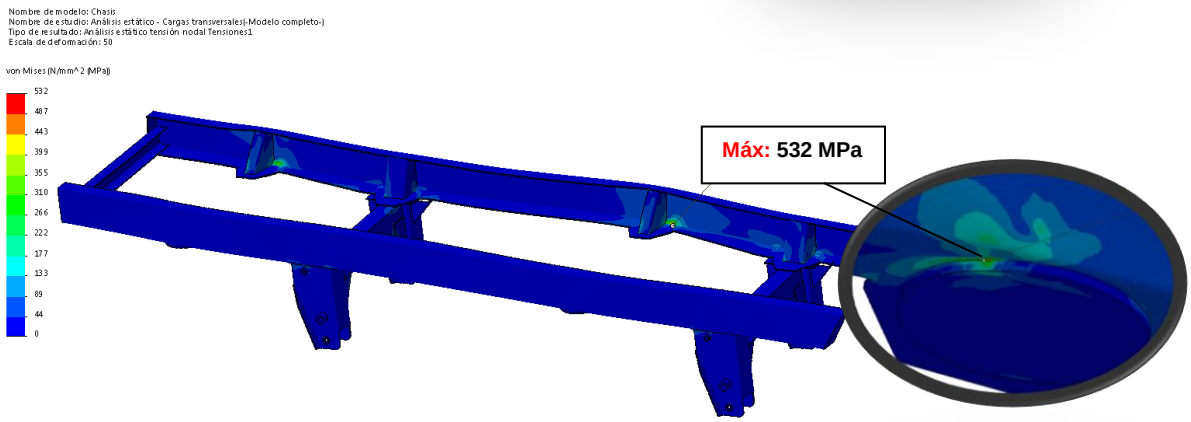


Figura 12. Distribución de tensiones de Von Mises – Estado de cargas 'C'

ISBN: 978-987-1676-63-7

Como observa, los valores máximos de tensión, si bien corresponden a zonas puntuales localizadas, superan los valores límites de rotura del material, exceptuando el caso 'B'.

Por ello se reemplazaron algunos componentes de la estructura del chasis con el objetivo de minimizar estos valores y optimizar el diseño del mismo (Figura 13).

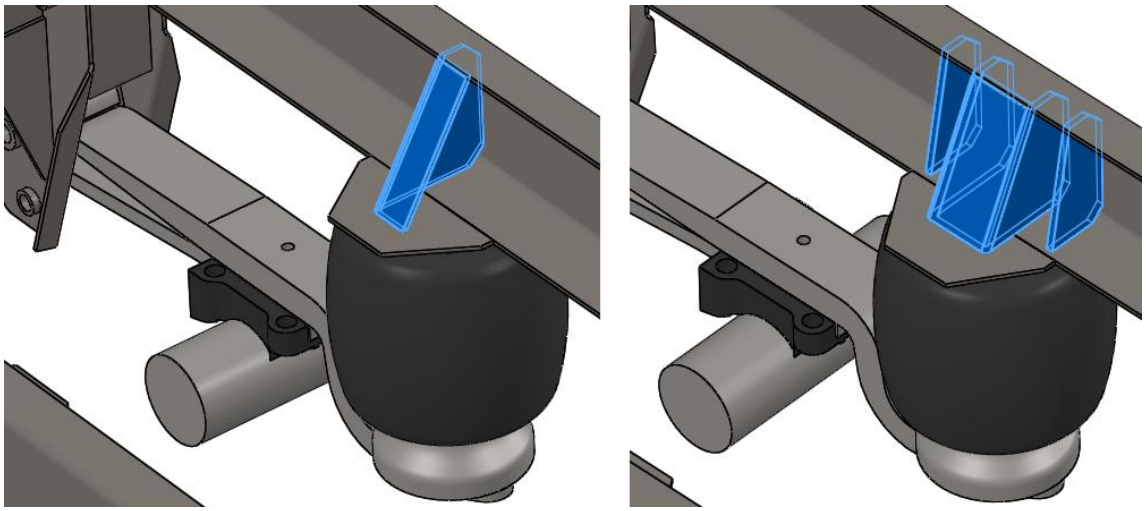


Figura 13. Reemplazo de componentes para refuerzo de estructura

El análisis se repitió para los tres estados de carga, arribando a las soluciones que se observan en las siguientes imágenes.

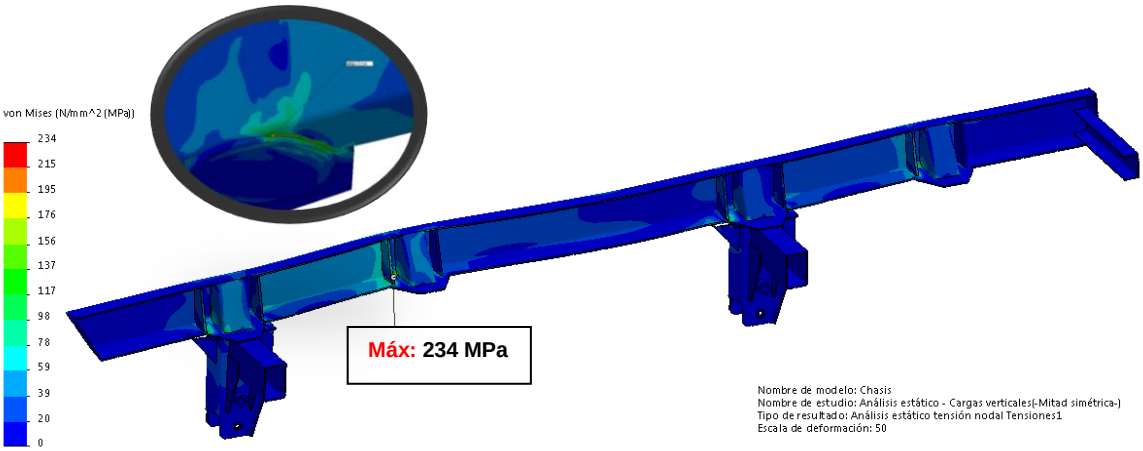


Figura 14. Distribución de tensiones de Von Mises – Estado de cargas 'A'

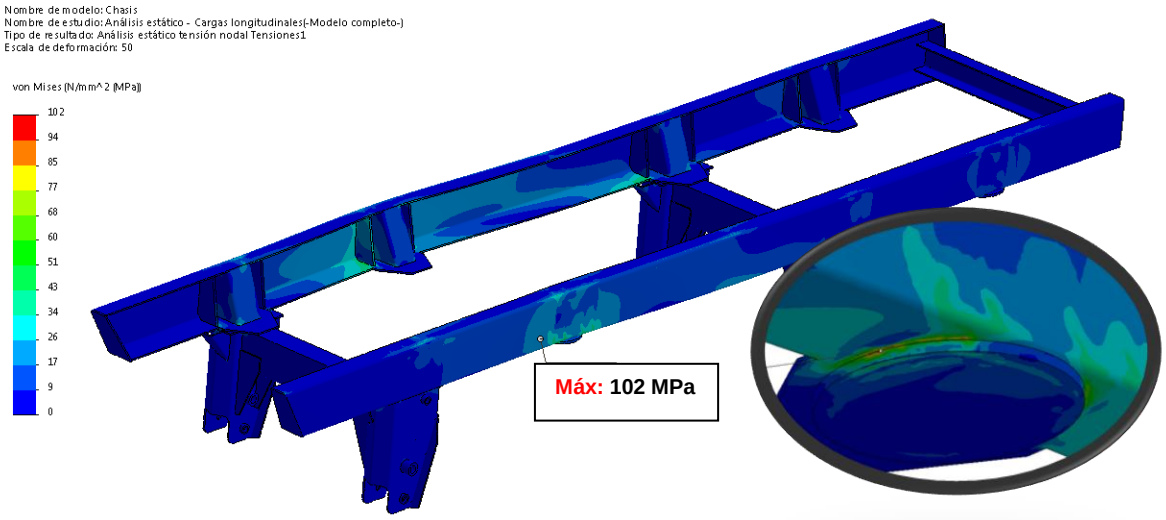


Figura 15. Distribución de tensiones de Von Mises – Estado de cargas 'B'

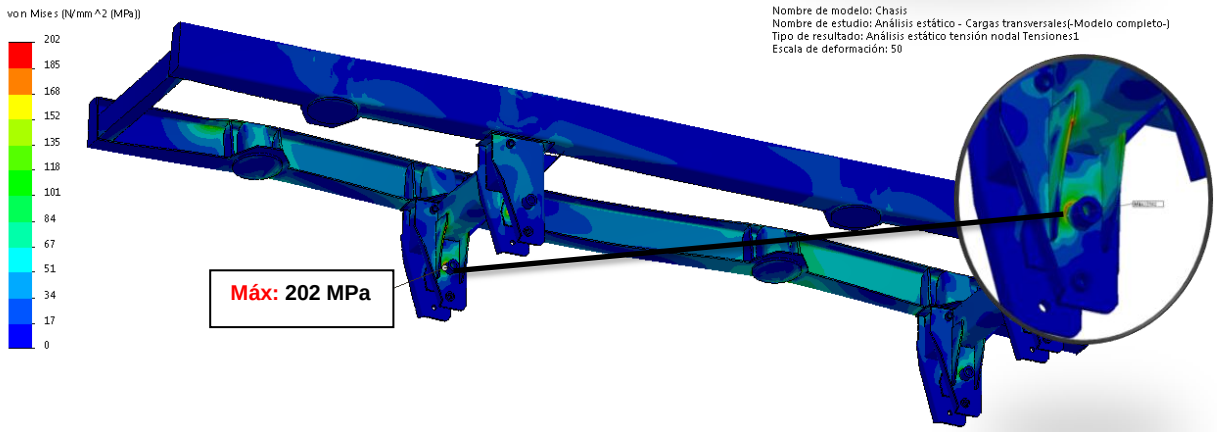


Figura 16. Distribución de tensiones de Von Mises – Estado de cargas 'C'

A partir de los resultados anteriores puede concluirse que los refuerzos propuestos resultaron en una disminución considerable de las tensiones máximas, obteniéndose picos de tensión con valores por debajo de los límites de fluencia del material, minimizando las posibilidades de falla por fatiga de sus componentes y, por ende, incrementando sustancialmente su vida útil.

4. CONCLUSIONES

Como conclusión, a través del análisis computacional del modelo para diferentes estados de carga, se pudo determinar que se lograría un incremento elevado de la vida útil del bogie estudiado. Los valores máximos de tensión (por picos de concentración) resultan inferiores a los valores límite de

fluencia bajo idénticas condiciones de carga impuestas al tomar como referencia las indicadas en las especificaciones DOT.

Vale la aclaración de que las condiciones de carga impuestas en este estudio han resultado más conservadoras que las estipuladas en la normativa mencionada. Esto permite otorgar mayor confiabilidad respecto a la vida útil de los bogies, ya que los resultados obtenidos fueron positivos aun habiéndose extremado las condiciones de carga.

5. REFERENCIAS

[1] Franck G., Gennaro S., Lonardi B., Eichhorn J., Bruno A. *Análisis Dinámico de un Chasis de Semirremolque de Servicio Pesado.* Mecánica Computacional Vol XXVIII, págs. 503-517. Tandil, Argentina. 2009.

[2] Enríquez Sánchez A., Salvador Rumazo F. *Diseño y Construcción de un Tanque para Crudo de 13000 litros, con Chasis*. Latacunga, Ecuador. 2014.

[3] Domínguez C., Franco N., Pallanza D., Giordano W., Paz R. *Comportamiento de la Estructura de Adaptación del Tercer Eje, Instalada en los Tractores de Semirremolque (Estudio Estático).* COCIM 2012. La Serena, Chile.

[4] Domínguez C., Palmieri F., Franco N., Pallanza D., Giordano W., Paz R. *Comportamiento de la Estructura de Adaptación del Tercer Eje, Instalada en Tractores de Semirremolque (Estudio Dinámico).* CIBIM 2013 - XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica - La Plata, Argentina.

[5] Domínguez C., Franco N., Giordano W., García B., Hormazabal P., Paz R. *Análisis Estructural de Tanque Cisterna Semirremolque Fabricado en Aleación de Aluminio para Transporte de Combustibles Líquidos.* CIPP 2016 – Congreso de Ingeniería de Procesos y Productos – Rosario, Argentina.

[6] Especificaciones DOT: 49 CFR – EEUU: Apartado 178.345, Apartado 178.346, Apartado 178.347, Apartado 178.348.

[7] BPVC Section XII – Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks.

[8] Norma ASTM A36. Especificación normalizada para acero al carbono estructural. http://www.astm.org/Standards/A36

[9] Especificación EN 5083. Propiedades de aleación de aluminio. http://gleich.de/files/en_aw_5083.esp.pdf

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SIMULACIÓN MEDIANTE PARÁMETROS CONCENTRADOS DEL CIRCUITO CARDIOVASCULAR ASISTIDO MEDIANTE UNA BOMBA PULSÁTIL IMPLANTABLE.

G. Nolte, M. Berli, S. Ubal y J. Di Paolo

Grupo Biomecánica Computacional – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Entre Ríos
Ruta Prov. 11 km. 10, 3100 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina
nolte.geo@gmail.com

RESUMEN

Los circuitos eléctricos son útiles para representar el comportamiento de otros sistemas físicos por analogía de las ecuaciones diferenciales que los describen. Un modelo del sistema cardiovascular (SC) puede implementarse fácilmente con simples analogías; del corazón con una bomba hidráulica, de las diferencias de presión con diferencias de tensión, del flujo sanguíneo con la corriente y de la interacción del flujo con los vasos, con resistencias, capacitores e inductancias.

En este trabajo se presenta un modelo eléctrico construido por analogía con el SC, que incluye un dispositivo de asistencia ventricular pulsátil (DAVP) en desarrollo. El modelo se basó en parámetros concentrados (0D) para la obtención de las curvas características del SC, así como su posterior combinación para evaluar el impacto del DAVP frente a condiciones como las de un corazón insuficiente.

El modelo consta de ecuaciones diferenciales ordinarias resueltas mediante Matlab para obtener las curvas más relevantes del SC y cotejarlas con las curvas fisiológicas. Una vez alcanzada una respuesta adecuada del modelo, se procedió a realizar modificaciones en el mismo para llevar a analizar condiciones no fisiológicas promovidas por ciertas patologías.

En una segunda etapa, se modeló el DAVP mediantes parámetros concentrados para capturar las principales modificaciones de las variables hemodinámicas y tener una primera aproximación al impacto que podría tener dicha bomba en el sistema cardiovascular. De esta forma y previamente a la vinculación del modelo 0D con el modelo 3D del DAVP -en actual desarrollo- se puede tener información sobre la compatibilidad hemodinámica del DAVP y el SC, de modo de realimentar el diseño del primero.

Los resultados son alentadores y muestran que, aunque la frecuencia de funcionamiento del DAVP no es fisiológica, las variables hemodinámicas de presión y caudal no se verían afectadas apreciablemente.

Palabras Claves: *sistema cardiovascular – modelo de parámetros concentrados – analogía eléctrica e hidráulica – dispositivos de asistencia ventricular.*

1. INTRODUCCIÓN

Una ventaja de los circuitos eléctricos surge de la capacidad de los mismos de poder representar el comportamiento de otros sistemas físicos por analogía de las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de los mismos. El sistema cardiovascular puede fácilmente implementarse con simples analogías; el corazón es una bomba hidráulica y puede representarse con capacitor con capacitancia variable en el tiempo, las diferencias de presión pueden representarse como diferencias de voltaje, así como el comportamiento del flujo sanguíneo y su interacción con los vasos puede implementarse con resistencias, capacitores e inductancias. La representación del sistema cardiovascular por medio de un circuito eléctrico presenta la ventaja de contar con las Leyes de Kirchoff para su resolución [1].

Los modelos de parámetros concentrados para representar el comportamiento del sistema cardiovascular han sido desarrollados con diversos fines; desde el estudio de parámetros que resultan difíciles de medir hasta el análisis y diseño de dispositivos médicos.

El empleo de parámetros concentrados es una de las formas más empleadas para aproximar el comportamiento del sistema cardiovascular. El primer modelo fue desarrollado por O. Frank en 1899. Este consistió en una Resistencia R con un capacitor C, denominado modelo de Windkessel de segundo orden WK2. En 1930 se agrega al circuito un tercer elemento resistivo r para la representación de la impedancia de la aorta, se lo denomina de tercer orden WK3 [2].

El cuarto y último modelo agrega una inductancia L al modelo para la representación de la inercia de la sangre, de manera de mejorar la respuesta dinámica del modelo, este se denominó cuarto modelo de Windkessel WK4 [1]. Los 3 modelos se representan en la Figura 1, de izquierda a derecha en el orden mencionado anteriormente [3].

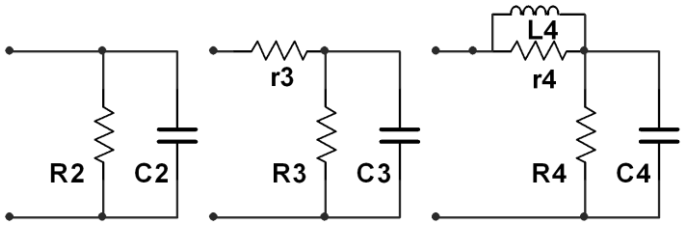


Figura 1: Modelos de Windkessel básicos. De izquierda a derecha WK2, WK3 y WK4.

A lo largo de este trabajo se implementará un modelo cardiovascular con la finalidad de obtener una respuesta acorde a los valores fisiológicos para, a partir de ese punto poder evaluar el desempeño de un Dispositivo de Asistencia Ventricular.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. MODELO CARDIOVASCULAR

El circuito fisiológico del cual se parte se muestra en la Figura 2. Este representa la circulación sistémica de sangre oxigenada que recorre el cuerpo a través de las arterias para luego retornar por medio de las venas, y la circulación pulmonar, que transporta la sangre desoxigenada desde el corazón hasta los pulmones, para luego regresarla oxigenada. Para el desarrollo de este trabajo y por simplicidad se considera solo la circulación sistémica y una versión reducida de la circulación pulmonar. El modelo eléctrico representativo del sistema cardiovascular se presenta en la Figura 3, cuya implementación es fundamental para comenzar a explorar el comportamiento de las variables hemodinámicas que influyen en el comportamiento de un Dispositivo de Asistencia Ventricular Pulsátil (DAVP).

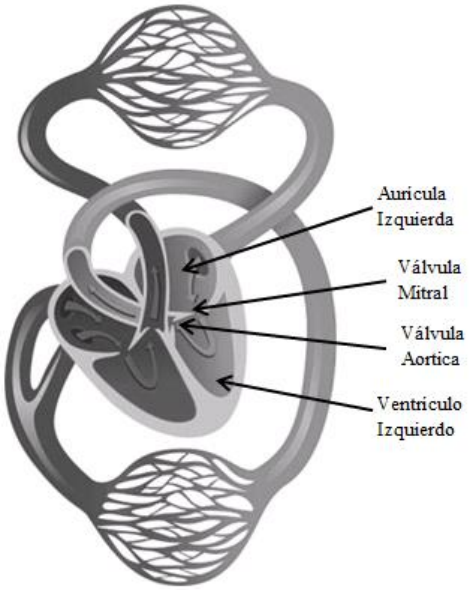


Figura 2: Circuito cardiovascular con referencias. Extraída y modificada de http://www.buzzle.com/img/articleImages/426566-41216-52.jpg

Se puede relacionar el flujo sanguíneo del circuito fisiológico con la corriente eléctrica del modelo, así como las diferencias de presión con las diferencias de voltaje, mientras que las resistencias, capacitores e inductancias de un circuito eléctrico pueden asociarse con las resistencias hidráulicas, deformaciones elásticas e inercias respectivamente.

En este modelo se representó la válvula mitral por medio de la resistencia R_M y el diodo ideal D_M la válvula aortica por la resistencia R_A y el diodo ideal D_A mientras que la compliancia (capacidad de distención) de la aorta se representa por el capacitor C_A. La pre-carga cardíaca junto con la circulación pulmonar completa se representa mediante una compliancia dada por el capacitor C_R,

ISBN: 978-987-1676-63-7

mientras que la post-carga se modeliza por medio de las resistencias R_C y R_S, la compliancia dada por el capacitor C_S y la inercia dada por la inductancia L_S.

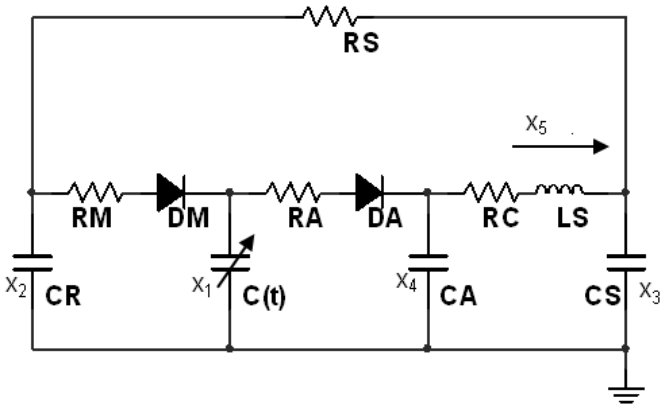


Figura 3: Modelo del circuito cardiovascular.

El comportamiento del ventrículo izquierdo se modela mediante una compliancia variable en el tiempo a través de un capacitor denominado C(t). La capacitancia está definida como la inversa de la función elastancia E(t) del ventrículo, dicha función está determinada por la relación entre la presión y el volumen ventriculares. A partir de revisiones bibliográficas se obtuvo como mejor aproximación de la función elastancia del corazón la función dada por la Ecuación (1) [4].

$$E(t) = (E_{max} - E_{min})E_n(t_n) + E_{min} \quad (1)$$

Donde el término $E_n(t_n)$ de la Ecuación (1) se denomina función "double hill" y se muestra su expresión en la Ecuación (2) y su grafica en la Figura 4.

$$E_n(t_n) = 1.55\left[\frac{\left(\frac{t_n}{0.7}\right)^{1.9}}{1+\left(\frac{t_n}{0.7}\right)^{1.9}}\right]\left[\frac{1}{1+\left(\frac{t_n}{1.17}\right)^{21.9}}\right] \quad (2)$$

En esa expresión $E_n(t_n)$ está normalizada $t_n=t/T_{max}$, $T_{max}=0.2+0.15\ t_C$ y t_C es el ciclo cardiaco, tal que $t_C=60/HR$ donde HR es la frecuencia cardiaca [4].

En la Tabla 1 se presentan los valores utilizados en los parámetros del circuito de la figura 3 para el desarrollo de la simulación del modelo, dichos valores fueron obtenidos a partir de un modelo cardiovascular neumático (MOCK del inglés), que se encuentra en el Grupo Biomecánica Computacional de la FI-UNER. El equipo genera un grupo de curvas acordes a la circulación sistémica [5]. Las curvas generadas por el modelo neumático fueron previamente cotejadas con curvas fisiológicas para validar su funcionamiento y tenerlo como punto de partida para la simulación computacional.

ISBN: 978-987-1676-63-7

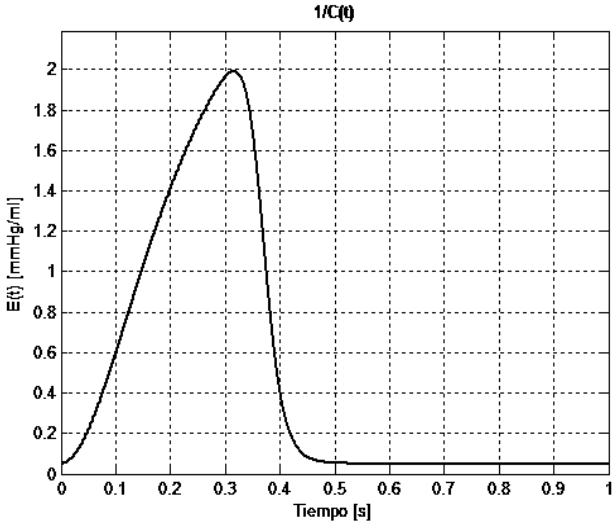


Figura 4: Función elastancia de la Ecuación (1) para una frecuencia cardiaca de 60 lpm.

Tabla 1. Parámetros del modelo.

Parámetro	Valor	Significado Fisiológico
R_S	1.0000 [mmHg.s/ml]	Resistencia Sistémica.
R_M	0.0060 [mmHg.s/ml]	Resistencia V. Mitral.
R_A	0.0010 [mmHg.s/ml]	Resistencia V. Aorta.
R_C	0.0400 [mmHg.s/ml]	Resistencia Característica.
C(t)	t-variable [ml/mmHg]	Compliancia Ventricular Izq.
C_R	4.5000 [ml/ mmHg]	Compliancia Auricular Izq.
Cs	1.4000 [ml/ mmHg]	Compliancia Sistémica.
C_A	0.1000 [ml/ mmHg]	Compliancia Aortica.
Ls	0.00005 [mmHg.s^2/ml]	Inercia de la Aorta.
D_M	Ideal	Válvula Mitral.
D_A	Ideal	Válvula Aortica.
Emax	2.0000 [mmHg/ml]	Relación P/V de fin de Sístole.
Emin	0.0600 [mmHg/ml]	Relación P/V de fin de Diástole.

La presencia de los dos diodos en el circuito implica cuatro estados posibles que representan las etapas del ciclo cardiaco. El estado en que ambos diodos se encuentran como circuito abierto (ambas válvulas cerradas) se presenta en dos ocasiones, contracción y relajación iso-volumetrica.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Cuando D_M está en corto circuito y D_A abierto el ventrículo se está llenando, y cuando D_M está abierto y D_A en corto circuito se tiene la eyección. Se debe descartar el caso en que ambos diodos estén en corto circuito, porque representaría el caso en que la válvula mitral y aortica estén ambas abiertas, evento que no se presenta en la realidad.

Se eligieron cinco variables de estados, cuatro por los cuatro capacitores (tensiones) y una por la inductancia (corriente); donde cada una de las cuales representa lo mostrado en la Tabla 3 y se muestran en la Figura 3.

Tabla 3. Variables de Estado.

Variable	Nombre	Significado Fisiológico
x_1	LVP(t)	Presión Ventricular Izq. (mmHg)
x_2	LAP(t)	Presión Auricular Izq. (mmHg)
x_3	AP(t)	Presión Arterial (mmHg)
x_4	AoP(t)	Presión Aortica (mmHg)
x_5	Q(t)	Flujo total (ml/s)

A partir del análisis de las Leyes de Corrientes de Kirchoff en el circuito se obtuvieron las siguientes expresiones:

$$\frac{d}{dt}(C(t)\cdot x_1) = \frac{d(x_2 - x_1)}{R_M} - \frac{d(x_1 - x_4)}{R_A} \tag{3}$$

$$C_R \cdot \dot{x}_2 = \frac{x_3 - x_2}{R_S} - \frac{d(x_2 - x_1)}{R_M} \tag{4}$$

$$C_S \cdot \dot{x}_3 = x_5 - \frac{x_3 - x_2}{R_S} \tag{5}$$

$$C_A \cdot \dot{x}_4 = \frac{d(x_1 - x_4)}{R_A} - x_5 \tag{6}$$

Por medio de las Leyes de Tensiones de Kirchoff se obtuvo:

$$L_S \cdot \dot{x}_5 = x_4 - x_3 - x_5 \cdot R_C \tag{7}$$

Donde la función $d(x_i - x_j)$, para i = 1, 2, 3 y j = 1, 2, 4, representa el comportamiento del diodo (válvula) y se define como:

$$d(x_i - x_j) = \begin{cases} (x_i - x_j) \text{ si } (x_i - x_j) \geq 0 \\ 0 \quad \text{si } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \tag{8}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

La conexión del DAVP se muestra en la Figura 5, la conexión se realiza en paralelo con los elementos del circuito que representaría el Ventrículo Izquierdo. Los valores relevantes del DAVP se obtienen a partir de un análisis computacional 2D del flujo en el interior de un dispositivo de asistencia ventricular pulsátil implantable [6].

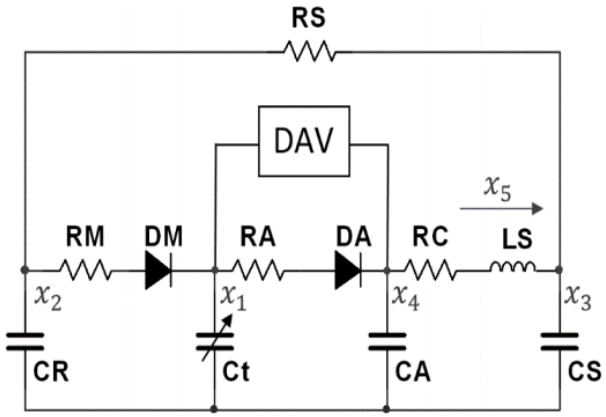


Figura 5: Modelo del circuito cardiovascular con el DAVP incluido.

3. RESULTADOS

A partir de las ecuaciones obtenidas se realizó la implementación de las mismas por medio de un software matemático para la obtención de las curvas más relevantes para el sistema circulatorio. Para evaluar el desempeño del modelo desarrollado se recurrió a curvas fisiológicas, las cuales se muestran en la Figura 6 y fueron extraídas de Guyton's Textbook of Medical Physiology [8]. Las gráficas de las presiones, el flujo y el volumen ventricular resultantes de la simulación se muestran en la Figura 7. Es posible observar que una vez que el sistema entra en régimen, su forma se corresponde con las que se obtienen a través de estudios clínicos.

A partir de la revisión bibliográfica de los parámetros hemodinámicos normales se obtuvieron los rangos de valores más relevantes y se presentan en la Tabla 4 [6, 9, 10]. En la simulación el rango de la Presión Arterial AP es de 62.63mmHg a 106.22mmHg aceptables para el intervalo [60 - 140] mmHg [9]. Para la Presión Ventricular Izquierda LVP a partir de la simulación se obtuvo un rango de 5.14mmHg a 110.93mmHg, también dentro del intervalo esperado de [0 - 140] mmHg. La Presión Arterial Izquierda LAP con valores de 5.66mmHg y 14.21mmHg se encuentra en el intervalo esperado [4 - 12] mmHg [10].

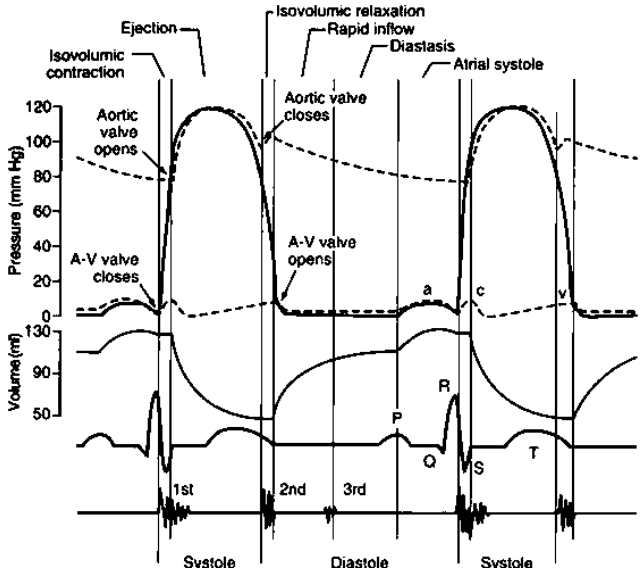


Figura 6: Ciclo cardíaco. Extraido de Guyton's and Hall. Textbook of Medical Physiology 10th edition (2000) Chapter 9 page 99.

Tabla 4. Variables Hemodinámicas.

Parámetro	Unidad	Rango de Valores
Frecuencia Cardiaca.	bpm	48 – 105
Volumen Ventricular Izquierda.	ml	16 – 240
Presión Arterial.	mmHg	60 – 140
Presión Ventricular Izquierda.	mmHg	0 – 140
Presión Arterial Izquierda.	mmHg	4 – 12
Volumen de Fin de Diastole V. Izq.	ml	Promedio 120
Volumen de Fin de Sistole V. Izq.	ml	Promedio 50

Con el modelo funcionando dentro de valores aceptables, se procedió a la conexión del DAVP como se mostró en la Figura 5 y se realizó la simulación del modelo completo, considerando una disminución en la capacidad de bombeo del corazón para generar una insuficiencia cardiaca que presente la necesidad de un tipo de asistencia. En la Figura 8 se muestran las curvas obtenidas del modelo junto con el DAVP.

Para el análisis de los volúmenes se tomaron dos casos particulares, el del Volumen de Fin de Diástole en el Ventrículo Izquierdo LVEDV con un valor de 131ml y por otro lado el Volumen de Fin de Sístole del Ventrículo Izquierdo LVESV con un valor de 53ml. Ambos valores aceptables dentro

ISBN: 978-987-1676-63-7

del rango y cercanos a los valores promedios de 120ml y 50ml, respectivamente [9]. Considerando el Volumen Ventricular Izquierdo LVV con valores mínimo y máximo obtenidos de 53.72ml y 134.2ml, también se encuentran dentro del rango de los valores hemodinámicos [16 - 240] ml. De manera que tanto los valores de las gráficas como la forma de estas son consistentes con la información hemodinámica y gráficas analizadas [8]. Por lo tanto se puede afirmar que el modelo tiene un comportamiento aceptable.

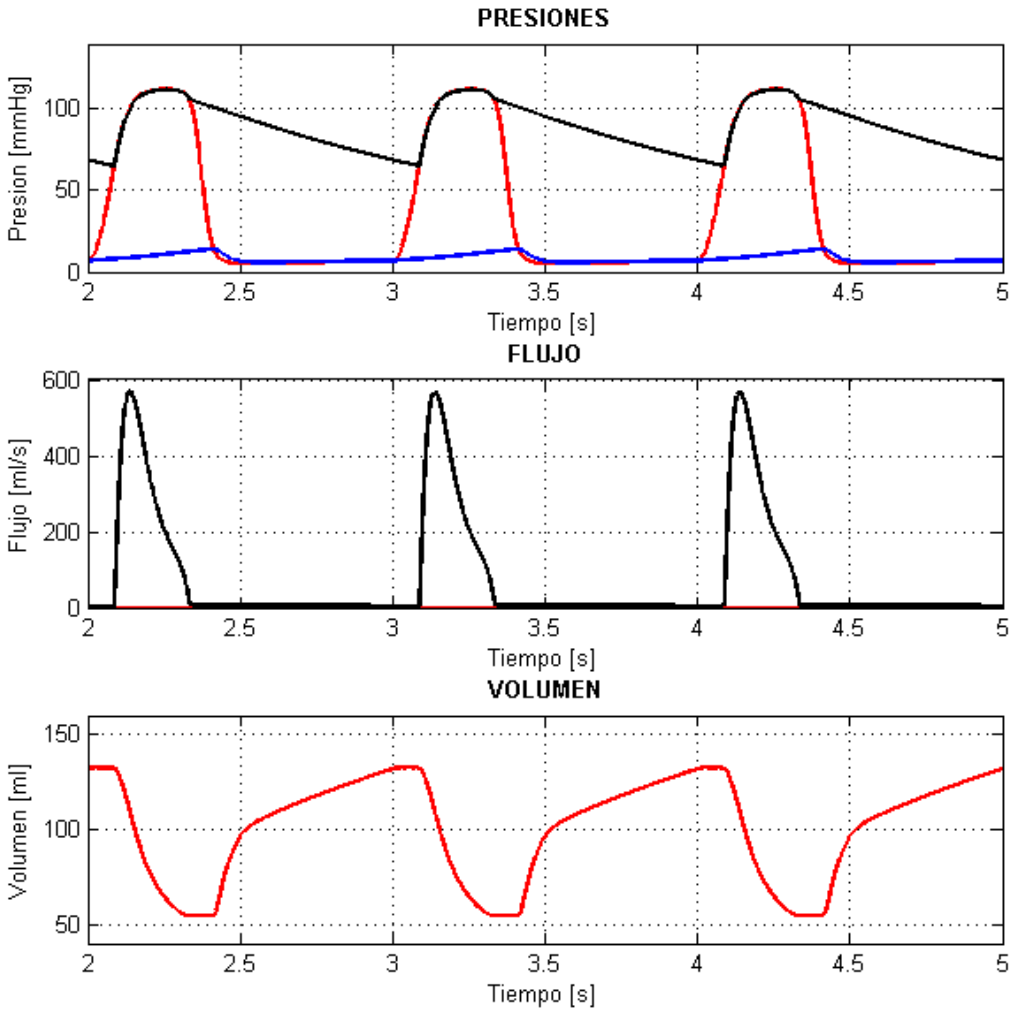


Figura 7: Curvas obtenidas a través de la simulación. Presiones: Negro Presión Aortica, Rojo: Presión Ventricular y Azul: Presión Auricular. Flujo: Flujo Cardiaco. Volumen: Volumen Ventricular.

De la Figura 8 se puede ver como el Volumen Ventricular máximo disminuye debido a que parte del volumen es desviado hacia el DAVP para ayudar en el bombeo durante el ciclo, el pico máximo del flujo cardiaco disminuye pero es compensado por el bombeo del DAVP, mientras que la Presión

Aortica sufre leves deformaciones esperables pero encontrándose dentro de los rangos fisiológicos aceptables, las demás curvas no son modificadas o lo son en forma reducida como es de esperarse.

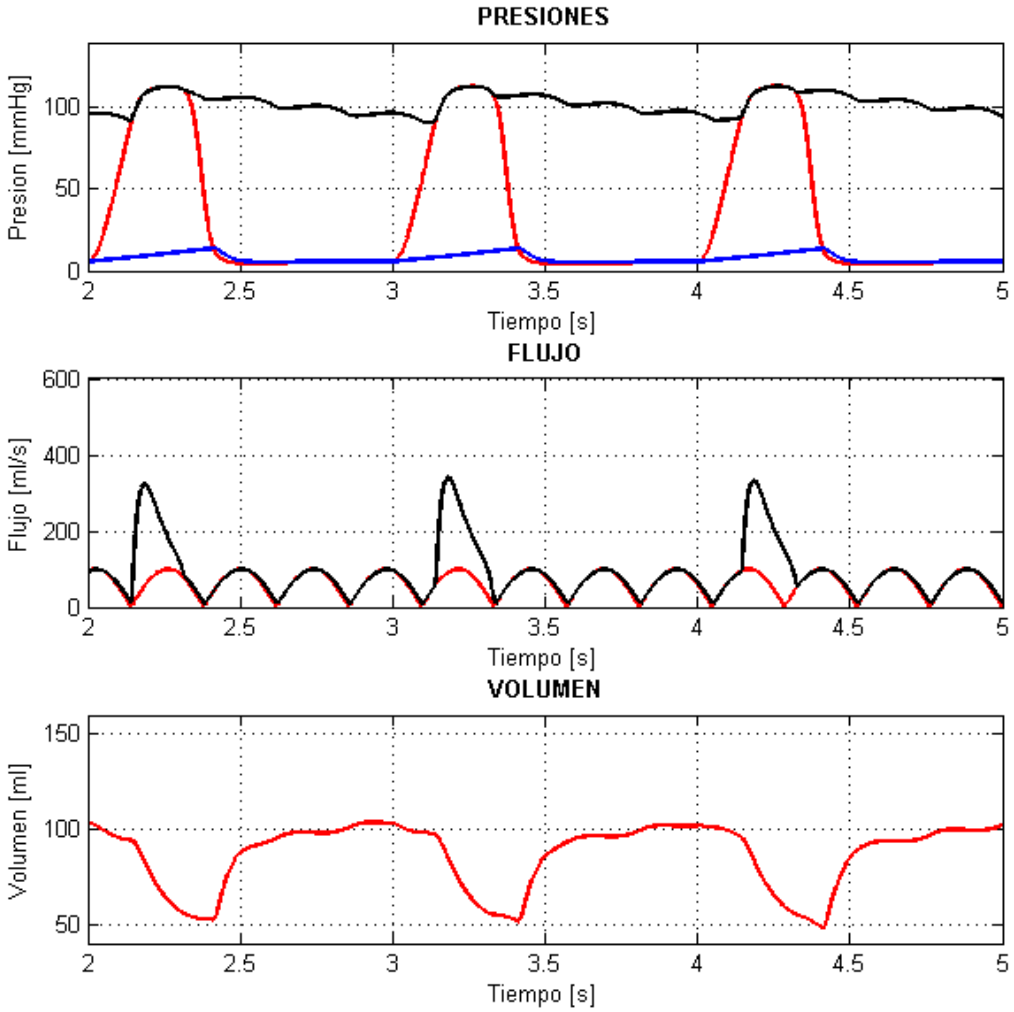


Figura 8: Curvas obtenidas a través de la simulación del modelo con el DAVP. Presiones: Negro Presión Ao., Rojo: Presión Vent. y Azul: Presión Au. Flujo: Flujo Cardiaco. Volumen: Volumen Vent.

4. CONCLUSIONES

Se puede concluir que es posible desarrollar un modelo cardiovascular mediante parámetros concentrados por analogía con un circuito eléctrico, con una respuesta aceptable y con gran flexibilidad a cambios predecibles. A su vez, el circuito eléctrico permite tener un entorno con gran libertad de simulaciones de situaciones posibles en el sistema cardiovascular para poder realizar las primeras evaluaciones de un modelo de Dispositivo de Asistencia Ventricular que se encuentra en

ISBN: 978-987-1676-63-7

desarrollo. De este modo, es posible realizar modificaciones en el DAVP y realizar pruebas de bajo costo computacional antes de pasar a simulaciones de más alto nivel.

A futuro, se propone modificar la modelización de las válvulas cardiacas aproximándose a su comportamiento real, de manera que sea posible simular patologías cardiacas a través de simulaciones en tiempo real para evaluar el DAVP y su respuesta a cambios hemodinámicos.

6. REFERENCIAS

[1]. G. Ortiz León, M. Vílchez Monge and J. J. Montero Rodríguez. *An Updated Cardiovascular Simulation Toolbox*. Circuits and Systems (ISCAS). IEEE International Symposium, pp. 1901–1904, May. 2013.

[2]. Martin HLAVÁČ. *Windkessel model analysis in MATLAB*. Brno University. Prague, Czech, 2004.

[3]. G. Ortiz León, M. Vílchez Monge, and J. J. Montero Rodríguez. *Simulations of the Cardiovascular System Using the Cardiovascular Simulation Toolbox*. MCPS, pp. 28–37, Abr. 2014.

[4]. M. A. Simaan, A. Ferreira, S. Chen, J. F. Antaki, and D. G. Galati. *A Dynamical State Space Representation and Performance Analysis of a Feedback-Controlled Rotary Left Ventricular Assist Device*. Control Systems Technology, IEEE Transactions on. vol. 17, pp. 15–28, 2009.

[5]. F. E. Brunelli, N. P. Valiente. *Puesta en funcionamiento y calibración de un simulador cardiovascular neumático.* Universidad Nacional de Entre Ríos, 2013.

[6]. E. R. Fríes. *Análisis computacional 2d del flujo en el interior de un dispositivo de asistencia ventricular pulsátil implantable.* Universidad Nacional de Entre Ríos, 2015.

[7]. A. Ferreira, S. Chen, M. A. Simaan, J. R. Boston, J. F. Antaki. *A Nonlinear State-Space Model of a Combined Cardiovascular System and a Rotary Pump*. Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, pp. 897–902, 2005, Seville, Spain.

[8]. Arthur C. Guyton, M.D. f. *Textbook of Medical Physiology*. 10th edition, 2000.

[9]. LiDCO Group PLC. *Normal Hemodynamic Parameters. Continuous, real-time cardiovascular monitoring.* [Online]. Disponible en: http://www.lidco.com/docs/1462Educatioalcard7.pdf

[10]. Thomas Schlosser *et Al*. *Assessment of Left Ventricular Parameters Using 16-MDCT and New Software for Endocardial and Epicardial Border Delineation.* American Journal of Roentgenology, pp. 765–773, Abr. 2005.

Agradecimientos

Se agradece al Grupo Biomecánica Computacional de la FI-UNER el espacio y los recursos que a través del PID 6123 se han dispuesto por parte de la UNER para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece al CIN el sostenimiento de la beca EVC para el primer autor.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN Y RADIACIÓN TÉRMICA COMBINADAS EN UN MEDIO CILÍNDRICO PARTICIPANTE

Rebollo, Daniel ; Velasco, Marisol ; Bocca, José Carlos

Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería, Departamento de Electromecánica. Avenida Libertador San Martín (Oeste) 1109 - CPA: J5400ARL - San Juan - Argentina drebollo.de.fi.unsj@gmail.com

Palabras claves: Radiación Térmica, Cavidades Cilíndricas, Medio Participante, Volúmenes Finitos

Resumen. En este trabajo se ha resuelto numéricamente un proceso de transferencia de calor por conducción y radiación térmica combinadas en una cavidad cilíndrica multidimensional rellena con un medio que absorbe, emite y dispersa anisotrópicamente la radiación térmica. Para resolver el problema planteado se ha desarrollado un código computacional basado en el método de los volúmenes finitos. En trabajos anteriores se analizó el proceso de transferencia de calor por radiación térmica con dispersión anisotrópica en cavidades cilíndricas y esféricas con diferentes configuraciones térmicas y variadas condiciones de borde. En este trabajo se extiende al análisis a cavidades cilíndricas en dos y tres dimensiones, rellenas con un medio gris conductor, absorbente, emisor y anisotrópicamente dispersante. Se han desarrollado dos códigos independientes para resolver problemas en geometrías bidimensionales, independientes de la altura del cilindro, y cilíndrica tridimensional. Las superficies de la cavidad son opacas, grises, difusas e isotérmicas y la emisión es difusa desde la frontera. Se analiza la influencia de la conductividad térmica, coeficiente de absorción, coeficiente de dispersión, dimensiones de la cavidad y reflectividad de las paredes. Se ha efectuado un exhaustivo y detallado análisis de error y los resultados obtenidos fueron comparados con los resultados disponibles. El análisis de resultados permite concluir que la metodología de cálculo, desarrollada en este trabajo, se puede extender a configuraciones térmicas, no incluidas en este estudio, con un amplio margen de seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería existen muchos ejemplos de aparatos y dispositivos de forma cilíndrica en los cuales se presentan procesos de transporte de energía por conducción y radiación combinadas. Esta situación ha sido frecuentemente considerada por los investigadores en aplicaciones prácticas de transporte de energía en medios semitransparentes, en las que la conducción de calor y la radiación térmica ocurren simultáneamente. La importancia del transporte combinado de energía térmica puede ser apreciable en los hornos de fundición de vidrio. En estos fenómenos la radiación térmica juega un rol muy importante por lo que existe un gran interés en desarrollar modelos de análisis que permitan obtener resultados en forma rápida, precisa y económica.

Existe una gran cantidad de trabajos relacionados al estudio de la conducción y la radiación térmica combinadas en geometrías cilíndricas, la mayoría de ellos son simulaciones numéricas donde se aplica una gran variedad de métodos numéricos. Estos métodos se caracterizan por su capacidad de manejar una gran variedad de configuraciones geométricas y térmicas. A continuación se hace una revisión bibliográfica de los trabajos publicados en los cuales se han considerado problemas estacionarios de conducción y radiación combinadas en coordenadas cilíndricas. Comenzando en los inicios de los 80, se puede citar el trabajo de Fernandes y Francis [1] quienes resolvieron el problema no estacionario de la conducción y radiación combinadas en un medio gris absorbente, emisor y dispersante en una cavidad cilíndrica de paredes grises, difusas e isotérmicas, usando el método de los elementos finitos de Galerkin y el esquema de Crank-Nicholson, para el término transitorio. Li y Ozisik [2] estudiaron la conducción y radiación simultánea en una cavidad cilíndrica bidimensional, hueca y llena, rellena con un medio absorbente, emisor y anisotropicamente dispersante, con paredes difusas, usando el método de las ordenadas discretas para la radiación, y el método de las diferencias finitas, para la conducción. Siewert y Thomas [3] aplicaron una técnica de transformación integral y el método de las armónicas esféricas, junto con splines cúbicos de Hermite, para definir una técnica iterativa en la solución de la conducción y radiación combinadas en un cilindro sólido de longitud infinita. Sakami et al. [4] presentaron una nueva aproximación del método de las ordenadas discretas para determinar los campos de temperatura e intensidad de radiación en un medio gris y semitransparente para conducción y radiación acopladas en cavidades bidimensionales con superficies grises y difusas. Le Dez et al. [5] modelaron la conducción y radiación simultánea en cuerpos semi transparentes, absorbentes y emisores, con propiedades radiantes espectrales y superficies opacas o transparentes, con reflexión especular. Ruan et al. [6] aplicaron el método de los elementos finitos a problemas de conducción y radiación combinadas en geometrías de forma arbitraria con paredes negras y grises conteniendo un medio absorbente y emisor. Aouled-Dlala et al. [7] presentaron una nueva técnica para mejorar el método de las ordenadas discretas resolviendo problemas de conducción y radiación combinadas en geometrías esféricas y cilíndricas, expandiendo el término de la derivada angular de la intensidad de radiación en polinomios de Chebyshev. Talukdar et al. [8] desarrollaron un código computacional, basado en el método de los volúmenes finitos, para resolver la conducción y la radiación térmica acopladas en un medio gris participante, en cavidades cúbicas y cilíndricas en tres dimensiones. Sadat [9] empleó un método de aproximación de la difusión, sin malla, basado en el método de las ordenadas discretas, para resolver el acople de la conducción y radiación térmica en problemas de transferencia de calor en un medio semi transparente limitado por cavidades complejas en tres dimensiones. Mishra y Sahai [10] estudiaron la transferencia de calor combinada por conducción y radiación en un medio limitado por una cavidad cilíndrica, resolviendo la ecuación del calor con el método de Boltzmann, y la ecuación del transporte radiante, con el método de los volúmenes finitos. Das [11] resolvió numéricamente la conducción, convección y radiación combinadas en un medio poroso, donde, aplicando un método híbrido, la distribución de temperatura se obtiene con un procedimiento directo basado en la el método de Runge-Kutta y los demás parámetros desconocidos se calculan resolviendo un problema inverso.

De la revisión bibliográfica presentada se desprende que existe un marcado interés en desarrollar herramientas computacionales que permitan predecir la transferencia de calor combinada por conducción y radiación térmica en geometrías cilíndricas multidimensionales. Estas herramientas computacionales pueden ser usadas para facilitar el cálculo y diseño de dispositivos industriales, análisis y estudio de fenómenos ambientales y en todas las situaciones

ISBN: 978-987-1676-63-7

en la que estén involucrado el transporte de calor por modos combinados.

2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El modelo matemático que representa la transferencia de calor por conducción y radiación combinadas en estado estacionario está formado por la ecuación de la energía (1), la cual viene dada en forma independiente del sistema de coordenadas [12], como

$$\nabla\cdot\left(k\nabla T\right)-\nabla\cdot\boldsymbol{q}_r+\dot{q}=0 \tag{1}$$

en la que k es la conductividad térmica, T la temperatura, $\dot{q}$ la fuente interna de generación de calor, $\boldsymbol{q}_r$ el flujo de calor radiante y $\nabla\cdot\boldsymbol{q}_r$ la divergencia del flujo radiante, dadas por

$$\boldsymbol{q}_r=\int_{\omega=0}^{4\pi} i\boldsymbol{s}\,d\omega \qquad\qquad \nabla\cdot\boldsymbol{q}_r=\kappa\left(4\pi i_b-G\right) \tag{2,3}$$

en esta ecuaciones i es la intensidad de radiación térmica, $\boldsymbol{s}$ es el versor de la dirección angular, ω el ángulo sólido, κ el coeficiente de absorción, i_b la intensidad de radiación térmica del cuerpo negro y G la radiación incidente, las cuales vienen dadas por

$$i_b=\frac{\sigma T^4}{\pi} \qquad\qquad G=\int_{\omega=0}^{4\pi} i\,d\omega \tag{4,5}$$

donde σ es la constante de Stefan–Boltzmann.

La intensidad de radiación térmica se obtiene resolviendo la ecuación (6) del transporte radiante para un medio gris, absorbente y dispersante [12-14], la cual se expresa como

$$\boldsymbol{s}\cdot\nabla i=-\beta i+\kappa i_b+\frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{\omega=0}^{4\pi} i\Phi\,d\omega \tag{6}$$

en la que $\beta=\kappa+\sigma_s$ es el coeficiente de extinción, σ_s es el coeficiente de dispersión y Φ la función de dispersión.

La condición de borde para superficies radiantes grises, opacas, difusas e isotérmicas se puede escribir como[12-14]:

$$i_w^l=\varepsilon_w i_{bw}+\frac{\rho_w H_w}{\pi} \tag{7}$$

donde el subíndice w representa la pared, el superíndice l representa la dirección de la radiación emitida por la pared, ε es la emisividad de la pared, ρ la reflectividad de la pared, i_b es la intensidad de radiación del cuerpo negro, emitida por la pared, y H es la irradiación hemisférica, es decir, el flujo de calor radiante incidente en la pared, el cual se calcula como:

$$H_w=\int_{\boldsymbol{s}^k\cdot\boldsymbol{n}_w<0} i_w^k\left|\boldsymbol{s}^k\cdot\boldsymbol{n}_w\right|d\omega^k \tag{8}$$

donde $\boldsymbol{n}$ es la normal unitaria a la pared y k representa la dirección de la radiación incidente en la pared.

En todos los problemas analizados en este trabajo, se supone que las superficies de la cavidad son opacas, grises y difusas. La rugosidad de la superficie y la deposición de productos de la combustión hacen que esta suposición sea válida en muchas aplicaciones de la ingeniería. La formulación matemática de la ecuación (1) de la energía junto con la ecuación (6) de la transferencia radiante están dadas en forma tensorial, vectorial y direccional, es decir, independiente del sistema de coordenadas adoptado.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 1: Parámetros originales y derivados correspondientes a los seis problemas de Siewert y Thomas [3].

Problema						
	1	2	3	4	5	6
Parámetros originales						
ε	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90	1,0
R_e [m]	1,0	0,50	0,050	0,50	5,0	1,0
N	0,050	0,050	0,00050	0,0050	0,50	1,0
H	1,50	100,0	4000,0	40,0	0,40	1,0
θ	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ω	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Parámetros derivados						
T_s [K]	100	100	100	100	100	100
β [m^{-1}]	1,0	0,50	0,050	0,50	5,0	1,0
σ_s [m^{-1}]	0,90	0,450	0,0450	0,450	4,50	0,90
κ [m^{-1}]	0,10	0,050	0,0050	0,050	0,50	0,10
k [W/m K]	0,01134	0,02268	0,00227	0,00227	0,02268	0,22680
[W/m^3]	1,7010	56,70	2,2680	2,2680	22,680	22,680

Tabla 2: Flujos de calor adimensional y errores relativos para conducción, radiación y combinado correspondientes a los seis problemas de Siewert y Thomas [3].

Problema						
	1	2	3	4	5	6
Siewert y Thomas [3]						
Q_c	0,435937	13,587700	64,000500	3,574970	0,510041	0,352111
Q_r	0,314063	11,412300	35,999500	6,425030	0,489959	0,147889
Q_T	0,750000	25,000000	100,000000	10,000000	1,000000	0,500000
Este trabajo						
Q_c	0,43645	13,62273	64,15241	3,56733	0,50988	0,35274
Q_r	0,31407	11,40925	35,99659	6,43369	0,49063	0,14802
Q_T	0,75052	25,03198	100,14900	10,00102	1,00051	0,50076
Error relativo %						
Q_c	0,12	0,26	0,24	-0,21	-0,03	0,18
Q_r	0,00	-0,03	-0,01	0,13	0,14	0,09
Q_T	0,07	0,13	0,15	0,01	0,05	0,15

La formulación matemática en coordenadas cilíndricas de la ecuación de la transferencia radiante ya fue presentada en un trabajo anterior por lo que no será incluida aquí [15-18].Toda la formulación matemática presentada en este trabajo está basada en la suposición de comportamiento gris del medio participante, es decir, independiente de la longitud de onda de la radiación térmica. En trabajos previos [19-22] se han presentado diferentes modelos para el tratamiento de gases no grises, los cuales no han sido implementados, por el momento, en este trabajo en geometrías cilíndricas.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 3: Flujos de calor total adimensional Q en la pared interior y exterior.

		Aouled-Dlala et al. [7]				Este trabajo	
		$Q_{T,\text{int}}$		$Q_{T,\text{ext}}$		$Q_{T,\text{int}}$	$Q_{T,\text{ext}}$
N	ω	DOM	FCT	DOM	FCT		
0,01	0,1	22,4352	22,3172	11,2176	11,1586	21,8137	10,9136
	0,5	22,1593	21,9907	11,0796	10,9953	21,5056	10,7590
	0,9	21,7839	21,5403	10,8919	10,77	21,0668	10,5388
0,10	0,1	3,5578	3,5526	1,7789	1,7763	3,5018	1,7527
	0,5	3,5184	3,5045	1,7592	1,7522	3,4555	1,7295
	0,9	3,4764	3,4523	1,7382	1,7261	3,4035	1,7034
1,00	0,1	1,6542	1,6537	0,8271	0,8268	1,6472	0,8249
	0,5	1,6502	1,6488	0,8251	0,8244	1,6424	0,8225
	0,9	1,646	1,6436	0,823	0,8218	1,6372	0,8199

Tabla 4: Errores relativos de los flujos de calor total adimensional Q en la pared interior y exterior de este trabajo comparados con los resultados de Aouled-Dlala et al. [7].

		Error relativo %			
		$Q_{T,\text{int}}$		$Q_{T,\text{ext}}$	
N	ω	DOM	FCT	DOM	FCT
0,01	0,1	2,85	2,31	2,79	2,24
	0,5	3,04	2,26	2,98	2,20
	0,9	3,40	2,25	3,35	2,19
0,10	0,1	1,60	1,45	1,49	1,35
	0,5	1,82	1,42	1,72	1,31
	0,9	2,14	1,43	2,04	1,33
1,00	0,1	0,43	0,39	0,27	0,23
	0,5	0,47	0,39	0,32	0,23
	0,9	0,54	0,39	0,38	0,23

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección se hace una breve descripción de las configuraciones geométricas y térmicas analizadas en este trabajo, las cuales fueron propuestas por algunos autores hace ya algún tiempo, y reproducidas a lo largo de los años en muchos trabajos publicados, por lo que se han transformado en configuraciones clásicas. Se presentan los resultados obtenidos al reproducir estas diferentes configuraciones térmicas, se hace un muy breve análisis de resultados y se comparan resultados mostrando algunos errores.

Todos los resultados fueron obtenidos en el sistema internacional de medidas, pero son presentados en la misma forma que fueron publicados en los trabajos originales, por lo que, para facilitar la comprensión del lector, se describen los parámetros adimensionales comúnmente presentes en la mayoría de los trabajos originales. Para una descripción más detalladas de las configuraciones geométricas, térmicas y parámetros adimensionales utilizados se recomienda al lector recurrir a las publicaciones originales.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 5: Flujos de calor por conducción, radiación y total, en la pared interior y exterior.

		q_r		q_c		q_T	
N	ω	int	ext	int	ext	int	ext
0,01	0,1	69,4509	33,2257	9,7122	6,3805	79,1631	39,6062
	0,5	69,9795	33,8489	8,0654	5,1959	78,0449	39,0449
	0,9	70,6183	34,9029	5,8342	3,3431	76,4525	38,2460
0,10	0,1	69,4277	32,0949	57,6539	31,5119	127,0817	63,6067
	0,5	70,1127	33,2101	55,2889	29,5542	125,4016	62,7643
	0,9	70,6575	34,8326	52,8578	26,9857	123,5153	61,8183
1,00	0,1	69,5300	31,8191	528,2459	267,5323	597,7759	299,3514
	0,5	70,1783	33,0798	525,8609	265,4001	596,0392	298,4799
	0,9	70,6634	34,8234	523,4877	262,7177	594,1511	297,5411

Se han analizado tres geometrías diferentes, dos bidimensionales y una tridimensional. Las geometrías bidimensionales corresponden a un corte transversal de un cilindro de longitud infinita, pudiendo ser un cilindro lleno de radio R o un cilindro hueco de radio interior R_i y exterior R_e. La geometría tridimensional corresponde a un cilindro lleno de radio R y altura L.

3.1. Cilindro lleno de longitud infinita

En esta sección se estudia un problema de emisión difusa desde la pared de la cavidad combinada con una fuente de calor uniformemente distribuida en el medio que rellena la cavidad, el cual absorbe, emite y dispersa isotrópicamente la radiación térmica. Una primera variante de este problema fue presentado originalmente por Fernandes y Francis [1] y reproducidos por Sakami et al. [4] y Ruan et al. [6] y la segunda variante fue presentado por Siewert y Thomas [3].

El problema de Siewert y Thomas [3] corresponde a un conjunto de seis problemas semejantes, donde se varían algunos parámetros geométricos y térmicos. La Tabla 1 resume los parámetros originales considerados en los seis problemas propuestos, y los parámetros derivados, necesarios para este trabajo, en los que T_s es la temperatura de la superficie de la cavidad, $\theta=T/T_s$ es la temperatura adimensional, $\omega=\sigma_s/\beta$ es el albedo de dispersión, $N=k\beta/4\sigma T_s^3$ es el parámetro adimensional conducción-radiación y $H=\dot{q}/k\beta^2 T_s$ es la generación de calor interna adimensional.

La Figura 1 muestra la distribución de temperatura a lo largo del radio para las condiciones de los seis problemas descritos en la Tabla 1. Se observa que, para los seis problemas, la temperatura disminuye con el radio, por efecto de la generación de calor interna, los máximos valores de temperatura corresponden al segundo problema al cual le corresponde el máximo valor de la fuente de calor interna.

ISBN: 978-987-1676-63-7

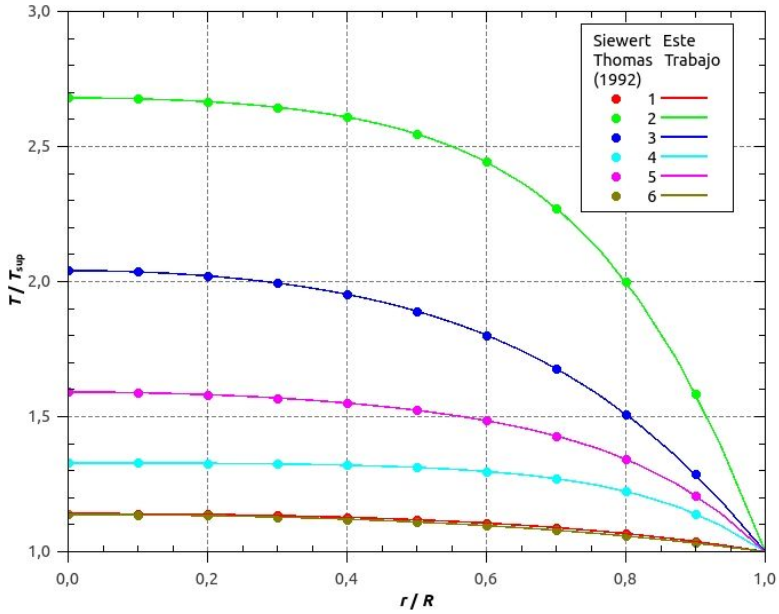


Figura 1: Efecto de la función de dispersión anisotrópica en el flujo de calor radiante a lo largo de la pared lateral para el caso de incidencia externa difusa en la pared superior.

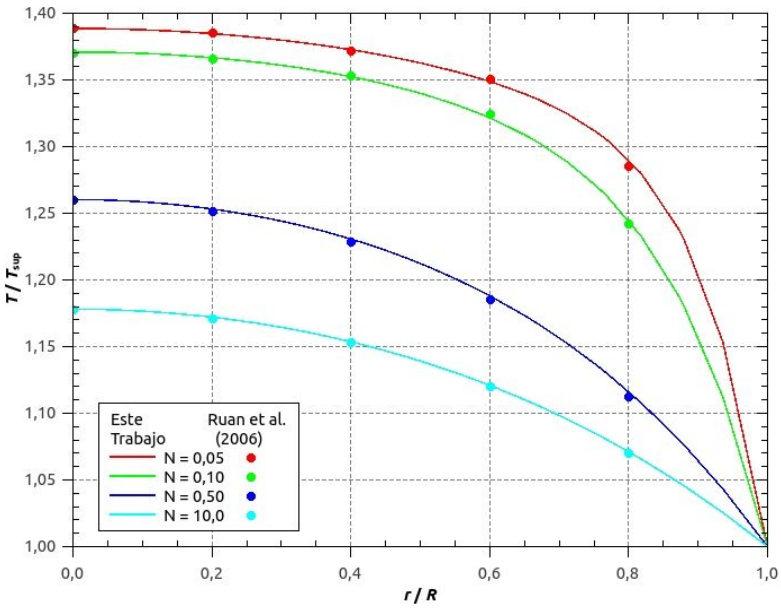


Figura 2: Influencia del parámetro conducción-radiación *N* en la distribución de temperatura en la cavidad.

En la Tabla 2 se presentan los valores de los flujos de calor adimensionales $Q=q/k\beta T_s$ en la superficie para conducción, radiación y combinados, también se muestran los errores relativos de los datos originales respecto a los calculados en este trabajo.

La segunda variante se diferencia de la primera en que el medio es solamente absorbente y emisor pero no dispersante de la radiación térmica $\sigma_s=\omega=0$, además, para esta variante T_s=100K, κ=1m^{-1}, R=1m, $\dot{q}=4\kappa\sigma T_s^4$ y ε_w=1.

La Figura 2 muestra la influencia del parámetro conducción-radiación *N* en la distribución de temperatura en la cavidad, allí se observa, cómo en el caso anterior, la disminución de la

ISBN: 978-987-1676-63-7

temperatura con el radio producto de la fuente de calor interna uniforme que existe en el medio.

3.2. Cilindro hueco de longitud infinita

Para la cavidad cilíndrica hueca se analizan dos problemas, el primero con emisión difusa desde las paredes sin generación interna de calor, propuesto originalmente por Fernandes y Francis [1] y reproducidos por Sakami et al. [4], Ruan et al. [6], Sadat [9] y Mishra y Sahai [10]. Para este problema se han utilizado los siguientes parámetros R_i=1m, R_e=2m, κ=1m^{-1}, T_i=10K, T_e=100K, N=0.03.La Figura 3 muestra la influencia del albedo de dispersión en la distribución de la temperatura a lo largo del radio de la cavidad, para una emisividad de pared ε_w=0.5, se advierte que las mayores temperaturas corresponden al caso de absorción pura, mientras que las menores temperaturas corresponden al caso de dispersión pura.

En la Figura 4 se presenta la influencia de la emisividad de las paredes de la cavidad en la distribución de temperatura a lo largo del radio de la cavidad para un medio totalmente absorbente y emisor pero no dispersante σ_s=ω=0. Se advierte que las menores temperaturas corresponden al caso de paredes más reflectivas, mientras que para el caso de paredes negras las temperaturas son máximas en la primera mitad de la cavidad y luego se confunden con el caso intermedio.

El segundo problema considerado en la cavidad hueca corresponde al caso de emisión difusa desde las paredes con generación interna de calor uniforme y fue propuesto por Aouled-Dlala et al. [7], quienes utilizaron los siguientes parámetros, R_i/R_e=0.5, T_e/T_i=0.5, ε_w=1 y βR_e=1. Para satisfacer estos parámetros originales en este trabajo se usaron los siguientes valores R_e=1m, T_e=100K, T_i=200K, β=1m^{-1} y R_i=0.5m.

La Tabla 3 muestra los flujos de calor total adimensional $Q=qR_e/kT_i$ es en la pared interior y exterior, los errores relativos se presentan en la Tabla 4, y los flujos de calor por conducción, radiación y combinados, en la pared interior y exterior, se dan en la Tabla 5.

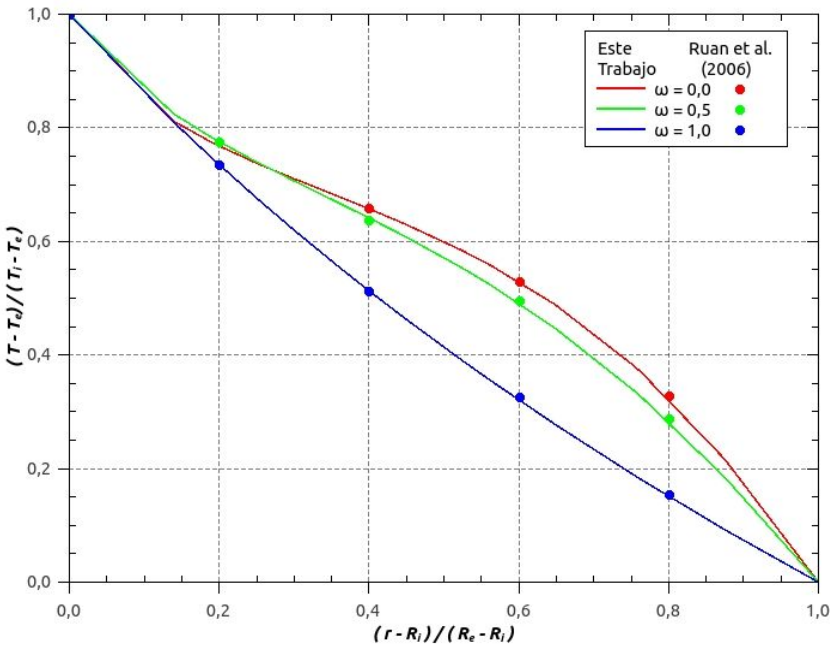


Figura 3: Influencia del albedo de dispersión en la distribución de la temperatura a lo largo del radio de la cavidad.

3.3. Cilindro lleno de longitud finita

En esta sección se estudia la conducción y radiación combinadas en una cavidad cilíndrica llena, R=1m, de longitud finita, L=2m, con emisión difusa desde la superficie inferior. En este caso la superficie inferior está caliente, T_c=100 K, y las demás superficies, lateral y superior, están frías, T_f=50K, el medio es totalmente absorbente, κ=β=1m^{-1}, y no dispersante, σ=ω=0, y las

paredes son negras, ε_w=1. Este problema fue propuesto por Talukdar et al. [8] y reproducido por Sadat [9].

La Figura 5 muestra la influencia del parámetro conducción-radiación en la distribución de temperatura a lo largo del eje del cilindro. Se advierte que, como es de esperar, la temperatura disminuye con la distancia a la superficie inferior, única fuente de calor, y los gradientes de temperatura crecen con el aumento de *N*. Para *N*=10, la conducción es el principal modo de transferencia de energía por lo que se obtienen los mayores gradientes de temperatura.

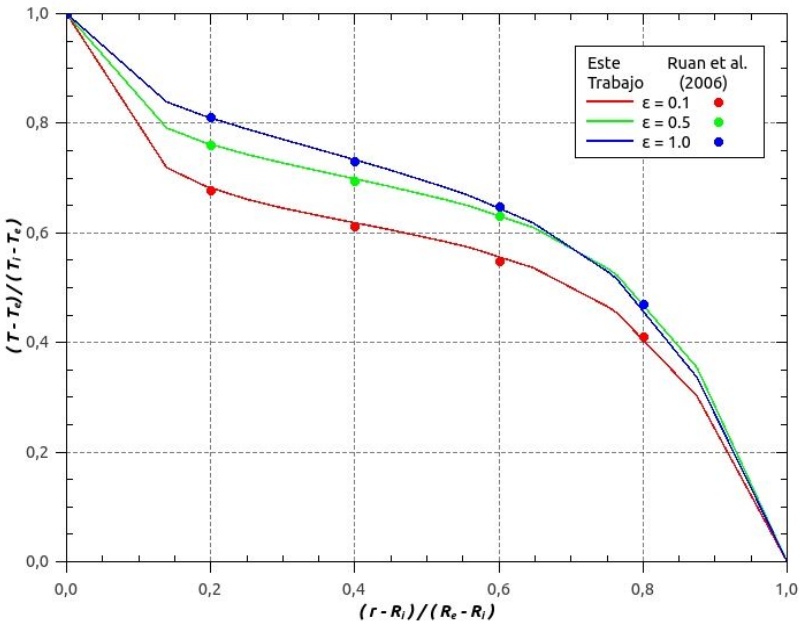


Figura 4: Influencia de la emisividad de las paredes de la cavidad en la distribución de temperatura a lo largo del radio de la cavidad para un medio totalmente absorbente y emisor pero no dispersante.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un código computacional para el cálculo de la transferencia de calor por conducción y radiación combinadas en cavidades cilíndricas multidimensionales con paredes grises, difusas y reflectantes, rellenas con un medio gris absorbente, emisor y anisotrópicamente dispersante.

El código computacional consta de dos módulos independientes que permiten resolver problemas radiantes en una sección circular o anular de longitud infinita y en una cavidad cilíndrica tridimensional.

Se ha utilizado el método de los volúmenes finitos para resolver las ecuaciones de la conducción y de la transferencia radiante junto con una expansión de los polinomios de Legendre para tener en cuenta los efectos de la dispersión anisotrópica.

Se han reproducido una gran cantidad de configuraciones geométricas y térmicas existentes en la literatura y se han evaluado la influencia de los parámetros radiantes más importantes.

Los resultados obtenidos fueron comparados con los resultados existentes en la literatura, donde se han usado métodos numéricos diferente para resolver las ecuaciones de la conducción del calor y de la transferencia radiante.

De la comparación de resultados se puede concluir que las herramientas computacionales desarrolladas en este trabajo proporcionan resultados con un grado de precisión aceptable.

El análisis de resultados permite concluir que la metodología de cálculo, desarrollada en este trabajo, se puede aplicar a configuraciones térmicas, no incluidas en este estudio, con un amplio margen de seguridad.

Se ha verificado nuevamente la capacidad del método de los volúmenes finitos para resolver problemas de transferencia de calor y radiación térmica combinadas, siendo totalmente confiable

ISBN: 978-987-1676-63-7

y seguro para resolver las configuraciones térmicas analizadas en este trabajo.

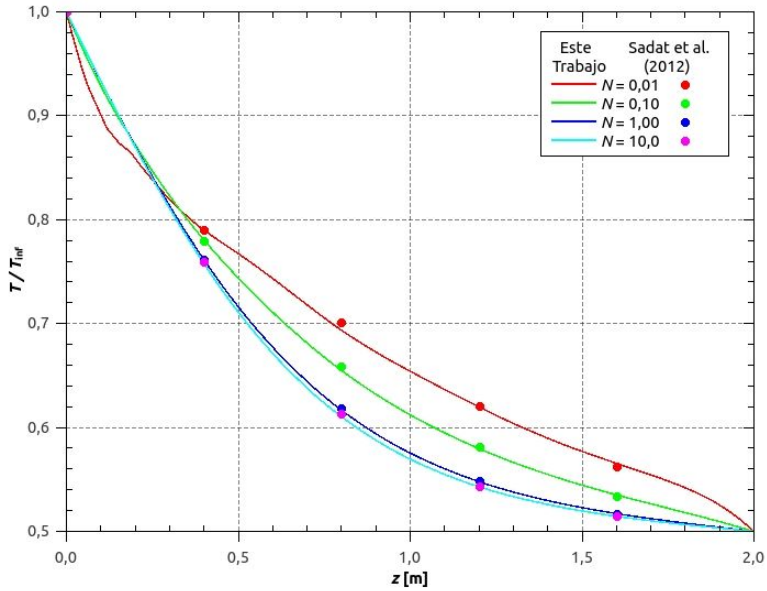


Figura 5: Influencia del parámetro conducción-radiación en la distribución de temperatura a lo largo del eje del cilindro.

5. REFERENCIAS

[1] Fernandes R., Francis J., Combined Conductive and Radiative Heat Transfer in an Absorbing, Emitting, and Scattering Cylindrical Medium, *J. Heat Transfer* 104(4), 594-601, 1982.

[2] Li H.Y., Ozisik M.N., Simultaneous conduction and radiation in a two-dimensional participating cylinder with anisotropic scattering, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 46(5), 393–404, 1991.

[3] Siewert C.E., Thomas Jr. J.R., On coupled conductive-radiative heat transfer problems in a cylinder, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 48(2), 227–236, 1992.

[4] Sakami M., Charette A., Le Dez V., Application of the discrete ordinates method to combined conductive and radiative heat transfer in a two-dimensional complex geometry, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 56(4), 517–533, 1996.

[5] Le Dez V., Vaillon R., Lemonnier D., Lallemand M., Conductive–radiative coupling in an absorbing–emitting axisymmetric medium, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 65(6), 787–803, 2000.

[6] Ruan L.M., Xie M., Qi H., An W., Tan H.P., Development of a finite element model for coupled radiative and conductive heat transfer in participating media, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 102(2), 190–202, 2006.

[7] Aouled-Dlala N., Sghaier T., Seddiki E., Numerical solution of radiative and conductive heat transfer in concentric spherical and cylindrical media, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 107(3), 443–457, 2007.

[8] Talukdar P., Issendorff F. V., Trimis D., Simonson C. J., Conduction–radiation interaction in 3D irregular enclosures using the finite volume method, *Heat and Mass Transfer*, 44(6), 695-704, 2008.

[9] Sadat H., Wang C.A., Le Dez V., Meshless method for solving coupled radiative and conductive heat transfer in complex multi-dimensional geometries, *Applied Mathematics and Computation*, 218(20), 10211–10225, 2012.

[10] Mishra S. C., Sahai H., Analysis of non-Fourier conduction and radiation in a cylindrical medium using lattice Boltzmann method and finite volume method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 61, 41–55, 2013.

[11] Das Ranjan, Forward and inverse solutions of a conductive, convective and radiative cylindrical porous fin, *Energy Conversion and Management*, 87, 96-106, 2014.
[12] Modest M. F., *Radiative heat transfer*, Mc Graw-Hill, 1993.
[13] Brewster M. Q., *Thermal radiative transfer and properties*, John Wiley & Sons, 1992.
[14] Siegel R., Howell J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Taylor & Francis, 1992.
[15] Rebollo, D.; Bocca, J. C.; Rodriguez, C. A., Aplicación del método de los volúmenes finitos al cálculo de la radiación térmica en cavidades cilíndricas, XX *Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*, pags. 3243-3264, Mendoza, 19 al 22 de Noviembre de 2013.
[16] Rebollo, D.; Velasco M.; Rodrigo, R. H., Análisis de la radiación térmica en cavidades cilíndricas rellenas con un medio participante, IV *Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*, Resistencia, Argentina, Septiembre del 2014.
[17] Ben Salah M., Askri F., Slimi K., Ben Nasrallah S., Numerical resolution of the radiative transfer equation in a cylindrical enclosure with the finite-volume method, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 2501–2509, 2004.
[18] Kim M. Y., Assessment of the axisymmetric radiative heat transfer in a cylindrical enclosure with the finite volume method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(21-22), 5144-5153, 2008.
[19] Rebollo D., Simulación numérica de la radiación térmica de gases no grises en cavidades multidimensionales, XVII *Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*, San Luis, Argentina, Noviembre del 2008.
[20] Rebollo D., Simulación numérica de la radiación térmica de gases no grises en un medio plano, XVIII *Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*, Tandil, Buenos Aires, Argentina, Noviembre del 2009.
[21] Rebollo D., Olivera M., Romero C., Simulación numérica de la radiación térmica no gris del vapor de H_2O en un medio plano, II *Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*, San Juan, Argentina, Noviembre del 2010.
[22] Rebollo D., Rodriguez C., Análisis de la radiación térmica no gris del dióxido de carbono en un medio plano no isotérmico, XIX *Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*, Rosario, Argentina, Noviembre del 2011.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

DESARROLLO DE MODELOS NUMERICOS PARA SOLDADURA DE PUNTO POR FRICCION-AGITACION (FSSW)

Luciano Buglioni [1], Joaquín M. Piccini [2] y Hernán G. Svoboda [2,3]

[1] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, Av. Gral. Paz 5445, B1650KNA, San Martín, Buenos Aires, Argentina
correo-e: buglioni@inti.gob.ar
[2] Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, INTECIN, GTSyCM[3], Av. Las Heras 2214, C1127AAR, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
[3] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

La soldadura por fricción agitación (FSW) es un proceso de soldadura en estado sólido con un fuerte impacto en los últimos años, particularmente en la construcción de elementos estructurales con aleaciones de aluminio, específicamente dentro de las industrias aeronáutica, aeroespacial, naval y automotriz, entre otras. La soldadura de punto por fricción agitación (FSSW) utiliza una herramienta la cual es insertada en las chapas en una unión de solape. El calor es generado entre el material y la herramienta produciendo la plastificación de la zona que circunda esta última. Los modelos numéricos de FSSW son de gran interés debido a la complejidad del fenómeno y a la dificultad de medir diferentes magnitudes del proceso. Generalmente una gran demanda computacional debido a las grandes deformaciones a las que están sometidos los materiales a soldar, en tiempos cortos.

Es de interés analizar la capacidad de predicción de modelos numéricos en relación con mediciones experimentales. En el presente trabajo, se realizaron puntos de soldadura en chapas de 3 mm de AA5083 variando la indentación de la herramienta. Los puntos realizados mediante FSSW fueron llevados a cabo con 30 y 2 segundos de tiempo de permanencia, de manera tal de reproducir los estados estacionario y transitorio del proceso. Se desarrollaron modelos numéricos tipo CFD acoplado térmicamente y estacionario, el cual simula un instante determinado del proceso. Finalmente, los resultados de los modelos fueron contrastados con las macrografías obtenidas.

Los resultados obtenidos muestran que fue posible desarrollar modelos capaces de reproducir los principales fenómenos del proceso FSSW. Por otro lado, se muestra como las temperaturas pico, los valores de carga axial, corriente consumida y el tamaño de la zona agitada no presentan variaciones significativas al utilizar tiempos de permanencia de 2 y 30 segundos. Así, los modelos desarrollados, pueden ser utilizados para la descripción del proceso FSSW.

Palabras Claves: *FSSW, CFD, Flujo Plástico, Modelos Numéricos, Ciclos térmicos.*

1. INTRODUCCIÓN

Existe un marcado interés en la industria del transporte (terrestre y aeronáutica, fundamentalmente) por aumentar la eficiencia en el uso de combustibles y así disminuir la emisión de contaminantes a la atmósfera. Para ello, entre otras cosas, se busca reemplazar en la fabricación de los vehículos, componentes de aleaciones ferrosas por aleaciones livianas de aluminio o magnesio, con un comportamiento mecánico semejante, a fin de disminuir el peso de los mismos. En este contexto, toma un papel preponderante el estudio y desarrollo de distintas tecnologías de unión para aplicarse sobre los diversos componentes fabricados con dichas aleaciones [1-3].

Uno de los procesos más ampliamente difundidos, de especial importancia en la industria automotriz, es la Soldadura de Punto por Resistencia (*Resistance Spot Welding*, RSW). Sin embargo, la soldadura por resistencia de aleaciones de aluminio presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, la vida del electrodo disminuye significativamente en relación a la soldadura de acero, la cantidad de energía involucrada es muy elevada y la generación de defectos (porosidad) en la región de la unión se ve incrementada [1-3]. En respuesta a éstos problemas, en el año 2003 *Mazda Motor Corporation* desarrolló un nuevo proceso de soldadura en estado sólido denominado Soldadura de Punto por Fricción Agitación (FSSW, según lo indican las siglas en inglés). Este proceso surgió como una variante de aquel creado en el Reino Unido en el año 1991 por TWI (*The Welding Institute*), denominado Soldadura por Fricción Agitación (FSW) [3].

La Soldadura de Punto por Fricción Agitación consiste en una herramienta rotante, con una geometría particular, que se inserta en una junta solapada, permaneciendo un dado período de tiempo y siendo finalmente extraída. Durante la inserción de la herramienta el hombro de la misma genera el calentamiento del material por fricción, mientras que el pin produce la agitación del material plastificado, produciendo la soldadura en fase sólida de ambas chapas.

Por tratarse de una soldadura en estado sólido, la energía que se le entrega al material en forma de calor es menor que la correspondiente a cualquier proceso de soldadura en estado líquido. Por lo tanto el tamaño de la HAZ (*Heat Affected Zone*) es menor, y como consecuencia de ello, es de esperar que también lo sean las tensiones residuales y las distorsiones inducidas en el material producto de la soldadura. De igual manera, al disminuir el aporte térmico sobre las chapas, se reduce en cierto grado la degradación de los materiales base obtenidos previamente por tratamientos térmicos [3].

Los parámetros del proceso presentan un efecto significativo en conformación del punto de soldadura por FSSW. Entre ellos, la geometría de la herramienta, la velocidad de rotación de la

ISBN: 978-987-1676-63-7

herramienta, el tiempo de permanencia, la profundidad de la penetración de la herramienta, la preparación superficial de la junta y los tratamientos térmicos post-soldadura son algunos de los más significativos [4].

A lo largo de la última década, se ha trabajado en el estudio de la soldadura por fricción agitación, tratando de explicar la relación entre los parámetros del proceso y la microestructura resultante en aleaciones de aluminio. Sin embargo, es escasa la información sistemática disponible respecto de la soldadura FSSW en términos de las variables del proceso y el flujo plástico asociado.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar modelos para FSSW mediante el método *Computational Fluid Dynamics* (CFD), ajustándolos mediante las variables experimentalmente medidas. Por otro lado, se analizará la capacidad predictiva de los modelos desarrollados (estacionarios) sobre puntos de soldadura realizados con 2 segundos de permanencia de la herramienta (transitorios).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales base y FSSW

Para lograr el alcance de los objetivos propuestos se realizaron puntos FSSW en chapas de AA5083 de 3 mm de espesor. La velocidad de rotación de la herramienta fue de 903 RPM y la profundidad de indentación de la misma (H) fue de 0,2, 0,45 y 0,85 mm. El tiempo de permanencia de la herramienta fue de 30 y 2 segundos de modo de representar el estado estacionario y el transitorio tal cual como sucede en los ciclos de soldadura [4].

La herramienta utilizada para la soldadura por FSSW fue construida en un acero para herramientas (H13) con un hombro cóncavo de 12 mm de diámetro. El pin de la herramienta tiene un perfil cónico liso, de 1,65 mm de largo y 3,5 mm de diámetro en el extremo. Todos los puntos soldados mediante FSSW fueron realizados con una velocidad de penetración de 19 mm/min.

Durante el proceso fueron medidas diferentes variables del proceso utilizando una placa de adquisición de 4 canales. Los ciclos térmicos fueron obtenidos con dos termocuplas tipo K, las cuales fueron ubicadas de la siguiente forma respecto del centro del punto: TC1 (Termocupla 1) entre 8 y 9 mm y TC2 (Termocupla 2) entre 12 y 13 mm, dentro de agujeros de 1mm de diámetro a una profundidad de 1,5 mm. En la Figuras 1a y 1b se muestra la disposición de las chapas a soldar con su dispositivo de fijación y las posiciones de las termocuplas respecto del punto. Para cada condición de soldadura se realizaron dos probetas para poder tener en cuenta la incertidumbre del proceso.

ISBN: 978-987-1676-63-7

La carga axial fue también medida utilizando un *strain gage* instrumentado en el cabezal de la herramienta. Por último, se midió la corriente de línea del motor asincrónico, mediante una pinza amperométrica con una sensibilidad de 10mV/A.

a.  b. 

Figura 1. a. Sujeción de la chapa a soldar. b. Disposición de las termocuplas.

2.2. Modelos Numéricos

En este trabajo se desarrollaron modelos CFD representativos del proceso FSSW en ANSYS® Fluent. Los modelos poseen un volumen de control de 150 mm x 50 mm x 3 mm el cual se representa en la Figura 2a. La malla se muestra en la Figura 2b y tiene alrededor de 400.000 celdas, creciendo su densidad cerca de la herramienta con el fin de calcular con mayor detalle la variación de velocidad, temperatura y deformaciones en esta zona.

El dominio tiene una zona central cilíndrica que ha sido removida (Figura 2c), la cual representa la herramienta. La herramienta fue indentada con tres niveles diferentes, llenando con material el volumen que está debajo de la herramienta aguas arriba del pin cuando la indentación fue de 0,2 mm. El volumen de control ha sido dividido en: *Tool*, *Tool Intermedio*, *Top Disp*, *Top Ext*, *Sides*, *Sides Lejano*, *Bottom Int*, Bottom intermedio, *Bottom Disp* y *Bottom Ext*, como puede apreciarse en la Figura 3.

La disipación de calor tiene diferentes valores en cada zona y para cada indentación como puede apreciarse en la Tabla 1. Los valores de disipación de calor fueron ajustados para que los modelos desarrollados posean una distribución de temperaturas en concordancia con las mediciones experimentales.

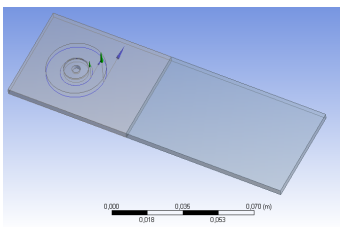
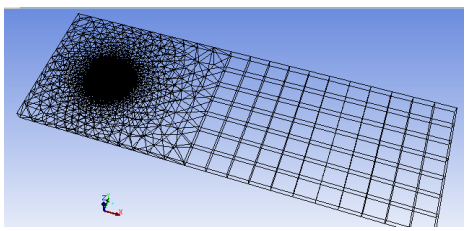
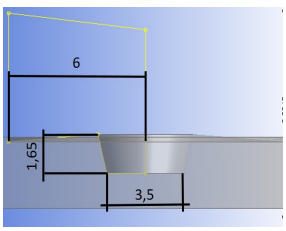
a.  b.  c. 

Figura 2. a. Modelo desarrollado en Fluent, b. Herramienta dentro de la chapa y C. Malla.

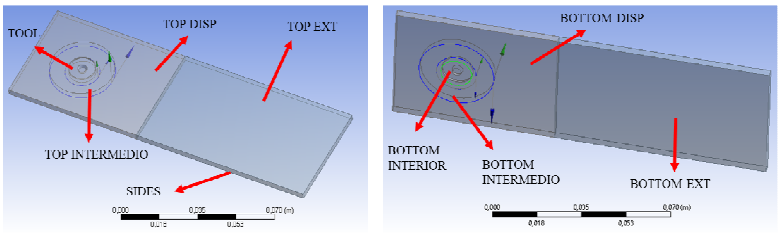


Figura 3. Zonas del volumen de control.

Tabla 1. Condiciones de borde para cada modelo numérico.

	H = 0,2 mm	**H = 0,45 mm**	**H = 0,85 mm**
Superficie	H (W/m^2°K)	H (W/m^2°K)	H (W/m^2°K)
Bottom Ext Ext	200	200	200
Bottom Ext Disp	1500	1500	1500
Bottom Int	4000	2000	4000
Bottom Intermedio	4000	2000	4000
Tool	-	-	-
Top Disp	1500	1500	1500
Top Intermedio	30	30	30
Top Ext	30	30	30
Sides	30	30	30
SidesLejano	30	30	30
Carga Axial (N)	3000	4100	4810

El visco elástico del material está gobernado por la ley de Zener-Holloman propuesta por [5], la cual describe la relación entre temperatura, tasa de deformación ὲ y tensión de flujo como se muestra en la Ecuación (1).

$$\sigma = \sigma_{\cdot} \operatorname{asinh}(x) \tag{1}$$

donde x se define por las Ecuaciones (2) y (3).

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{2}$$

$$x = \frac{Z}{A} \tag{3}$$

La tasa de deformación es limitada ὲ ≥ 0,01. Las propiedades térmicas de la aleación AA5083 se obtuvieron de [5] y fueron correlacionadas con una línea de tendencia polinómica.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Respecto a los mecanismos de generación de calor, este trabajo incluye tanto la generación por adherencia o arrastre como el de deslizamiento o fricción. El flujo de calor generado puede ser representado por la Ecuación (4).

$$q = \eta_c\left((1-\delta)U_q\tau_w\eta_{pl} + \delta\mu p U_q\right) \tag{4}$$

El primer término de la Ecuación (4) representa el calor generado por adherencia (*sticking*) mientras que el último es el calor generado por deslizamiento (*sliding*). En esta ecuación, δ es el deslizamiento, η_c representa la porción del flujo de calor generado que efectivamente afecta a las chapas (ya que parte se pierde en el cabezal de la máquina), U_q es la velocidad tangencial, τ_w la tensión de corte en la interfaz, η_{pl} es la fracción de energía plástica convertida en calor, μ es el coeficiente de fricción y p es la presión.

Respecto al mecanismo de generación de calor, este fue simplificado omitiendo la componente de velocidad lineal (no así en el movimiento) (U_q en la Ecuación (4)) en su cálculo, siendo ésta descripta por la Ecuación. (5).

$$U_q = \frac{\omega r n}{60} \tag{5}$$

En relación al mecanismo de adherencia, τ_w representa la tensión de corte en la interfaz de la herramienta. Esta puede ser calculada a partir de la tensión de fluencia, sin embargo en este trabajo se utiliza la obtenida por cálculo fluido dinámico [6]. Respecto a η_{pl}, se toma como 0,9 de acuerdo a [7].

Dentro de los modelos numéricos desarrollados, se considera que la adherencia de la chapa a la herramienta se produce dentro de una porción del radio del hombro. Afuera de esta zona, el material no gira y el mecanismo de generación es sólo producido por deslizamiento. Este coeficiente se aplica para disminuir el calor aportado por adherencia, y se denomina CSRR (*Contact Shoulder Radius Ratio* o fracción de contacto del radio del hombro) y fue fijado en 0,9. Respecto al deslizamiento y al coeficiente de fricción, éstos se describen por las Ecuaciones (6) y (7) de acuerdo a [5].

$$\delta = 0.2 + 0.6\left[1 - \exp\left(-\delta_0\frac{\omega}{\omega_0}\frac{r}{R_s}\right)\right] \qquad r < R_s.CSRR \tag{6}$$

$$\delta = 1 \qquad r \geq R_s.CSRR$$

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\delta\frac{\omega}{\omega_0}\frac{r}{R_s}\right) \tag{7}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Donde δ_0 y w_0 son parámetros de ajuste, μ_0 es el valor más alto posible, (cuando no existe deslizamiento entre la herramienta y las probetas), w es la velocidad de rotación mientras que r es el radio del elemento cuyo deslizamiento se está analizando (en este caso de la celda de fluido), R_s es el radio del hombro de la herramienta. En este trabajo se tomaron δ_0 y w_0 como 3,0 y 903 rpm, respectivamente, siguiendo los trabajos de [6,7].

En lo concerniente al ajuste entre el modelo numérico y las medidas experimentales, el parámetro más significativo a ser ajustado es la temperatura pico en la termocupla más cercana al punto (TC1). Hay otras variables a ser consideradas con el fin de ajustar el modelo numérico, estas son, entre otras: carga axial, temperaturas pico de TC2 (la más lejana al punto de soldadura), el tamaño y geometría de la zona agitada (*Welding Nugget*), distribución de temperatura y enfriamiento. Como fue mencionado previamente, los modelos fueron ajustados mediante los coeficientes de transferencia de calor, en base a los ciclos térmicos adquiridos para cada indentación como se observó en la Tabla 1.

2.3. Caracterización Macro y Microestructural

Los especímenes para el análisis metalográfico fueron seccionados al tamaño necesario de modo de contener a la zona agitada, la zona termomecánicamente afectada, la zona afectada por el calor y el material base. Luego fueron incluidos en frio y preparados para observación metalográfica. Las probetas fueron pulidas y finalmente atacadas utilizando un reactivo tipo Keller para poder revelar su microestructura.

3. RESULTADOS

En la Figura 4a pueden apreciarse los resultados de la adquisición de ciclos térmicos para las diferentes condiciones de soldadura analizadas. Es posible ver como la TC1 es mayor a la TC2 para todos los valores de indentación, lo cual concuerda con lo reportado en la bibliografía [6-8]. Se observa en la Figura 4a como las temperaturas pico (Tp1 y Tp2) aumentan levemente con la indentación de la herramienta de soldadura. Este efecto estaría relacionado con la distancia entre las termocuplas y la posición final de la herramienta, la cual disminuye con el aumento de la indentación. Finalmente, se puede ver en la Figura 4a que no existen diferencias significativas entre las temperaturas pico alcanzadas al soldar con tiempos de permanencia de 2 y 30 segundos. En la Figura 4b se aprecia como la temperatura máxima se alcanza en el momento que la herramienta deja de indentar la chapa, ya sea cuando la herramienta permanece en el punto 2 o 30 segundos. Por lo tanto, las máximas temperaturas no difieren al modificarse el tiempo de permanencia de la herramienta dentro de la chapa.

ISBN: 978-987-1676-63-7

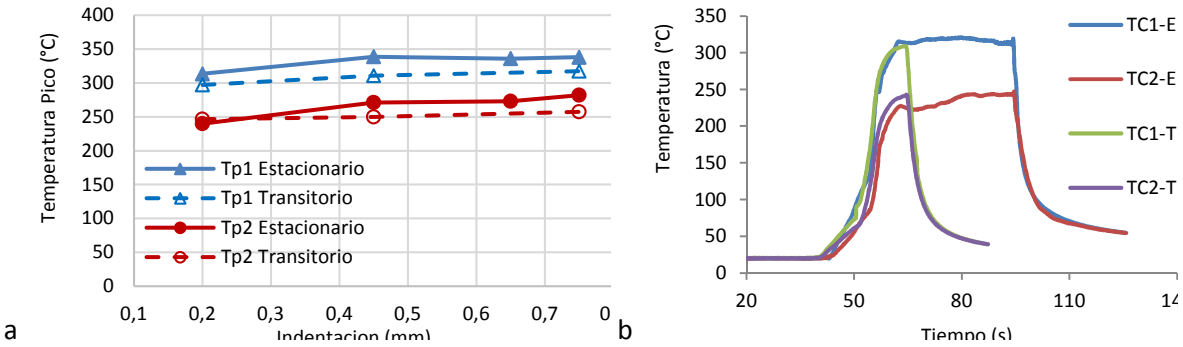


Figura 4. a. Temperaturas Pico vs. Indentación, b. Ciclos térmicos estacionarios (TC1-E y TC2-E) y transitorios (TC1-T y TC2-T).

Durante la ejecución de los puntos de soldadura, tanto la carga axial como la corriente consumida por la maquina fueron adquiridos. Pueden observarse en la Figura 5a las señales de Carga Axial y Corriente en función del tiempo. Es posible ver cómo tanto la carga axial como la corriente aumentan durante la indentación de la herramienta hasta que la misma se detiene, donde se alcanza el pico de ambas señales. Finalmente, las mismas disminuyen a lo largo del tiempo de permanencia de la herramienta dentro de la chapa. El valor de carga axial utilizado para la formulación del modelo numérico estacionario, es el que se alcanza a los 30 segundos de permanencia de la herramienta.

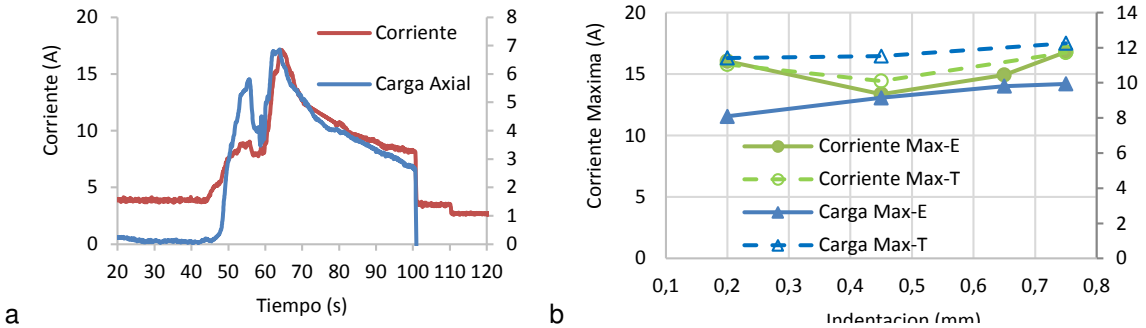


Figura 5. A. Ciclos de carga y corriente y b. Carga y Corriente máx. Vs Indentación.

Por otro lado, en la Figura 5b se aprecian los valores máximos de carga axial y corriente en función de la indentación de la herramienta, tanto para ciclos estacionarios (E) como para los transitorios (T), sin apreciarse diferencias significativas al igual que lo observado con las temperaturas en la Figura 4. Lo apreciado en las Figuras 4 y 5 permitiría inferir que desde el punto de vista térmico, el proceso de soldadura FSSW no presenta grandes diferencias al considerarlo como transitorio o estacionario. De esta manera, es posible modelar al proceso como estacionario (aunque durante la

ISBN: 978-987-1676-63-7

soldadura no lo sea) con un costo computacional bajo a diferencia de lo que implica el modelado del proceso mediante FEM (*Finite Element Method*) para el estado transitorio [9].

Los resultados del modelo desarrollado para una indentación de 0,45 mm pueden observarse en las Figuras 6 y 7. Los mismos son representativos de lo obtenido para indentaciones de 0,2 y 0,85 mm. En las Figuras 6a y 6b puede apreciarse como es la distribución del campo de temperaturas de la chapa en el estado estacionario. Una distribución de temperatura simétrica se observa en el corte transversal del punto de soldadura (Figura 6b).

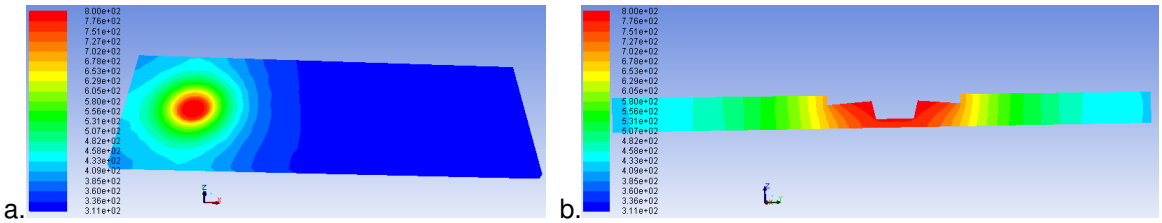


Figura 6. Distribución de temperaturas del modelo desarrollado.

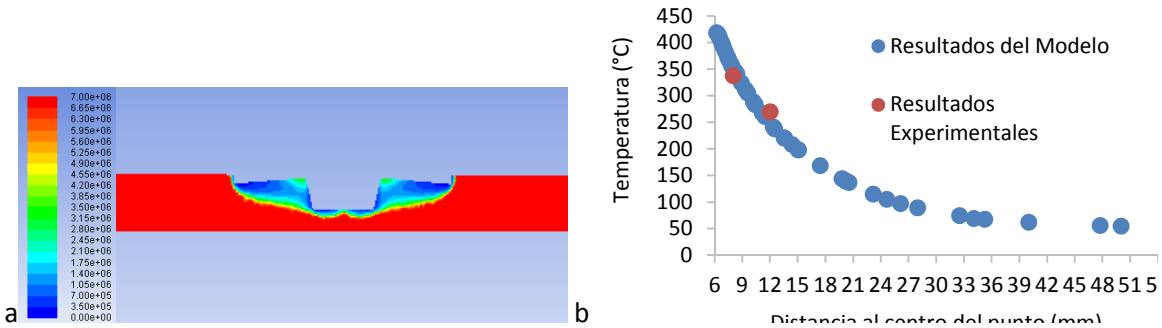


Figura 7. Distribución de viscosidad.

En la Figura 7a puede observarse el campo de viscosidad que el modelo da como resultado. Debe hacerse notar que en la escala utilizada, la viscosidad se grafica entre 0 y $7x10^6$ Pa.s. De acuerdo a lo que se reporta previamente, todo el material que se encuentra dentro de este rango de viscosidad, corresponde con material plastificado y por lo tanto da una idea del tamaño y forma de la zona agitada [10].

Para analizar la exactitud de los modelos desarrollados, se compararon los perfiles de temperatura que devuelven los modelos numéricos con las temperaturas pico alcanzadas en diferentes posiciones. En la Figura 7b se aprecian las temperaturas resultado del modelo y las adquiridas experimentalmente para una indentación de 0,45 mm. Se aprecia un buen ajuste del modelo con los valores adquiridos. Esto fue observado para los tres niveles de indentación estudiados.

Finalmente, para analizar la capacidad descriptiva que presentan los modelos numéricos desarrollados, se superponen las líneas de iso-viscosidad sobre las macrografías adquiridas tanto

ISBN: 978-987-1676-63-7

para los ciclos estacionarios como transitorios, como se aprecia en las Figuras 8a a 8f. Puede verse como el resultado del modelo en términos de flujo plástico concuerda con lo observado en los cortes metalográficos de los puntos soldados mediante FSSW, tanto para el estado estacionario como para el transitorio, a pesar de que el modelo ha sido desarrollado en condición estacionaria. De esta manera, los modelos numéricos desarrollados en CFD son capaces de describir y predecir el comportamiento termo plástico de una chapa AA5083 durante FSSW (transitorio), con un costo computacional bajo en relación a los modelos FEM [9].

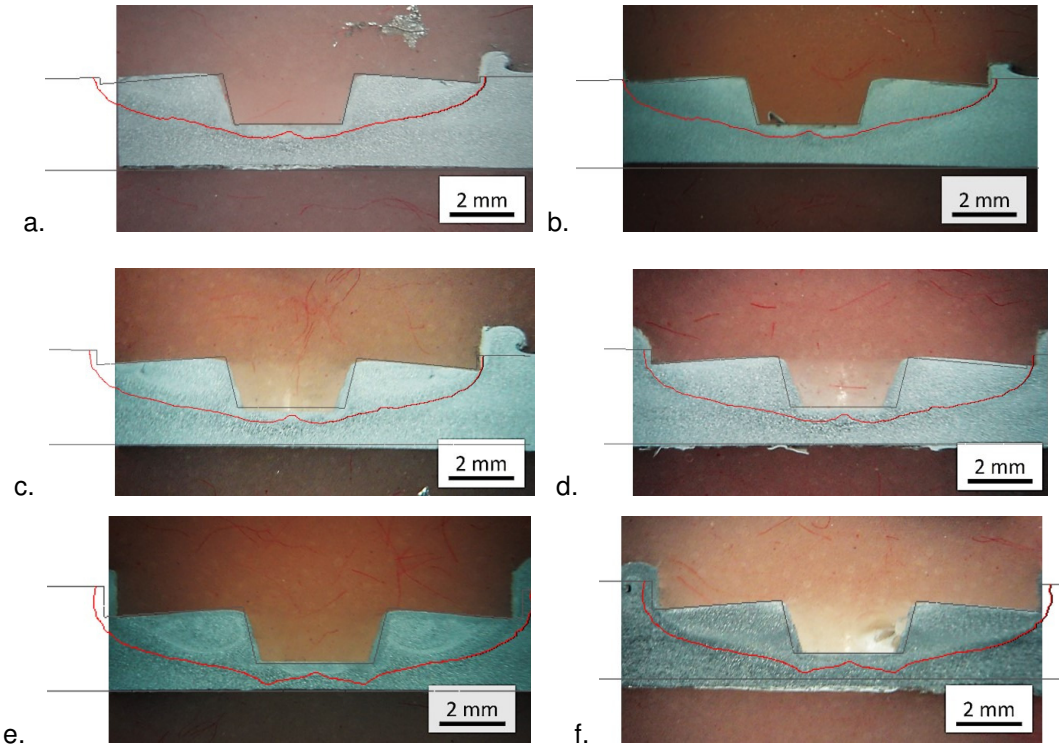


Figura 8. Perfiles de Iso-viscosidad del modelo sobre las macrografías. a. 0,2E, b. 0,2T, c. 0,45E, d. 0,45T, e. 0,85E y f. 0,85T.

4. CONCLUSIONES

La adquisición de datos durante FSSW no muestra diferencias significativas en los valores máximos de temperaturas, carga axial y corriente de línea. En el mismo sentido, las diferencias en el flujo plástico que se aprecia en las macrografías son pequeñas. Modelos numéricos en CFD estacionarios fueron desarrollados en base a una formulación del material tipo Zenner-Hollomon para tres niveles de indentación. Los modelos fueron ajustados en base a la adquisición experimental de ciclos térmicos y de carga axial de la herramienta de soldadura. Los resultados del modelo estacionario permiten describir el campo de temperaturas, velocidades y deformaciones de

los puntos realizados mediante FSSW, tanto para tiempos de permanencia de treinta como de dos segundos. Así, los modelos desarrollados en CFD pueden ser utilizados para la descripción y comprensión del proceso FSSW con un costo computacional bajo en relación a los modelos FEM.

5. REFERENCIAS

[1] Miller W., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A., Smet, P., Haszler A., Vieregge A. *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry.* Materials Science and Engineering, A280, 37-49, 2000.

[2] Pereira A., Ferreira J., Loureiro A., Costa J., Bartolo P. *Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in AA6082-T6.* Materials and Design, 31, 2454–2463, 2010.

[3] Mishra R., Mahoney, M. *Friction Stir Welding and Processing*. ASM International, USA, 2007.

[4] Piccini J., Svoboda H. *Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW)* of dissimilar aluminum alloys. Procedia Materials Science, 8, 868–877, 2015.

[5] Sheppard T., Wright D. *Determination of flowstress. Part 1: Constitutive equation for aluminium-alloys at elevated temperature.* Metals Technology, 6, 215-23, 1979.

[6] Kim D., Chung K., Badarinarayan H. *An experimental and Numerical Approach to Evaluate the Effect of Welding Conditions on Temperature during Friction Stir Spot Welding.* In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE, 2009. Proceedings: Trends in Welding Research. 60-66. ASM International. 2009, Georgia.

[7] Buglioni L., Tufaro L., Svoboda H. *Thermal Cycles and Residual Stresses in FSW of Aluminum Alloys: Experimental Measurements and Numerical Models*. Procedia Materials Science, 9, 87-96, 2014.

[8] Chao Y., Qi X., Tang W. Heat Transfer in Friction Stir Welding Experimental and Numerical Studies. Transactions of the ASME, 125, 138-145, 2003.

[9] Mokhtar A. *Simulation of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Study of Friction Phenomena.* Doctoral Thesis, Morgantown, West Virginia, 2007.

[10] Arora A. *Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments.* Scripta Materialia, 60, 13-16, 2009.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad de Buenos Aires y a CONICET por el apoyo económico brindado para la realización del mismo.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ACCION DEL VIENTO SOBRE TORRES METALICAS

Udrízar Lezcano, Ma. Sandra [1], **De Bortoli, Mario E.** [1] **y Marighetti, Jorge O.** [1]

[1] Laboratorio de Aerodinámica – Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727 Resistencia Chaco Argentina
correo-e: sudrizar@ing.unne.edu.ar.

RESUMEN

El sector de las telecomunicaciones, y el de transmisión de energía eléctrica presentaron una fuerte expansión en el último medio siglo, involucrando la implantación de un gran número de torres metálicas a nivel mundial. Uno de los tipos de torres más empleadas en telecomunicaciones son las reticuladas autosoportadas, de base cuadrada o triangular, generalmente construidas de perfiles laminados y perfiles de chapa plegada.

Por tratarse de estructuras livianas y esbeltas, la acción predominante en la determinación de los esfuerzos a los que estará sometida es la carga del viento. La experiencia desarrollada en el proyecto y ejecución de las mismas es mucha, y sin embargo estas soluciones estructurales siguen colapsando, por causas frecuentemente asociadas a la acción de dicho evento climático [1; 2]. De manera general, la fuerza actuante es función de la presión dinámica de las masas de aire en movimiento, de un coeficiente de arrastre y de la sección efectiva del cuerpo en dirección normal a la acción de las mismas. La presión dinámica depende de la velocidad de las masas de aire en movimiento, que varía con la altura, en tanto el coeficiente de arrastre es función de la geometría del cuerpo al igual que el área efectiva.

En este trabajo se presentan resultados de una investigación experimental efectuada en el Laboratorio de Aerodinámica “Jacek P. Gorecki” de la Universidad Nacional de Nordeste empleando modelos a escala reducida de una estructura reticulada del tipo autosoportada de 30 m de altura. Utilizándose un modelo sectorial en tres tramos con una escala geométrica de 1:10 y determinándose las fuerzas de arrastre mediante una balanza de fuerza unidireccional instrumentada con extensómetros.

Palabras Claves: *Túnel de Viento; estructuras reticuladas; Viento; Fuerza de arrastre*

1. INTRODUCCIÓN

El sector de las telecomunicaciones, y el de transmisión de energía eléctrica presentaron una fuerte expansión en el último medio siglo, este proceso involucró la implantación de un gran número de torres metálicas a nivel mundial. Este tipo de estructura es muy utilizada fundamentalmente por su rapidez de ejecución, por no necesitar de mano de obra muy especializada, por su bajo peso y menor costo en comparación a otras alternativas. Uno de los tipos de torres más empleadas son las reticuladas autosoportadas, de base cuadrada o triangular, generalmente construidas de perfiles laminados.

Por tratarse de estructuras livianas y esbeltas, la acción predominante en la determinación de los esfuerzos a los que estará sometida es la carga del viento. La experiencia desarrollada en el proyecto y ejecución de las mismas es mucha, y sin embargo siguen registrándose colapsos de estas soluciones estructurales, en general asociadas a la acción del mismo [1, 2, 3]. Siendo las torres de telecomunicaciones, tanto atirantadas como autosoportadas las de mayores índices de colapso [3].

De manera general, la fuerza actuante es función de la presión dinámica de las masas de aire en movimiento, de un coeficiente de arrastre y de la sección efectiva del cuerpo en dirección normal a la acción del mismo. La presión dinámica depende de la velocidad del evento climático, que varía con la altura, y el coeficiente de arrastre es función de la geometría del cuerpo al igual que el área efectiva. En nuestro país la norma CIRSOC 102: “Acción del Viento sobre las Construcciones” [4], reglamenta la determinación de las cargas ejercidas por el mismo.

Las condiciones de viento se generalizan para una región geográfica, y varían considerablemente en sitios específicos debido a la naturaleza y accidentes topográficos del área o a las estructuras circundantes. En cada diseño individual de una estructura deben considerarse dichos factores.

Particularmente para las estructuras utilizadas en Telecomunicaciones se actualizó recientemente el Reglamento CIRSOC 306: “Reglamento Argentino para Antenas Estructurales y Estructuras para Soportes de Antenas” (2014) [5]. En el mismo se mantienen algunos aspectos del tren de cálculo señalado en CIRSOC 102 y otros son analizados específicamente para este tipo de estructura.

Diversos autores han efectuado determinaciones de coeficientes de arrastre mediante ensayos en túneles aerodinámicos para secciones regulares como paralelepípedos, placas planas, esferas; pero cuando la forma de una estructura es muy diferente de las formas básicas que se contemplan en las normas, las acciones del viento no se pueden predecir con la precisión necesaria. Este es el caso de una estructura reticulada cuya geometría es muy distinta y por tanto la aplicación de estos coeficientes normalizados resulta inadecuada.

En este sentido, al analizar las estructuras empleadas en telecomunicaciones deben considerarse además las perturbaciones que ocasionan las antenas que se instalen sobre ella, que en general no poseen un patrón definido de colocación, derivando en una forma geométrica no definida. Estas consideraciones son válidas también para la determinación del área expuesta.

Por ello en este trabajo se presentan valores experimentales del coeficiente de arrastre para este tipo de soluciones estructurales, obtenidos mediante ensayos en túnel aerodinámico de modelos rígidos sectoriales en escala 1:10 de una torre reticulada autosoportada de 30 m de altura. Utilizando una balanza unidireccional instrumentada con extensómetros para determinar la fuerza de arrastre y a partir de ella calcular los coeficientes de arrastre.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. CRITERIOS DE SEMEJANZA

Los resultados medidos en los ensayos con el modelo a escala son extrapolables a la estructura real si se respetan apropiadamente las leyes de escala que se derivan de los principios de semejanza, que atañen a la semejanza geométrica entre prototipo y modelo, a la semejanza cinemática de los flujos (las líneas de corriente en uno y otro caso han de ser análogas), a la semejanza dinámica (que establece la correspondencia entre las fuerzas aerodinámicas) y a la semejanza estructural. En general, para lograr un modelado confiable del fenómeno se requiere, en primer lugar, simular adecuadamente las características de la capa límite atmosférica y asimismo modelar adecuadamente la estructura.

Simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento consiste en desarrollar un modelo físico del flujo turbulento atmosférico de manera tal que los parámetros que lo caracterizan se reproduzcan dentro del túnel. Existen diferentes métodos que permiten reproducir las propiedades de la turbulencia representativas de la atmósfera real.

La técnica de simulación de capa límite atmosférica implementada se encuentra comprendida dentro de los métodos de rugosidad, barrera y dispositivo de mezcla desarrollado por Cook [6].

Como las cargas de viento están determinadas por el perfil velocidades medias y las fluctuaciones de velocidad, y considerando a las fluctuaciones como los remolinos presentes en el escurrimiento, aquellos cuya dimensión sea sensiblemente mayor que las estructuras producirán efectos globales sobre la misma. Para determinar el factor de escala de simulación se consideran dos parámetros que describen la velocidad media y las características turbulentas del flujo, que son la longitud de rugosidad z_0 y la escala integral de turbulencia L_{xu}. Esta última es un parámetro usado para describir las características de la turbulencia y representa el tamaño de los remolinos predominantes [7]. En este trabajo no se desarrolló un modelo con semejanza completa, ya que en virtud de la gran disparidad existente entre las dimensiones altura, ancho de la base y espesor de los elementos constitutivos de la torre se debió adoptar una solución de compromiso y relajar la condición de igualdad de escala de simulación del viento con la escala del modelo, y adoptar una semejanza geométrica, con una escala 1:10.

Se considera el emplazamiento de la torre a ensayar en nuestra región, caracterizada por terrenos correspondientes a la categoría C conforme a la clasificación del reglamento CIRSOC 102, definida como: Terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que 10 m. Para esta simulación se adoptaron entonces los valores correspondientes a un tipo de terreno análogo al definido como categoría C, con α=0,14 exponente de la ley potencial de velocidades medias y perfil de intensidad de turbulencia de 10%. La adopción de la ley potencial obedece a la menor complejidad en el tratamiento y análisis de los perfiles de velocidad media en el túnel.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE MEDICIÓN Y DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE FUERZA MEDIANTE ENSAYOS

Una vez que fue conocida la naturaleza de la capa límite y su influencia determinante sobre el flujo que rodea a una estructura, el método de valoración de cargas cuasi estático se adoptó en forma gradual. Este método supone que todas las fluctuaciones de las cargas sobre la estructura son proporcionales a las fluctuaciones existentes en el flujo de aire incidente. Así, las fluctuaciones aleatorias de las cargas están contenidas en el término correspondiente a la velocidad del viento y

ISBN: 978-987-1676-63-7

los coeficientes de carga son considerados en un valor medio constante; esto es, la estructura responde en igual manera tanto a las ráfagas como al flujo medio, de aquí el término de "cuasi estático", también conocido como ráfaga de equivalencia estática. [8]

En base a lo expuesto, para un modelo aerodinámico cuasiestático la carga total del viento F_t sobre la estructura será:

$$F_t = \frac{1}{2}\rho v_t^2 A C_A \tag{3.1}$$

donde v_t^2 es el cuadrado de la velocidad instantánea del viento, A es el área normal al viento, ρ es la densidad del aire y C_A un coeficiente medio de fuerza.

La velocidad del viento en un punto del espacio puede ser expresada como la suma de una velocidad media de dirección paralela al eje de desplazamiento del viento y una velocidad de agitación turbulenta. Por ello puede considerarse que:

$$F_t = F_q + F_f \tag{3.2}$$

con una carga media F_q, y una carga fluctuante F_f (que tiene media cero), por tanto :

$$F_q = \frac{1}{2}\rho\, {V_M}^2 A\, C_A \tag{3.3}$$

Obteniendo de allí el coeficiente medio de fuerza:

$$C_A = \frac{F_q}{1/_2 \rho V_M^2 A} \tag{3.4}$$

será suficiente por lo tanto en el ensayo medir la carga media F_q y la velocidad media del viento incidente a la altura z de la estructura.

Sin embargo, para la comparación de estos coeficientes con los sugeridos por las normas es necesario expresarlos de manera independiente del perfil de velocidades del viento incidente, de manera que:

$$C_A = \frac{F_q}{\int \frac{1}{2}\rho V_M^2 dA} \tag{3.5}$$

Dada la compleja resolución analítica de la integral de área, y además a los efectos de corregir la ubicación en altura de los modelos ensayados (ya que ensamblados se encontrarían a una altura mayor que la de ensayo efectivo en el túnel) se aplicó un método que consistió en dividir en subtramos cada tramo de la estructura, de manera tal que la velocidad en ellos permaneciera prácticamente constante. El valor de la misma se determinó de acuerdo a la ley de variación potencial a la altura real del modelo ensamblado y en base a esta velocidad corregida se determina la fuerza actuante en cada subtramo y su posterior composición. Los detalles de este procedimiento pueden consultarse en referencias [9, 10].

La carga de viento máxima F_{max} es una muestra de una distribución estadística con un valor medio F_q y se expresa como el valor medio de la carga de viento en el periodo en consideración más un factor de pico k_p , multiplicado por la desviación típica σ_F (referida también a dicho periodo), es decir:

$$F_{max} = F_q + k_p \sigma_F \tag{3.6}$$

ISBN: 978-987-1676-63-7

Podemos directamente obtener la Carga máxima, F_{max}, a partir de la carga media, F_q :

$$F_{max} = F_q(1 + 2k_p I_u) \tag{3.7}$$

en un proceso gaussiano el factor de pico k_p vale típicamente entre 3 y 5, en este caso puede tomarse aproximadamente igual a 3,5; este valor k_p=3,5 se obtiene cuando t= 600 segundos (10 minutos) y f_e =0,42 Hz ; I_u es la intensidad de turbulencia longitudinal, que para estos ensayos será 10% [11].

En consecuencia, el valor de la carga máxima será:

$$F_{max} = 1{,}68\, F_q \tag{3.8}$$

4. CARACTERIZACIÓN DE LA TORRE A ENSAYAR

Para el ensayo en túnel de viento se seleccionó una torre autosoportada de 30 m de altura, de sección triangular con las especificaciones indicadas en Figura 1 y Tabla 1:

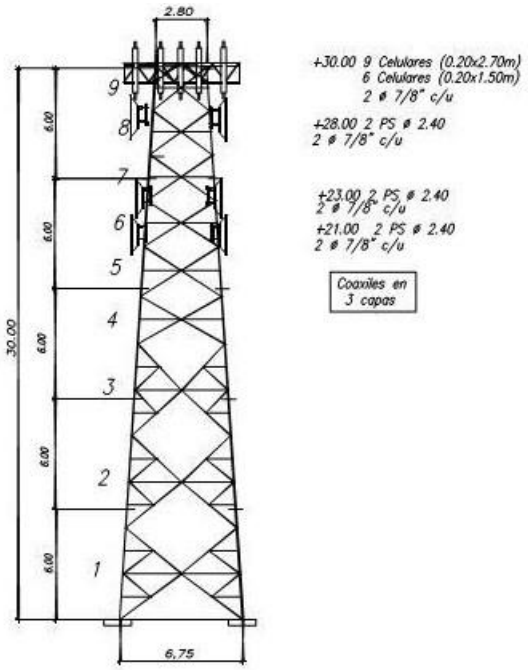


Figura 1: Torre autosoportada (TAS) de 30m de altura

Tabla 1: Detalle de Perfilería de la TAS

Tramos	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Montante F-36	< 480x12,7	<430x12,7	< 380x12,7	< 320x12,7	< 270x12,7
Diagonales	L 102x7,9	L 102x6,4	L 89x9,5	L 89x6,4	L 76x7,9
Travesaños	L 76x6,4	L 64x4,8	L 57x4,8		L 51x4,8
Rompetramos	L 57x4,8				

Considerando los materiales disponibles (perfiles de aluminio de 1 mm de espesor), el tamaño de la cámara de ensayos, la escala de simulación de la Capa Límite lograda en el túnel de viento de la UNNE y las características propias de la estructura a construir, se seleccionó una escala geométrica del modelo de la torre dividida en tres tramos (Inferior, Medio y Superior) lográndose una semejanza geométrica satisfactoria, construyéndose un modelo sectorial rígido en escala 1:10, la velocidad del flujo de aire se determinó en cada ensayo mediante un Tubo de Pitot-Prandtl colocado a la altura del baricentro de cada modelo, y a una distancia de la pared de la cámara de ensayo de 39 cm, mediante el empleo de un posicionador mecánico, lográndose de esta manera la medición de la velocidad en el flujo libre. En la Figura 2 se observa uno de los modelos sectoriales ensayados.



Figura 2: Modelo del Tramo Superior con antenas

ISBN: 978-987-1676-63-7

5. BALANZA DE FUERZAS

Para la determinación de la carga media del viento sobre el modelo, F_{q_M}, fue utilizada una balanza de fuerza unidireccional instrumentada con extensómetros, constituida por dos placas rígidas horizontales de 110x110x12 mm y separadas 110 mm, unidas por cuatro láminas verticales de acero templado de 40 mm de ancho y de 0,8 mm de espesor. La placa inferior se acopla rígidamente a un soporte fijo sobre el piso de las instalaciones del túnel de viento, mientras que la placa superior es acoplada a la base de los modelos, la cual se desplaza en conjunto con el modelo en el sentido del escurrimiento, una distancia proporcional a la fuerza de arrastre actuante (Figura 3).

Esta balanza presenta dos ejes principales: el longitudinal (eje de mayor flexibilidad) y el transversal (eje de sensibilidad despreciable). Las láminas verticales fueron escogidas con una flexibilidad adecuada a fin de garantizar que el desplazamiento máximo de la placa superior, para el orden de magnitud de las fuerzas de arrastre a las que estarán sometidas en este ensayo, no supere el rango de sensibilidad lineal de los extensómetros eléctricos instalados. El diseño posee tornillos de sujeción que permiten modificar el largo efectivo de las láminas verticales.

Para la medición de las fuerzas de arrastre se utilizaron dos medios puentes de Wheatstone con pares de extensómetros colocados a barlovento y a sotavento en láminas verticales cruzadas (es decir, un par en barlovento izquierda y el otro par en sotavento derecha). La fuerza de arrastre horizontal actuante sobre el modelo es transferida a la placa superior de la balanza, provocando la flexión de las láminas de acero inoxidable. Dentro de ciertos límites, que no deben ser sobrepasados durante el ensayo, las deformaciones en las láminas son linealmente dependientes de la fuerza horizontal a ser medida. Estas deformaciones son medidas por los extensómetros eléctricos cuya característica principal es alterar su resistencia eléctrica en forma proporcional a la deformación sufrida. Se utilizó el Sistema de puentes y amplificadores de 4 canales para medición con strain gages marca Hottinger Baldwin Messtechnik disponible en el laboratorio de aerodiámica de la UNNE. Las bandas extensiométricas (strain gages) empleadas son de 120 Ω con factor de galga GF= 2,06.

Luego de su instalación en la cámara de ensayos del túnel de viento, la balanza fue estáticamente calibrada por medio de un conjunto de pesas conocidas.



Figura 3: Balanza para la determinación de Fuerza de Arrastre

ISBN: 978-987-1676-63-7

6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Los ensayos de los tres tramos del modelo de la torre reticulada se realizaron para tres direcciones de viento incidente: 0°, 30° (vértice frente al viento) y 60° (una cara paralela a la dirección del viento) respecto del eje perpendicular a la cara de la estructura. Con el regulador de velocidad en tres posiciones de apertura 8, 6 y 4 las que se traducen en los siguientes valores de velocidad del flujo: 21,26 m/seg, 17,58m/seg y 12,49m/seg.

La longitud de cada muestra tomada durante las calibraciones se definió en 4seg, es decir conjuntos de 4000 lecturas de datos por canal con frecuencia de adquisición de 1000 Hz, logrando así muestras suficientemente representativas del fenómeno. En el ensayo del modelo se empleó un tiempo de 20 segundos para cada canal, con 80000 lecturas a una frecuencia de 1000 Hz.

Estas mediciones se efectuaron con la balanza situada a 32 cm por encima del piso del túnel escapando así de los primeros centímetros de la capa límite simulada donde ocurre variabilidad de las velocidades medias y turbulencias. En función de la experiencia adquirida en trabajos previos con este tipo de estructuras se decidió colocar una estructura de protección frente a la balanza impidiendo así que el viento generado incida también sobre la superficie de la balanza, evitándose que las mediciones obtenidas se vieran influenciadas por las cargas de viento sobre la misma [10].

Para cada configuración, se adquirieron los valores de la presión q utilizando un micromanómetro tipo Betz y el Tubo de Pitot-Prandtl ubicado a la altura media de cada modelo ensayado, es decir a 41 cm de altura para el tramo inferior, a 41,75 cm para el tramo medio y a 40,25 cm de altura sobre el piso del túnel para el Tramo superior del modelo de la Torre. El tramo superior se ensayó con y sin las antenas colocadas en la plataforma triangular.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Algunos resultados obtenidos de los ensayos se presentan en Tabla 2, allí se aprecia que con la estructura con una de sus caras en posición paralela al flujo de aire se obtienen para las distintas velocidades ensayadas, los valores más elevados de los coeficientes de fuerza.

Tabla 2: Coeficientes de Fuerza determinados para el Tramo Inferior de la Torre.

Posición	C_f		
	Velocidad V8	Velocidad V6	Velocidad V4
0º	1,96	1,90	1,93
30º	1,63	1,58	1,58
60º	2,07	2,04	2,03

Para la comparación de los coeficientes de fuerza obtenidos con los sugeridos por las Normas, debe expresárselos de manera independiente del perfil de velocidades del viento incidente (lo que se logra efectuando las correcciones mencionadas en el ítem 2). Se efectúan las correcciones necesarias y se obtienen los valores señalados en Tabla 3. Asimismo, los resultados experimentales muestran mayores valores de coeficientes de arrastre para flujos de alta velocidad, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Smith [2].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 3: Tabla Resumen de Coeficientes de fuerzas obtenidos de los ensayos (independientes del perfil de velocidades incidente)

	Cara Perpendicular	Vista 30º	Vista 60º	
Índice Área Expuesta ε_1	16%	19%	16%	
Carga Media F_{1M} (Nw)	32,4	29,7	27,4	Tramo inferior
Coef. de Fuerza C_{F1}	2,25	1,87	2,20	
Índice Área Expuesta ε_2	15%	17%	15%	
Carga Media F_{2M} (Nw)	27,6	25,5	24,4	Tramo Medio
Coef. de Fuerza C_{F2}	2,13	1,74	2,17	
Índice Área Expuesta ε_3	27%	29%	27%	
Carga Media F_{3M} (Nw)	36,93	33,02	33,22	Tramo Superior
Coef. de Fuerza C_{F3}	2,10	1,09	2,06	

En Figura 4, se observa una curva que presenta los valores de los C_F propuestos por las Normas CIRSOC 102 (coincidente con los de la norma CIRSOC 306), que los establece de acuerdo a la expresión $C_f = 3{,}4\ \varepsilon^2 - 4{,}7\ \varepsilon + 3{,}4$ (secciones transversales triangulares), donde ε es la relación de solidez o índice de área expuesta, es decir es el área de los elementos sobre el área bruta de una cara como si fuese sólida llena. Se representa también otra curva que muestra los valores propuestos por la norma brasilera NBR-6123 [12] para torres reticuladas de sección triangular equilátera formada por barras prismáticas de cantos vivos, para vientos de cualquier dirección. En la misma figura se representaron además los valores experimentales para los distintos tramos de la torre.

Puede advertirse que los valores de los coeficientes de fuerza obtenidos en los en los ensayos se encuentran por debajo de los sugeridos por las normas. Estos resultados corroboran los estudios de Georgiou y Vickery [13], que plantean que existen diferencias entre los valores de coeficientes de arrastre para torres de celosía según diferentes normas, y que a su vez pueden existir variaciones de los resultados experimentales con los normativos. Cabe aclarar que se han representado los valores experimentales obtenidos para la posición normal al viento

ISBN: 978-987-1676-63-7

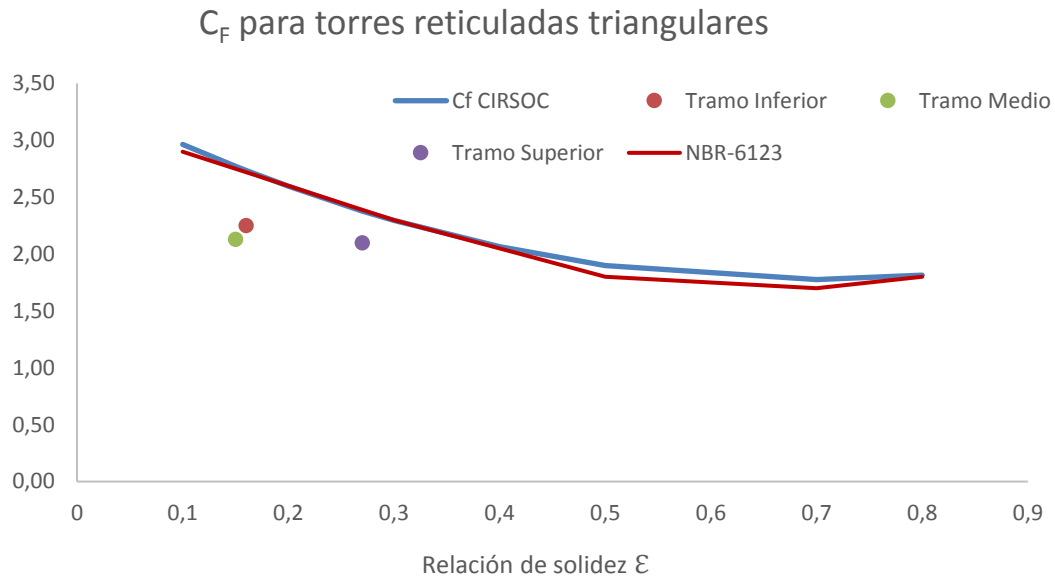


Figura 4: Coeficiente de Fuerza en función de la Relación de Solidez

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la metodología experimental utilizada para determinar los valores del coeficiente de fuerza o coeficiente de arrastre correspondientes a una estructura reticulada de sección triangular equilátera construida con perfiles de cantos vivos.

Se discutió la técnica utilizada para la construcción de los modelos rígidos y la aplicación de las leyes de semejanza. Se efectuaron comparaciones de los valores empíricos con aquellos sugeridos por normas argentinas y brasileras referidas a la acción del viento, y se ha confirmado lo expuesto por diversos investigadores, quienes señalaran que en general los valores experimentales se hallan por debajo de aquellos que figuran en los reglamentos.

9. REFERENCIAS

[1] Blessmann, J., "*Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento"*. Editora da UFRGS, 1998.

[2] Smith, B. W., "*Communication structures"*. Thomas Telford, 2007.

[3] Carril, J. C. F., "*Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicaçoes"*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2000.

[4] Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), INTI, Reglamento CIRSOC 102, 2005.

[5] Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), INTI, Reglamento CIRSOC 306, 2014.
[6] Cook, N., *"Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 3, no. 2, pp. 157–176, 1978

[7] De Bortoli,M; Wittwer,A.; Natalini M." Importancia del parámetro macro escala en los ensayos estructurales en túnel de viento y su determinación". XVI Jornadas de la Asociación de Ingenieros Estructurales -AIE 1998

[8] Castro, Hugo G. - De Bortoli, Mario E. - Natalini, Mario B. "*Aplicación del método de Cook-Mayne al cálculo de coeficientes de cargas globales obtenidos a través de ensayos en túnel de viento".* Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004- UNNE

[9] Udrízar Lezcano, M. Sandra: "*Análisis de torres metálicas para antenas aplicando normas, modelos numéricos y ensayos en Túnel de Viento".* Tesis Maestría, 2015. UNNE

[10] Amuchastegui, M. N., *"Análisis de procedimientos de reglamentos y/o normas vigentes y comparación con coeficientes de cargas obtenidos en ensayos sobre modelos reducidos de torres de transmisión de energía eléctrica en túnel de viento,"* Tesis Maestría, 2010. UNNE

[11] Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J., and Pindado, S., *Aerodinámica Civil. Cargas de viento en las edificaciones.* Madrid: McGraw-Hill, 2001

[12] Normas Técnicas, A. B.*, "Abnt-NBR-6123-forzas devidas ao vento em edificacoes,"* 1987

[13] Georgiou, P. and Vickery, B., *"Wind loads on building frames,"* in *Proceedings of the 5th International Conference on Wind Engineering, Fort Collins,Colorado, USA*, 1979

ISBN: 978-987-1676-63-7

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECANICA DE LAS INGENIERIAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

ANALISIS DEL DESGASTE DE LAS LIMAS WAVEONE SOMETIDAS A UN PROCESO DE ENDODONCIA MECANIZADA EN CANALES RADICULARES

Mario Guzmán Villaseñor [1], **Daniel Aracena Rojas** [2]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica – Universidad de La Frontera
Av. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile
mario.guzman@ufrontera.cl
[2] Departamento de Odontología - Universidad Mayor, Temuco, Chile

RESUMEN

La endodoncia es una especialidad odontológica que trata las afecciones del nervio o pulpa dental. Consiste en limpiar restos pulpares, bacterias y componentes antigénicos localizados en los canales radiculares de los dientes. Tradicionalmente la endodoncia se ha hecho con limas de acero inoxidable y accionamiento manual. En la actualidad, con la llegada de las limas de Níquel-Titanio (NiTi) y la instrumentación rotatoria mecanizada se ha revolucionado la terapia endodóntica, mejorando la calidad del proceso y disminuyendo el tiempo de preparación de los canales.

El objetivo principal de este trabajo estuvo centrado en evaluar *in vitro* el desgaste que se produce en los filos de las limas endodónticas Wave*One Primary* para instrumentación mecanizada, después de conformar 2, 4 y 6 canales de molares maxilares.

Para el estudio se dispuso de 40 limas nuevas *Primary 25/0.8* reciprocantes y se conformaron 120 canales de primeros molares maxilares extraídos. La muestra se dividió en 4 grupos de 10 especímenes cada uno. El grupo 1 correspondió al grupo control; el grupo 2 al que instrumentó dos canales; el grupo 3, cuatro canales y el grupo 4, seis canales. Posterior a la instrumentación, las limas fueron encapsuladas en moldes cilíndricos con resina vinilester, para luego proceder a cortar transversalmente dichos cilindros y visualizar la sección transversal de las herramientas. Las imágenes de la mencionada sección (núcleo de las limas cortadas) se obtuvieron mediante una cámara Moticam 5, acoplada a un microscopio estereoscópico Motic, modelo SMZ 168, con conexión directa USB a un computador. Las imágenes fueron importadas desde el programa AutoCAD 2015. Luego se trazaron sobre dichas imágenes los ángulos de desprendimiento de las limas encapsuladas. El valor de los ángulos medidos fueron tratados mediante una planilla electrónica de cálculo, con la finalidad de cuantificar el resultado del deterioro de los filos.

Los ángulos de desprendimiento después de conformar 2, 4 y 6 canales radiculares presentaron un crecimiento negativo, lo que se traduce en un detrimento de la acción de corte de los filos de las limas endodónticas.

La acción efectiva de corte de las limas *WaveOne Primary*, se mantiene hasta alcanzar 4 canales de molares maxilares instrumentados.

Palabras Claves: *Endodoncia mecanizada, sistema reciprocante, ángulo de desprendimiento, canales radiculares, desgaste de filos.*

1. INTRODUCCIÓN

La endodoncia es un tratamiento odontológico que se realiza en dientes que presentan inflamación pulpar, necrosis pulpar o patológica periapical. Los objetivos de un tratamiento endodóntico son remover por completo los tejidos blandos contenidos en el canal radicular, eliminar cualquier elemento microbiano y crear las condiciones para que se evite el traspaso de microorganismos o sustancias tóxicas desde el sistema de canales hacia los tejidos [1].

Tradicionalmente, la conformación y desinfección de un conducto radicular se realiza mediante el empleo de limas endodónticas. Para el clínico es importante conocer el grado de deterioro de los filos de las limas mecanizadas al instaurar una terapia endodóntica. Una correcta conformación de los canales radiculares es esencial para la efectividad de algunas etapas del tratamiento endodóntico, tales como el proceso de desinfección química y obturación radicular [1-3]. Una instrumentación inadecuada conduce a la generación de alteraciones indeseables en la morfología del canal radicular durante su preparación. Por este motivo, se hace indispensable identificar el verdadero comportamiento de las limas en la remoción de la dentina humana.

La aleación Níquel-Titanio (NiTi) se ha convertido en las últimas décadas, en el material más utilizado en aplicaciones biomédicas, debido a la superelasticidad y capacidad para recuperar su forma original después de someterse a grandes deformaciones [4,5]. El uso del NiTi constituye una innovación en el área endodóntica, al emplearse fundamentalmente para la fabricación de limas orientadas a la conformación de los canales radiculares. Dichos instrumentos poseen una gran resistencia mecánica y un bajo módulo de elasticidad. Esta última propiedad permite que las limas puedan recorrer mejor las curvaturas, disminuyendo la posibilidad de deformar o transportar los canales radiculares [6].

En relación a los procesos de endodoncia mecanizada, esta aleación ha facilitado la instrumentación de canales radiculares curvos con técnicas rotacionales, mejorando la calidad del resultado, además de reducir el tiempo de trabajo y esfuerzo físico del operador, en comparación con las técnicas manuales [7,8].

Actualmente no existe información disponible sobre el desgaste que presenta la lima única del sistema WaveOne Primary, post instrumentación. El estudio de los procesos de endodoncia mecanizada ha tomado una gran importancia, tanto para reducir los recursos utilizados, como para buscar la vida útil de las máquinas y limas endodónticas empleadas.

Herramientas desgastadas en sus filos pierden efectividad de corte y el proceso de remoción de material se convierte en una acción de desgarramiento, lo que conlleva a un acabado superficial de deficiente calidad [9,10].

ISBN: 978-987-1676-63-7

Objetivo principal

Evaluar *in vitro* el desgaste que se produce en los filos de las limas endodónticas *WaveOne Primary* para instrumentación mecanizada, después de conformar 2, 4 y 6 canales de molares maxilares.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Recursos

Para realizar la instrumentación de los dientes seleccionados se dispuso fundamentalmente de los siguientes recursos:

- 120 canales radiculares de primeros molares maxilares
- 40 limas WaveOne Primary 25/0.8
- Motor X-Smart Plus (Dentsply/Maillefer®)
- Moldes cilíndricos de aluminio
- Resina viniléster A-430
- Cobalto y peróxido MEC (Metil-etil-cetona) estándar
- Dremel con disco diamantado EZ lock
- Radiográfias periapicales Kodac (Ultra Speed,DF58)
- Programa AutoCAD 2015
- Microscopio estereoscópico Motic SMZ 168
- Cámara (Motic Xiamen) con conexión USB
- Programa Excel

2.2 Metodología

Para clasificar los molares maxilares a instrumentar, primero se debe estandarizar la curvatura de los canales radiculares mediante el método de Schneider [11].

La Figura 1 muestra el trazado geométrico para determinar la angulación bajo el método de Schneider, cuyos valores están presentados en la Tabla 1.

Las muestras utilizadas para el presente estudio, están clasificadas en la categoría de dientes con curvatura moderada.

Tabla 1. Clasificación angular de Schneider para canales radiculares

Clasificación de la curvatura	Medida del ángulo
Leve	0º a 9º
Moderada	10º a 24º
Severa	25º a 70º

ISBN: 978-987-1676-63-7

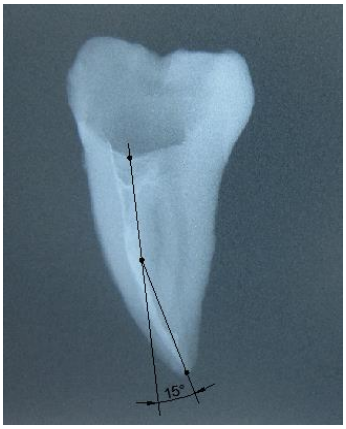


Figura 1: Trazado de la angulación de Schneider sobre un canal radicular

2.3 Lima WaveOne Primary

La Figura 2 muestra la lima WaveOne Primary y la localización de los tres cortes que se realizan en el tercio apical. El tercio apical se divide en 3 partes iguales. El primer corte se realiza a 1,88 mm de la punta y corresponde al corte C1 (Primera captura de imagen). Luego se procede a realizar el segundo corte C2 a los siguientes 1,88 mm (Segunda captura de imagen). Finalmente se realiza el último corte C3 a los subsiguientes 1,88mm (Tercera captura de imagen).

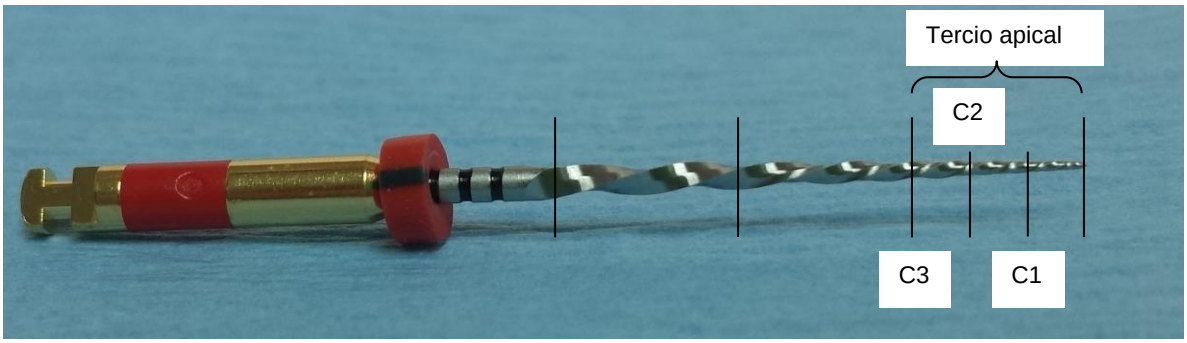


Figura 2: Localización de los cortes transversales programados en la lima WaveOne Primary

2.3.1. Funcionamiento de la lima WaveOne Primary

En la Figura 3 se esquematiza la sección transversal de una lima WaveOne Primary removiendo dentina mediante un sistema denominado reciprocante. Este sistema está caracterizado por tener dos movimientos rotatorios, uno en sentido antihorario y otro en sentido horario. El arco 1-2 tiene un ángulo 170º (sentido antihorario) y el arco 2-3, un ángulo de 50º (sentido horario). Con este sistema reciprocante se pretende evitar el embotamiento de la lima dentro del canal radicular.

ISBN: 978-987-1676-63-7

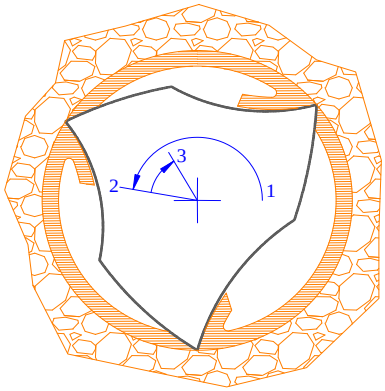


Figura 3: Esquema de la remoción de dentina en un sistema reciprocante

2.4 Encapsulado de limas endodónticas

Luego de la conformación de los canales respectivos, cada lima WaveOne Primary es encapsulada al interior de un molde cilíndrico de aluminio, como lo muestra la Figura 4. El relleno del molde se hace con resina Vinilester A-430, que utiliza como catalizadores el cobalto y el peróxido de hidrógeno, ambos en proporción de 0,2 ml por cada 100 ml de resina.



Figura 4: Molde de aluminio y lima para encapsular

2.4.1. Vistas de las probetas

Después de encapsuladas las limas, se espera el tiempo de curado de la resina para desmoldar las probetas y proceder a realizar los cortes a las distancias establecidas. Los distintos cortes se hacen con un disco diamantado EZ lock instalado en un taladro Dremel de pedestal. La Figura 5 exhibe una vista longitudinal y otra transversal de las probetas

ISBN: 978-987-1676-63-7

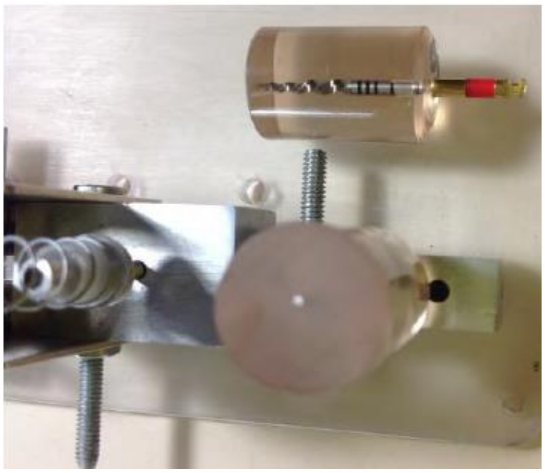


Figura 5: Vista longitudinal y transversal de las probetas

La Figura 6 muestra la lima encapsulada e instalada en el porta-muestra del microscopio para capturar las imágenes de la sección transversal de la herramienta.

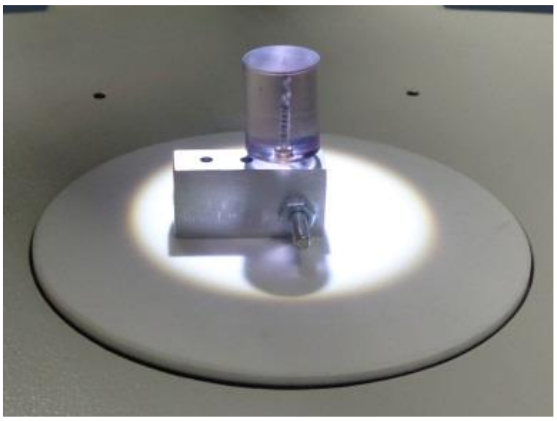


Figura 6: Lima encapsulada e instalada en el porta-objetivos del microscopio

2.5 Captura de imágenes en las secciones transversales

Una plataforma específica fue construida para obtener imágenes estandarizadas de las limas, utilizándose para ello un dispositivo móvil en el que se calza la lima siempre en la misma posición vertical y a la misma distancia del microscopio. Estas imágenes se obtienen mediante una cámara Moticam 5, (Motic®, Hong-Kong, China) acoplada a un microscopio estereoscópico Motic ®, modelo SMZ 168, (Motic Xiamen, Fujiam, China) con conexión directa USB a un ordenador, para luego ser analizadas con el programa AutoCAD® 2015, (Autodesk®, California, CA, USA) determinándose las áreas transversales correspondientes a los cortes C1; C2 y C3 para posteriormente, proceder a la medición de los ángulos de desprendimiento de la herramienta y

ISBN: 978-987-1676-63-7

analizar el deterioro que presenta el filo de las limas, luego de ser utilizadas en 0; 2; 4 y 6 canales, completando un total de 120 canales instrumentados

La Figura 7 muestra las secciones transversales de una lima nueva (sin uso) cuando ésta es cortada en los planos C1, C2 y C3, respectivamente.

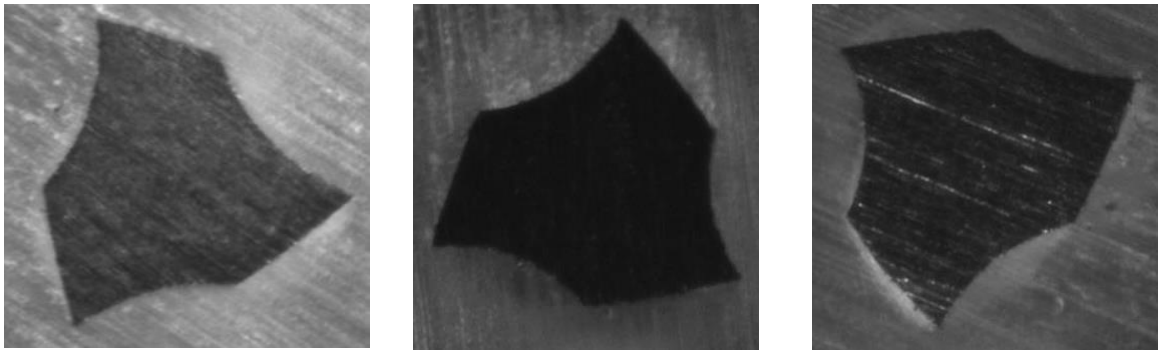


Figura 7: Limas sin uso, cortes transversales en los planos C1; C2 y C3

La Figura 8 muestra las secciones transversales de una lima con dos usos cuando ésta es cortada en los planos C1, C2 y C3, respectivamente.

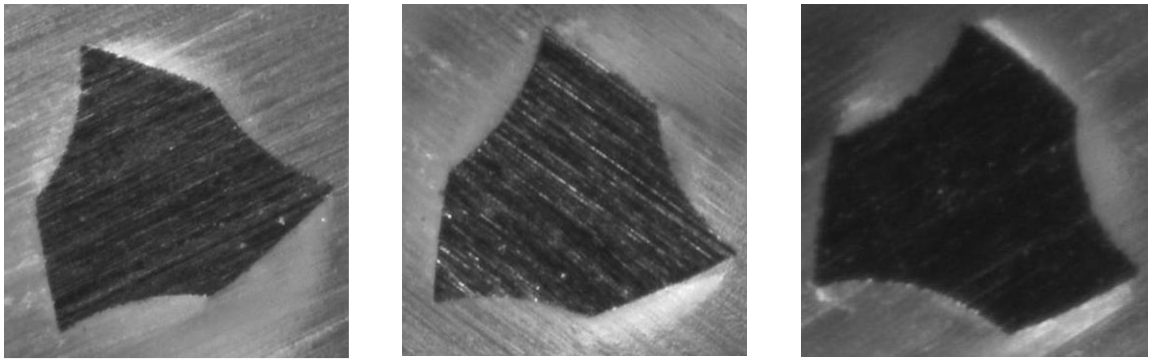


Figura 8: Limas dos usos, cortes transversales C1; C2 y C3

La Figura 9 muestra las secciones transversales de una lima con cuatro usos cuando ésta es cortada en los planos C1, C2 y C3, respectivamente.

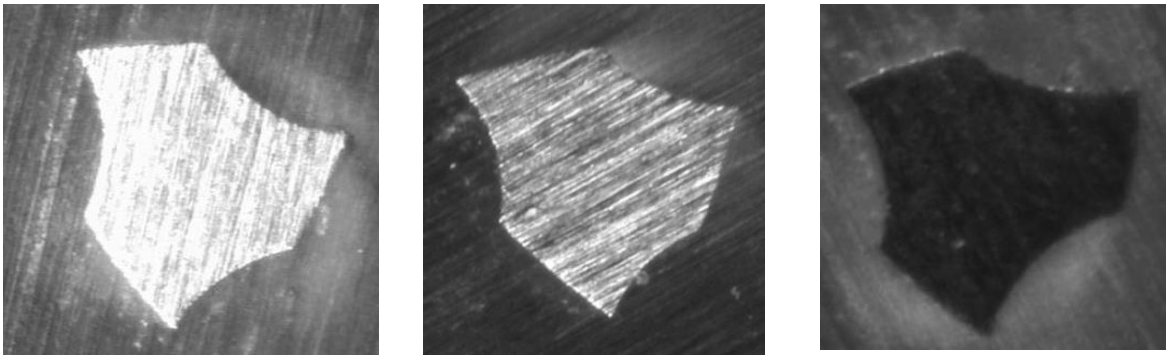


Figura 9: Limas cuatro usos, cortes transversales C1; C2 y C3

La Figura 10 muestra las secciones transversales de una lima con seis usos cuando ésta es cortada en los planos C1, C2 y C3, respectivamente.

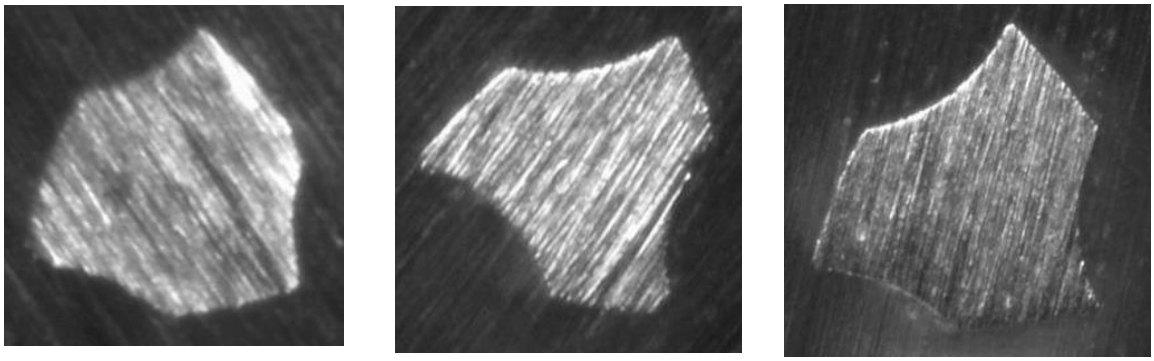


Figura 10: Limas seis usos, cortes transversales C1; C2 y C3

2.5.1 Medición de los ángulos de desprendimiento en los filos de las limas

Mediante el programa computacional AutoCAD 2015, se dibuja el contorno de las secciones transversales generadas por los cortes C1, C2 y C2.

Sobre las mencionadas secciones transversales se trazan la trayectoria circular de los filos de corte, el centro geométrico de la trayectoria circular y los ángulos de desprendimiento de los filos de corte.

Para ilustrar el procedimiento adoptado, se exhibe en la Figura 11 los distintos trazados geométricos antes señalados, y que corresponden al corte C1 de las limas sin uso, con dos usos, cuatro usos y seis usos, respectivamente.

ISBN: 978-987-1676-63-7

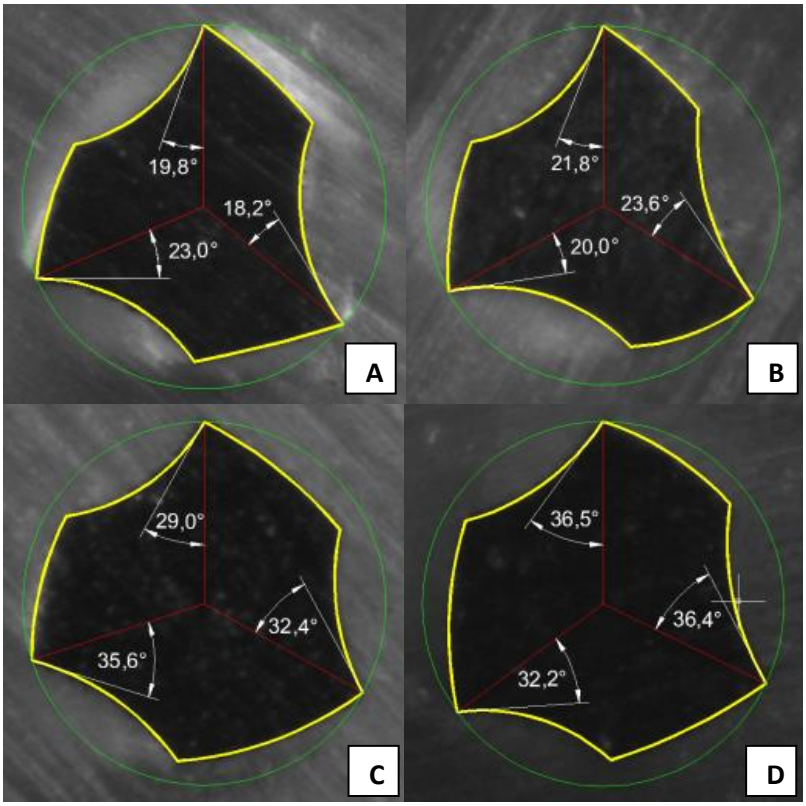


Figura 11: Áreas transversales del corte C1 para limas sin uso (A), limas con dos usos (B), limas con 4 usos (C) y limas con seis usos (D)

3 RESULTADOS

A partir de las limas sin uso, las limas que conformaron 2, 4 y 6 canales radiculares (2, 4 y 6 usos), presentan un crecimiento de sus ángulos de desprendimiento, pero en sentido negativo, lo que provoca una disminución de la acción de corte de los filos, de acuerdo con las teorías de corte con arranque de viruta CAV [10]. La Tabla 2 recoge los ángulos de desprendimiento promedio y la desviación estándar de los filos de corte, para las diferentes áreas transversales C1, C2 y C3.

Tabla 2. Promedios y desviación estándar de los ángulos de desprendimiento para las distintos secciones de estudio, en el tercio apical de las limas ensayadas.

Cortes	**Limas sin uso** ()º	**2 usos** ()º	**4 usos** ()º	**6 usos** ()º
C 1	23,67° (±1,77)	24,79° (±4,43)	25,90(±2,3)	27,91(±3,77)
C 2	24,40° (±1,91)	25,39° (±2,29)	26,55(±2,34)	28,61(±4,99)
C 3	24,95° (±2,02)	25,78° (±3,89)	26,99(±2,11)	29,09(±2,85)

ISBN: 978-987-1676-63-7

La Tabla 3 entrega los porcentajes de incremento en los ángulos de desprendimiento para los valores representativos de cada sección de corte de las herramientas utilizadas, con respecto a los valores que ofrecen las limas con cero uso.

Tabla 3. Incremento porcentual de los ángulos de desprendimiento para las limas utilizadas

Cortes	Cero Uso	Dos usos	Incremento %	Cuatro usos	Incremento %	Seis usos	Incremento %
C 1	23,67º	24,79º	4,52	25,90º	8,61	27,91º	15,19
C 2	24,40º	25,39º	3,90	26,55º	8,10	28,61º	14,72
C 3	24,95º	25,78º	3,22	26,99º	7,56	29,09º	14,23

4 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones extraídas del trabajo son las siguientes:

- El mayor deterioro de los filos de las limas se detecta cuando la herramienta ha instrumentado 6 canales radiculares de molares maxilares con angulación moderada de Schneider.

- Las limas después de conformar 2, 4 y 6 canales radiculares, presentaron un crecimiento negativo de sus ángulos de desprendimiento, lo que provoca una disminución de la acción de corte de los filos.

- Se puede considerar que la acción efectiva de corte de las limas WaveOne Primary, se mantiene hasta alcanzar 4 canales radiculares de molares maxilares con angulación moderada de Schneider.

5 REFERENCIAS

[1] Oporto, G. et al*, Variaciones anatómicas radiculares y sistema de canales*. Int .J Morphol., Vol. 28(3), 945-50, 2010.

[2] Gutmann, J. L. et al, *Alteration in the inherent metallic and surface properties of nickel-titanium root canal instruments to enhance performance, durability and safety: a focused review*. Int. Endod. J., Vol. 45(2), 113-28, 2012.

[3] Saber Sel. et al*, Effect of altering the reciprocation range on the fatigue life and the shaping ability of WaveOne nickel-titanium instruments*. J. Endod., Vol. 39(5), 685-8, 2013.

[4] Bishop K, Dummer PM.A comparison of stainless steel Flexofiles and nickel-titanium NiTi Flex files during the shaping of simulated canals. Int Endod J. Jan. Vol. 30(1), 25-34, 1997.

[5] Jia Ye, Yong Gao. Metallurgical characterization of M-Wire used for endodontic rotary instruments. J Endod. Vol. 38, 105–107, 2012.

[6] Kum KY, Spangberg L, Cha B, Young J, Jong LS, Young LCH. Shaping ability of three Profile rotary instrumentation techniques in simulated resin root canals. J Endod. Vol. 26, 719-723, 2000.

[7] Wu S, Lin H, and Cheng P. *Multi-strengthening effects on the martensitic transformation temperatures of Ni-ti shape memory alloys*. Journal of Materials Science. Vol. 34(22), 5669–5675, 1999.

[8] Schäfer E .*Root canal instruments for manual use: a review*. Endodontics and Dental Traumatology. Vol. 97(13), 51– 64, 1997.

[9] Bin Li. A Review *of Tool Wear Estimation Using Theoretical Analysis and Numerical Simulation Technologies*. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Vol. (35), 143–151, 2012

[10] Groover, M.P. *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*. 3era Edición, Prentice-Hall, Hispanoamericana, S.A. México, 2013.

[11] Schneider S. *A comparison of canal preparations in straight and curved root canals*. Oral Surg. Vol. 32(2), 271-275, 1971.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Dirección de Investigación de la Universidad de La Frontera, que mediante el proyecto DIUFRO DI13-0008 financió este trabajo de investigación.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

LA CALIDAD DEL TRABAJO DE RECOLECCIÓN DE RASTROS E INDICIOS EN ESCENAS DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO, Y SU INFLUENCIA EN LA RECONSTRUCCIÓN DE LA MECÁNICA DE LOS MISMOS.

Bersano C.[1], Simón R.[2], Medina M.[3]

[1]Laboratorio Ingeniería Mecánica Forense – Facultad Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Av. Pellegrini 250, Rosario, Argentina
ingcb45@gmail.com -- ingcb45@fceia.unr.edu.ar
[2] Lab. Ing. Mecánica Forense – FCEIA – UNR
[3] Esc. Ciencias Básicas – FCEIA – Consejo de Investigaciones -UNR

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la relación existente entre la calidad del trabajo de campo que se realiza para recolectar los rastros e indicios, el registro en imágenes y la planimetría de la escena de un siniestro vial, con respecto a los resultados, y su precisión, que se pueden obtener en el proceso de reconstrucción de la mecánica del accidente.

Como es sabido no existe un protocolo estándar para la recolección de rastros en escenas de accidentes viales que asegure una adecuada cadena de custodia; tampoco está claramente definida la responsabilidad de dicha tarea entre las fuerzas de seguridad provinciales y federales, donde muchas veces los límites de las jurisdicciones son difusos y el grado de preparación técnica del personal a cargo es disímil y muchas veces de baja calidad, lo que trae aparejado una baja calidad de la evidencia obtenida.

Ahora bien, esta variación en la calidad de los datos tiene influencia sobre el resultado de los procedimientos físicos matemáticos que se utilizan habitualmente para la reconstrucción de accidentes viales. Esta influencia habitualmente no se mensura y muchas veces es relevante para poder asegurar *el debido proceso*.

Se propone entonces un método de análisis estadístico de los datos relevados y de los parámetros físicos obtenidos de la bibliografía y de la información técnica de los rodados participantes, todo ello asociado a una metodología probabilística–estocástica para la reconstrucción del accidente de modo de obtener resultados que expresen valederamente la influencia de la calidad de los datos recolectados en la escena del accidente, en forma de un resultado probabilístico con el formato de un valor medio, el desvío estándar y la distribución estadística asociada, lo cual es más realista que un valor determinístico.

Este formato de trabajo se puede adaptar al estudio de otro tipo de siniestros.

Palabras Claves: *Calidad, Recolección, Evidencias, Reconstrucción, Accidentes.*

1. INTRODUCCIÓN

La complejidad de los accidentes de tránsito es apreciable por la variedad de vehículos (automóviles, utilitarios, camiones, motos, bicicletas, etc.) que pueden verse involucrados en ellos incluyendo sus propias condiciones mecánicas, por la enorme variabilidad que presentan los escenarios posibles de dichos siniestros (rutas, autopistas, caminos rurales, autopistas urbanas, avenidas, calles, etc.) asociados a la variabilidad del estado de conservación que presenten, y a las condiciones climáticas imperantes. Además interviene, como en todas las actividades que realizan las personas, el factor humano.

Estos elementos configuran el llamado Triángulo Accidentológico que se aprecia en la figura 1

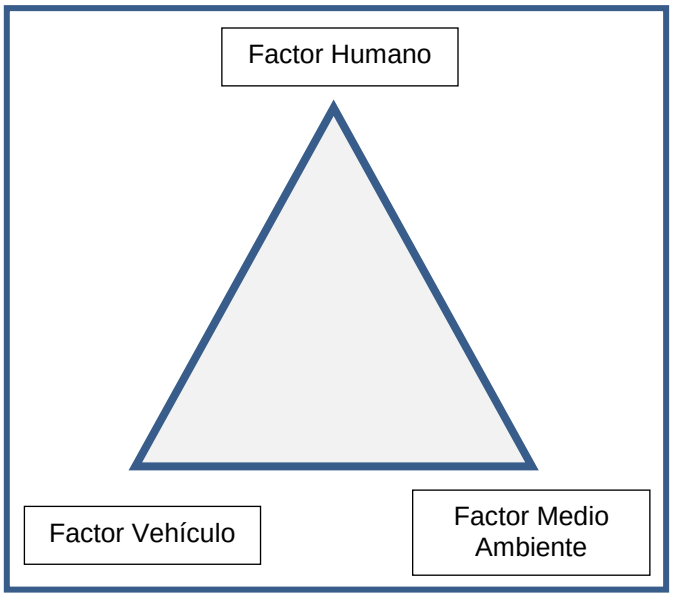


Figura 1: Triángulo Accidentológico

Ésta grafica muestra claramente la interrelación entre los tres factores y cómo los mismos confluyen para que se produzcan los siniestros, en mayor o menor porcentaje según sea el caso, por lo cual decimos que no existen dos siniestros iguales, existen tipologías similares pero cada uno es diferente. Esto implica que los rastros e indicios que se deben relevar varían indefectiblemente de la escena de un accidente a otra.

Existen una variedad de técnicas para la recolección de rastros e indicios según la tipología de las escenas, pero no existe un protocolo estándar para la recolección de rastros e indicios en escenas de accidentes viales que asegure una adecuada cadena de custodia; tampoco está claramente definida la responsabilidad de dicha tarea entre las fuerzas de seguridad provinciales y federales,

ISBN: 978-987-1676-63-7

donde los límites de las jurisdicciones son difusos y el grado de preparación técnica del personal a cargo es disímil, lo que trae aparejado una baja calidad de la evidencia obtenida.

El objetivo de este trabajo es estudiar la relación existente entre la calidad del trabajo de campo que se realiza para recolectar los rastros e indicios, el registro en imágenes y la planimetría de la escena de un siniestro vial, con respecto a los resultados y su precisión, que pueden obtenerse en el proceso de reconstrucción de la mecánica del accidente que se realiza en gabinete y en general mucho tiempo después de la ocurrencia del hecho, por una cuestión de procedimientos.

2. DESARROLLO

A continuación se describen las tareas a realizar con el fin de reconstruir un siniestro vial basándonos en una línea de tiempo ideal y suponiendo que el grado de preparación de los investigadores actuantes es aceptable. En otras palabras en presencia de circunstancias ideales. Y teniendo en cuenta cómo los errores de procedimientos pueden llevar a la formulación de conclusiones imprecisas, sin poder establecer el grado de las mismas.

La habitualidad del trabajo de los ingenieros forenses, muchas veces dista bastante de transcurrir dentro de circunstancias ideales, ya que los especialistas comienzan a trabajar sobre un siniestro, meses (o años) después de que el mismo ha sucedido.

2.1. Trabajo de campo

Las denominadas tareas de campo que se realizan en la escena de un accidente de tránsito son de variadas características, tendientes todas ellas a relevar el lugar del hecho y a recolectar rastros e indicios, todos los cuales una vez analizados debidamente forman parte del cuerpo de evidencias que posibilitan la reconstrucción total o parcial del hecho. [1]

2.1.1 Identificación de los rastros e indicios a relevar

Es el primer paso, donde se identifican todos los elementos que se deben relevar y recolectar, lo que no se encuentra en esta instancia en general desaparece, por lo cual se debe procurar aislar la zona.

2.1.2 Planimetría

Se compone de dos partes, la primera es el relevamiento de las características geométricas del lugar del hecho con todas las medidas necesarias para poder realizar su representación gráfica, la segunda parte es el relevamiento de la posición de todos los elementos de interés para el hecho (posición final de los vehículos, longitud y ubicación de huellas, posición de restos, etc.). En esta

instancia los errores de medición ya sea por falta o deficiencia de equipos o por fallas en el procedimiento, se transforman en una fuente de error.

2.1.3 Registro fotográfico

Si bien el registro fotográfico en general no brinda per se elementos mensurables para la determinación de los parámetros de circulación de los vehículos intervinientes, brinda una gran cantidad de información objetiva. Permite registrar la escena en forma panorámica desde diversos ángulos, que deben ser elegidos adecuadamente, lo que brinda una visión general de la misma y permite advertir inconsistencias con respecto a las actas de inspección ocular. Con las tomas adecuadas, con los parámetros técnicos de las fotografías y usando Software Fotogramétrico se pueden determinar dimensiones, que sirvan para controlar la planimetría de la escena o bien complementarla. [2]

Un registro detallado de los rastros e indicios brinda muchísima información objetiva por ejemplo una toma fotográfica de las huellas de neumáticos tomada con las debidas condiciones permite determinar si son de frenada o son de derrape y en tal caso de qué tipo; todo esto facilita enormemente la determinación de los coeficientes de fricción a utilizar en la determinación de la velocidad de circulación del vehículo al cual pertenecen esas huellas. [3]

Un adecuado registro fotográfico de los restos de los rodados ayuda a determinar de qué forma se diseminaron, cuáles fueron las fuerzas actuantes en el proceso (y tal vez hasta sus magnitudes) e identificar claramente a qué rodado pertenecen.

Otro punto es registrar el levantamiento de rastros (ver 2.1.4) y especialmente el retiro de los vehículos para registrar que no se produzcan daños sobre los mismos que dificulten la interpretación de los mismos en pasos posteriores

2.1.4 Levantamiento de rastros

El último de los pasos del trabajo de campo es el levantamiento de los rastros e indicios de la escena del siniestro, para que se pueda asegurar su inalterabilidad y la trazabilidad de la cadena de custodia (punto fundamental en la admisibilidad de la prueba en un proceso judicial). Consiste en el debido registro del precintado de los recipientes o contenedores donde se coloquen dichos rastros y la confección de las correspondientes actas, verificando que todos los elementos estén sellados de forma de que no se los pueda alterar.

La principal pieza o conjunto que se debe preservar es el rodado o lo que quede de él, ya que del mismo se puede obtener una gran cantidad de información, aunque es la que presenta mayores dificultades, por su volumen y peso, para su movilización. Debe quedar precintado de modo que no

sea posible acceder a sus comandos, a la mecánica y a la electrónica del mismo, prestando especial atención de protegerlo de los elementos naturales que pueden, por ejemplo, dañar en forma definitiva la unidad electrónica de control del rodado etc.

2.2. Trabajo de gabinete

El denominado trabajo de gabinete es el que se realiza ya sea en el taller o en el laboratorio de ser necesario para analizar los elementos o los rodados mismos, y/o en la oficina para la realización del análisis de rastros o evidencias, determinaciones físicas, cálculos matemáticos, etc.

Es en esta instancia donde se genera el cuerpo de evidencias que se utiliza para la fundamentación científico-tecnológica de la reconstrucción del siniestro basado en la mecánica o dinámica del mismo según sea el caso.

2.2.1 Revisión documental

Es el primer paso donde se recopilan los datos objetivos y los indicios que se consideren necesarios y se encuentran en las actuaciones judiciales con el fin de reconstruir el siniestro.

2.2.2 Revisión de los vehículos

La revisión en taller de los vehículos participantes busca definir claramente la extensión de los daños que presentan, la existencia de transferencias de pintura que indiquen la forma y los puntos de contacto, la compatibilidad de los daños, etc., además de realizar el dimensionamiento de las deformaciones que presentan.

Debe realizarse una detallada inspección de los habitáculos de los rodados para determinar el estado del instrumental y de los comandos e interruptores. Además de la extracción de datos de la unidad de comando electrónico [4] de la que se puede obtener información valiosa si la unidad se preserva adecuadamente.

2.2.3 Armado del cuerpo de evidencias

La última parte de las tareas de gabinete es el análisis de los elementos e información de todo tipo recogida en las labores de campo y en los trabajos de gabinetes precedentes, con el fin de transformarlas en el cuerpo de evidencias que son la base de la reconstrucción del siniestro.

Como ejemplo, si se analizan las huellas de frenada, por la planimetría se tiene su longitud, o por lo menos las distancias que el vehículo recorrió frenando y dejando una huella visible, lo cual no implica que no frenara por un tiempo mayor pero por lo menos nos da un rango mínimo. Además, por las fotografías de dichas huellas se puede determinar si son de derrape o de bloqueo, o en

ISBN: 978-987-1676-63-7

casos muy particulares si son de ABS. Con la descripción de las condiciones ambientales y de la calzada se puede determinar, con la ayuda de tablas, un coeficiente de rozamiento que se puede utilizar para determinar la velocidad a la que circulaba el rodado instantes antes de frenar, mediante la fórmula (1) suponiendo que el vehículo se detuviera al finalizar la huella.

$$v = \sqrt{2 * \mu * g * l} \qquad (1)$$

Donde:

μ es el coeficiente se rozamiento vehículo - calzada
g es la aceleración de la gravedad
l es la longitud de las huellas de frenada

La cual arroja un resultado único (determinístico) que determina la velocidad *mínima* a la que circulaba el rodado.

Siguiendo el mismo lineamiento y utilizando diversos principios físicos como el de conservación de cantidad de movimiento, conservación de energía, análisis vectorial de cantidad de movimiento y modelos de estimación de energía de deformación entre otros y combinando los resultados numéricos con el resto de los rastros y elementos, se conforma el cuerpo de evidencias que nos permiten reconstruir el siniestro.

2.3. Variabilidad de los datos y su consecuencia

El problema de la metodología de trabajo y análisis explicitada, es que la incertidumbre del proceso de recolección de datos y las determinaciones de constantes en base a observaciones, no se mensuran, y por lo tanto no podemos determinar la incertidumbre de los resultados obtenidos, los que se convierten en meras cifras producto del uso de métodos determinísticos utilizados en la resolución de los procedimientos físico-matemáticos que se usan habitualmente para la reconstrucción de los sinestros viales.

Siguiendo con el mismo ejemplo del análisis del proceso de frenado de 2.2.3, se tienen dos variables a determinar y sobre las que se trabaja habitualmente: el coeficiente de rozamiento μ y la longitud de la huella L

El coeficiente de rozamiento μ depende del tipo de frenada que produjo el rodado ya sea de máxima eficiencia o de bloqueo, del estado de los neumáticos, las características de la calzada y si estaba seca o húmeda.

ISBN: 978-987-1676-63-7

El largo de la huella, por otro lado depende del proceso de medición que introduce su propio error por el método de medición empleado: desde el paso normal, pasando por la cinta métrica y el odómetro, terminando en un telémetro laser. En la tabla 1 [5] se indican los errores de diversos métodos de medición.

Tabla 1. Errores de Medición

Dispositivo o Método de Medición	Error (%)
Pasos (número de pasos medidos más tarde)	10
Pies (número de pies medidos más tarde)	5
Cintas de acero comerciales o de bolsillo	0,08
Cintas metálicas nuevas	0,15
Cintas metálicas muy usadas	0,5
Cintas de tela nueva	0,25
Rueda de medir, superficie suave, giro lento	1,5

Al volcar lo expresado en un ejemplo numérico. Caso A: Un siniestro en el cual un rodado produjo una huella de frenada de 21 metros sobre una calzada seca de pavimento asfáltico y con neumático en buen estado.

De la tabla 2 [6] se ve que para las condiciones planteadas y suponiendo que la velocidad de circulación fuera superior a los 50 kilómetros por hora, se tendrían los siguientes valores del coeficiente de frenado.

Tabla 2. Coeficientes de frenado

Superficie Calzada: Asfalto - Seca	Coeficiente de frenado	
	Desde	A
Nuevo, liso	0,65	1,00
Usado	0,55	0,70
Pulimentado por el tránsito	0,45	0,65
Con exceso de alquitrán	0,35	0,60

De la tabla se desprende que si no se tiene una clara descripción y tipificación de la calzada pueden existir variaciones de hasta el 50% en la determinación del coeficiente de frenado el que a su vez presenta un entorno de valores que pueden variar en un orden del 45% al 50%. Por lo tanto se puede apreciar claramente que la indeterminación al aplicar la fórmula (1) para determinar la

ISBN: 978-987-1676-63-7

velocidad de circulación del rodado es muy alta. Así se aprecia en la tabla 3, donde se reflejan a modo de ejemplo los resultados obtenidos luego de utilizar los distintos entornos de coeficientes de frenado para el pavimento asfáltico de la tabla 2 y la distancia afectada por el error máximo de cada dispositivo de medición de la tabla 1. Se aprecia la diferencia entre la velocidad máxima 76,60 Km/h y la mínima 43,21 Km/h calculadas, es del orden del 55%, siendo todas teóricamente posibles dentro de ese entorno.

Tabla 3. Variación de la velocidad de circulación del rodado (Km/h)

Superficie Pavimento Asfalto Seco		Dispositivo o Método de Medición						
		Pasos	Pies	Cinta Bolsillo	Cinta Met Nueva	Cinta Met Vieja	Cinta Tela	Rueda
		23.10	22.05	21.01	21.03	21.10	21.05	21.31
Nuevo, Liso	0.65	61.75	60.33	58.89	58.92	59.02	58.95	59.31
	1.00	**76.60**	74.84	73.05	73.08	73.21	73.12	73.57
Usado	0.55	56.80	55.50	54.17	54.24	54.29	54.22	54.56
	0.70	64.08	62.61	61.12	61.19	61.25	61.17	61.55
Pulimentado por el Transito	0.45	51.38	50.20	49.00	49.02	49.11	49.05	49.35
	0.65	61.75	60.33	58.89	58.92	59.02	58.95	59.31
Exceso Alquitrán	0.35	45.31	44.27	**43.21**	43.23	43.31	43.26	43.52
	0.60	59.33	57.97	56.58	56.61	56.70	56.61	56.98

A todo lo explicitado respecto a los resultados numéricos, se agregan los errores de procedimiento, los que son producto de la falta de capacitación de los operadores y la falta de coordinación dentro de las reparticiones actuantes.

2.4. Utilización de un Modelo Estocástico

De acuerdo a lo desarrollado en los puntos 2.1 y 2.2 se ve que existen dos tipos de problemas que producen errores en el proceso reconstructivo de un siniestro. Por un lado los problemas de procedimientos que no son mensurables ya que se trata de cuestiones cualitativas no cuantificables, que involucran al factor humano por falta de capacitación, motivación, personalidad no acorde a la tarea, y por un factor que podríamos denominar tecnológico, que involucra al mantenimiento, conservación y modernización del equipamiento utilizado.

Por otro lado se encuentran los problemas de índole numérico en los cálculos que se realizan para determinar los parámetros físicos involucrados en el siniestro ya que no se contemplan en el mismo los errores propios de los sistemas de medición en las longitudes de huellas, deformaciones de los vehículos, posiciones de los mismos, etc., y los errores para determinar constantes utilizadas como el coeficiente de frenado, coeficiente de restitución, etc., como en el ejemplo del punto 2.3. donde se utiliza un formato determinístico para la realización de los cálculos de donde

ISBN: 978-987-1676-63-7

se obtiene un valor sin ninguna acotación de tolerancia, o sea sin contemplar la calidad de la información disponible. Ahora bien si se utiliza un formato probabilístico como en el siguiente caso B: [7]. Se tiene una huella de frenada de 6 metros de longitud tal como se aprecia en la tabla 4, junto con los demás datos necesarios para la resolución utilizando la formula (1) con la salvedad que tanto la longitud y el coeficiente de frenado están expresados en un formato estadístico: Valor medio - Desvío estándar – Tipo de distribución

Tabla 4: Datos para el cálculo de la Velocidad

Aceleración "*g*"	**Coeficiente "μ"**	**Long. de frenada "*l*"**
9,8 m/seg^2	0,7 - Desvío Estándar 0,1 Distribución Normal	6 m - Desvío Estándar 0,6 Distribución Normal

Programando la fórmula (1) en una planilla de cálculo asociada a software estadístico, se hace posible cargar los valores y sus parámetros estadísticos. Se utiliza para el cálculo una simulación de Monte Carlo [8] y realizando una corrida de 10000 iteraciones obtenemos como resultado

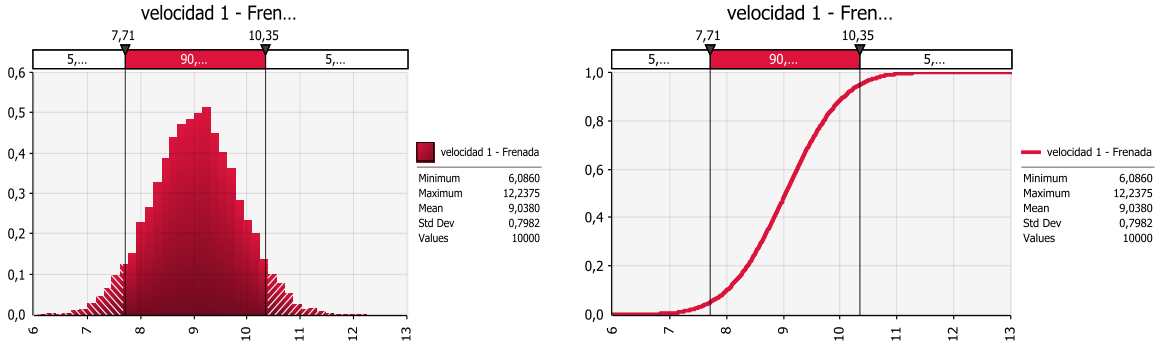


Figura 2: Velocidad de circulación en el caso B

que la velocidad de circulación media era de 9,038 m/seg (o 32,53 Km/h) con un desvío estándar de 0,796 adoptando una distribución del tipo normal. En las gráficas de la figura 2 se puede apreciar que existe una probabilidad acumulada del 90 % de que la velocidad estuviera comprendida entre los 7,71 y 10,35 m/seg, operando sobre las gráficas puede obtenerse la probabilidad acumulada de entornos de velocidades más pequeños o bien la probabilidad acumulada de que supere o no un determinado valor.

Se observa cómo la variación en la calidad de los datos tiene influencia sobre el resultado de los procedimientos físicos matemáticos que se utilizan habitualmente para la reconstrucción de accidentes viales.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Al comparar la forma en que se obtienen los resultados en los casos A y B, queda claramente expuesta la ventaja de la utilización de un formato probabilístico para analizar los aspectos numéricos de un siniestro con el objetivo de lograr reconstruirlo. En el caso A se obtiene como resultado un número del cual se puede tener poca idea de su precisión o ninguna, típico resultado determinístico, que como queda evidenciado en la tabla 3 puede tener un amplio grado de error; en el caso B es totalmente distinto ya que no se tiene un valor fijo sino que el resultado obtenido es un valor y una probabilidad de la veracidad o falsedad del mismo.

Esta nueva metodología de cálculo traería aparejado la necesidad de un cambio en la forma de trabajo tanto de campo como de gabinete, lo cual implica la necesidad de analizar los métodos de medición y de determinación de constantes de forma de obtener los valores junto a sus parámetros estadísticos asociados de modo de tener en cuenta la variación de la calidad de los datos.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se propone un método de análisis estadístico de los datos relevados en el trabajo de campo, de los parámetros físicos obtenidos de la bibliografía y de la información técnica de los rodados participantes. Todo ello asociado a una metodología de modelización probabilística–estocástica para la reconstrucción del accidente [9,10], basada en el Método de Monte Carlo. Así se logran obtener resultados que expresen valederamente la influencia de la calidad de los datos recolectados en la escena del accidente, en forma de un resultado probabilístico con el formato de un valor medio, el desvío estándar y la distribución probabilística asociada, lo cual es más realista que un valor determinístico.

Se propone además el análisis y la confección de un protocolo de Trabajo de Campo que implique una mejora en la recolección de evidencias y levantamiento de rastros, basado en un proceso de capacitación y mejora continua, y que contemple la adquisición de datos con un formato compatible con la metodología probabilística propuesta y a lograr una mejora sustancial en los procesos de reconstrucción de siniestros viales que impliquen un cambio positivo en la valoración de los resultados y la utilidad de los mismos para el desarrollo de los procesos judiciales, asegurando el debido proceso y derecho de defensa en juicio

Esta metodología de trabajo se puede adaptar al estudio de otro tipo de siniestros como los del tipo industrial y en diversos ámbitos como el privado o el gubernamental, además del judicial.

ISBN: 978-987-1676-63-7

4. REFERENCIAS

[1] Álvarez Mantaras, D. "et al". *Investigación de Accidentes de Tráfico. La toma de Datos*. Thomson Editores Spain. España. 2005

[2] Dextre, J.C. "et al". *Vías Humanas*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Perú. 2008

[3] Alba López, J.J. "et al". *Accidentes de Tráfico. Manual Básico de Investigación y Reconstrucción.* Editorial Copy Center. España. 2001

[4] Dietsch, K. *Manual de la Técnica del Automóvil*. Edit.Robert Bosch Gmbh. Alemania. 2005

[5] Zajaczkowski, R. *Accidentología Vial.* Dosyuna Ediciones Argentinas. Argentina 2010

[6] Garcia, A. *Accidentes de Tránsito. Investigación y Reconstrucción*. Editorial Nueva Librería, Buenos Aires. Argentina. 2011

[7] Simón, R. Bersano, C. Mattara, M. Medina, M. Ponso, R. (2014). "Resolución de un choque por alcance en base a la aplicación de un modelo estocástico y función falla". ". Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. CAIM 2014. Anales IV CAIM 2014 ISBN 978-987-45571-0-0 Septiembre Edit Univ Nac Nordeste Resistencia

[8] Martínez, E. "Cálculo de cotas de error en Accidentología usando Técnica de Monte Carlo". Ciencia Energética, 25:25. 1994.

[9] Garber N. J. – Wu Lei (2007) - Reporter de Investigation n° Uvacts-15-5-54 - Stochastic models relating crash probabilities with geometric and corresponding traffic characteristic.

[10] Chin-Hsu Lin, Ruth Gao, Yi-Pen Cheng (2006) - General Motors, USA - Paper ID 307 - A stochastic approach for the simulation of an integrated vehicle and occupant model.

V CAIM 2016
V Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
XXXIII Reunión Científica Académica Nacional FoDAMI
5 al 7 de Octubre de 2016
FORO DOCENTE DEL AREA MECÁNICA DE LAS INGENIERÍAS
FoDAMI
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Santiago del Estero - República Argentina

CONTROL DE CORRECTO FUNCIONAMIENTO DE PINZAS, ALICATES Y TENAZAS – HERRAMIENTAS NO ENCUADRADAS DENTRO DE NORMAS.

Leurino Rodrigo César[1], Leonardelli Facundo Nahuel[2], Hugo Martires[3]

[1, 2]Laboratorio Industrial Metalúrgico - Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe
Lavaisse 610, Santa Fe (S 3004 EWB), Argentina
E-mail: lim@frsf.utn.edu.ar
[3]Laboratorio Metalográfico Químico – Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe

RESUMEN

Las características funcionales y no visibles de estas herramientas de mano se garantizan mediante ensayos mecánicos normalizados por ISO [1]. Básicamente, los mismos consisten en aplicar una carga a una distancia dada desde la articulación, para observar el comportamiento y la deformación de las mismas. La dificultad radica en establecer un método de ensayo, y además poder encuadrar totalmente la herramienta dentro de una de las normativas existentes.

Particularmente, el cálculo de la fuerza de corte y de la deformación permanente de estas herramientas se normaliza en DIN ISO 9242 [2] e ISO 5744 [3], respectivamente. El caso analizado en este trabajo corresponde a una tenaza no contemplada completamente por una sola norma, y para la cual se desarrolló un método de ensayo que respete las condiciones establecidas para obtener datos que realmente garanticen el correcto funcionamiento de la misma.

El desarrollo de este trabajo se realizó en el ámbito del Laboratorio Industrial Metalúrgico (entidad acreditada bajo el OAA que cuenta con 46 años de actividad en el ámbito industrial y académico). Se utilizaron máquinas e instrumentos de medición calibrados con trazabilidad internacional, y se diseñaron dispositivos y accesorios específicos para tal fin.

Por último, se establecen las principales conclusiones inherentes al comportamiento de esta herramienta utilizando la información resultante de ambos ensayos, y que fue obtenida por un método totalmente válido.

Palabras Claves: *herramientas de mano**,** calidad, ensayos de control, deformación, corte,*

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la familia de pinzas y alicates se encuentra la tenaza de desvasar, la cual se observa en la Figura 1. Esta tenaza es una herramienta de precisión que se utiliza para diferentes tipos de cascos (vasos) de animales. Presenta dos bordes cortantes muy afilados y un diseño que, mediante topes, asegura que los bordes no se toquen y el filo perdure en el tiempo.



Figura 1: *Tenaza de desvasar*

Desvasar significa cortar o arreglar el vaso o casco de un equino u otro animal y es una operación que se realiza generalmente a la hora de colocarle la herradura a dicho animal. Esta operación, requiere de una serie de herramientas dentro de las cuales se encuentra la tenaza en estudio. Una secuencia simplificada de esta operación es la siguiente:

a) Extraer la herradura: Se cortan o desdoblan los remaches con un "cortaremaches". Para luego extraer la herradura.
b) Limpiar la palma del casco: Con una "gubia", se elimina el material que se encuentra suelto.
c) Descubrir el límite natural de corte de pared y recortar: Con un compás se toma la medida para obtener la misma altura en los cuatro vasos. El corte se realizará con la "**tenaza de desvasar**". Luego, se empareja para lograr un buen asiento de la herradura con una lima.



Figura 2: *Cortaremaches. Gubia. Tenaza de desvasar*

d) Elegir la herradura: Ésta debe cubrir la totalidad del casco sin sobrar. Se elije la que mejor se adapte y en un yunque se forja hasta copiar la forma del pie. Para fijarla, se colocarán los clavos paralelos al casco sin ser clavados del todo y se alternarán los golpes entre ellos.
e) Ajustar y remachar la herradura: se ajustará golpeando la cabeza del clavo y afirmando el remache con una herramienta llamada **"**rebatedor". Luego, se cortarán los remaches con la "tenaza corta clavos" y se remachará utilizando la **"**pinza de remachar".



Figura 3: *Rebatedor. Tenaza corta clavos. Pinza de remachar*

ISBN: 978-987-1676-63-7

1.1. Antecedentes

Las Normas ISO [1] presenta especificaciones relativas a pinzas y tenazas, las cuales se detallan en la Tabla 1. Sin embargo, para verificar las dimensiones y el funcionamiento de este tipo de herramientas, no existe una norma específica, como si las hay para las tenazas de carpintero, las tenazas de construcción, las pinzas para electrónica, etc. En consecuencia, se deben encuadrar los ensayos a realizar dentro de alguna de las normas para tenazas similares.

Tabla 1: Normativa relativa a diversas herramientas

Norma	Última Revisión	Título	Descripción
ISO 5742	2004	Alicates y tenazas	Nomenclatura.
ISO 5743	2004	Alicates y tenazas	Requisitos técnicos generales.
ISO 5744	2004	Alicates y tenazas	Métodos de ensayo.
ISO 5745	2004	Alicates y tenazas	Alicates para sujetar y manipular. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 5746	2004	Alicates y tenazas	Alicates de Ingenieros e "instaladores de líneas". Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 5747	2004	Alicates y tenazas	Alicates y tenazas de corte final y diagonal, de palanca asistida. Dimensiones y valores de comprobación
ISO 5748	2004	Alicates y tenazas	Alicates de corte final. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 5749	2004	Alicates y tenazas	Alicates de corte diagonal. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 8976	2004	Alicates y tenazas	Alicates de articulación deslizante múltiple. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 8979	2004	Alicates y pinzas para electrónica	Nomenclatura
ISO 9242	1988	Alicates y tenazas	Tenazas de construcción. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 9243	1988	Alicates y tenazas	Tenazas de carpintero. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 9343	2004	Alicates y tenazas	Pinzas ajustables. Dimensiones y valores de comprobación.
ISO 9654	2004	Alicates y pinzas para electrónica	Pinzas de uso específico. Pinzas de corte.
ISO 9655	2004	Alicates y pinzas para electrónica	Alicates de uso específico. Pinzas para sujetar y manipular.
ISO 9656	2004	Alicates y pinzas para electrónica	Métodos de ensayo.
ISO 9657	2004	Alicates y pinzas para electrónica	Requisitos técnicos generales.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es realizar los ensayos de control a la tenaza de desvasar, basándose en los ensayos normalizados para las pinzas y alicates.

Se presentan dos objetivos específicos:

- Encuadrar los ensayos a realizarle a la tenaza de desvasar dentro de normas existentes.
- Diseñar dispositivos para poder realizar los ensayos en una máquina universal de ensayos.

ISBN: 978-987-1676-63-7

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. Marco normativo

En primer lugar, se definieron las normas a utilizar como base para realizar los ensayos:

- ISO 5744:2004(E). Establece los métodos de manera general
- DIN ISO 9242:1994. Geométricamente, la tenaza de construcción es similar a la tenaza de desvasar.

2.2. Dispositivos y Equipos

Para realizar los ensayos se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos calibrados por laboratorios de calibración acreditados por el OAA [4]:

- Cinta métrica. Rango: 3m - Resolución 1mm.
- Regla flexible. Rango: 300mm - Resolución 0,5mm.
- Calibre digital. Rango: 150mm - Resolución 0,01mm.
- Termohigrómetro digital. Resolución 0,1ºC.
- Máquina Universal de Ensayos.
- Celda de carga. Rango: 5000daN – Resolución 0,1daN.
- Decodificador y sistema de adquisición de datos, software Smartest v.2.0.

En la Figura 4 se observa el montaje del conjunto Celda de carga / Dispositivos / Tenaza.

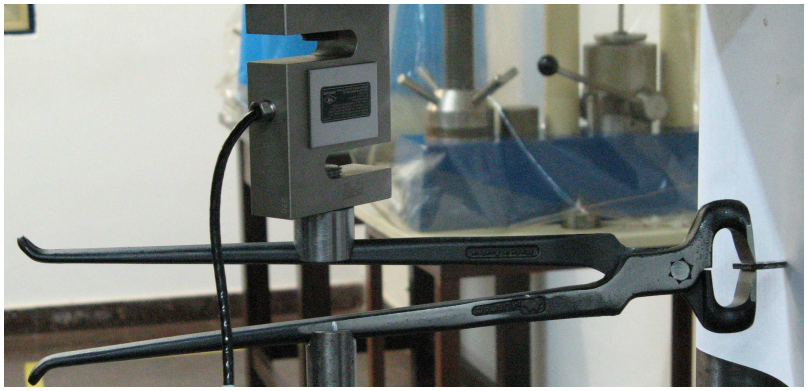


Figura 4: *Montaje de la Muestra en Máquina Universal de Ensayo*

La máquina universal de ensayos está equipada con una celda de carga de 30.000 daN y Resolución 1 daN, para estos ensayos se decidió adaptar una celda de carga de 5.000 daN y Resolución 0,1 daN. Esto se debe a que las cargas que se deben registrar son pequeñas y con esta resolución se tendrá un mayor control y precisión en las cargas aplicadas.

Los dispositivos se diseñaron de manera de asegurar que la carga aplicada se realice a una distancia de la articulación constante e invariable con la posición de la tenaza. Estos dispositivos vinculan los puentes de la máquina universal de ensayos con la celda de carga y con la tenaza a ensayar. En la Figura 5 se observa una ilustración de los dispositivos y su posición respecto a la máquina.

ISBN: 978-987-1676-63-7

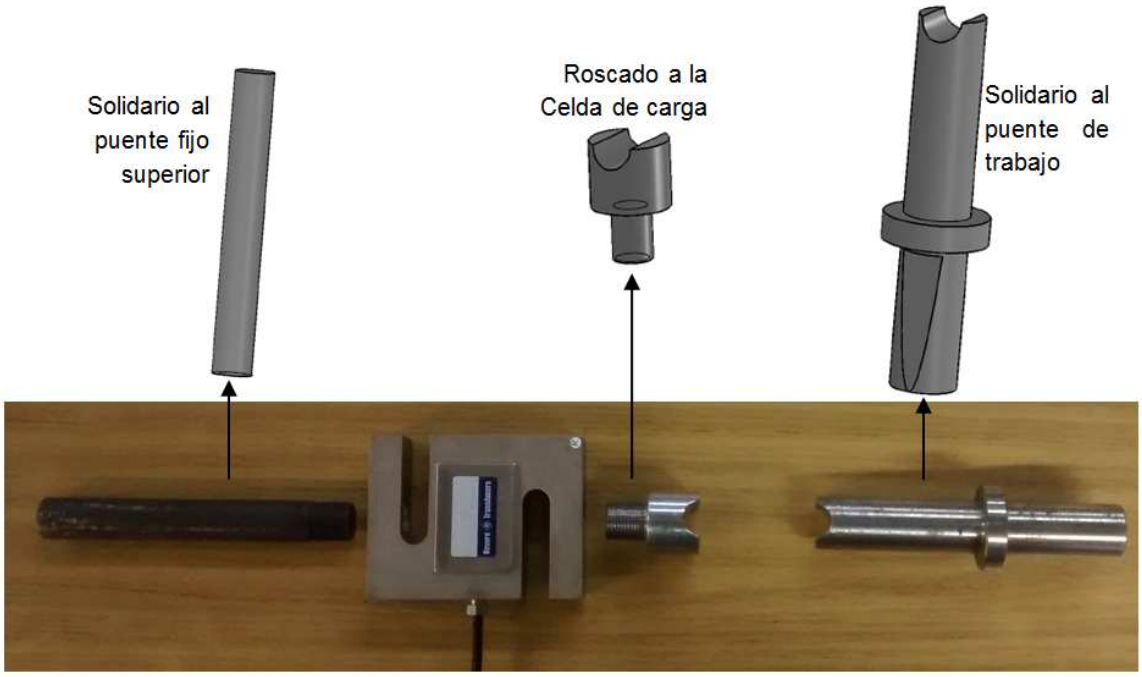


Figura 5: *Posiciones de los dispositivos auxiliares*

2.3. Tenaza de desvasar a ensayar

La MUESTRA de tenaza del tipo *End cutting nippers*, identificada como "HORSE NIPPER", respeta el croquis de la Figura 6 y posee las siguientes características:

- La longitud total de la pieza es de 360mm (Dimensión A). La distancia desde el filo a la articulación es de 36 mm (Dimensión B)
- En ambas ramas, se observa acuñado en relieve, la Marca del fabricante y en el reverso, también en relieve, la procedencia.

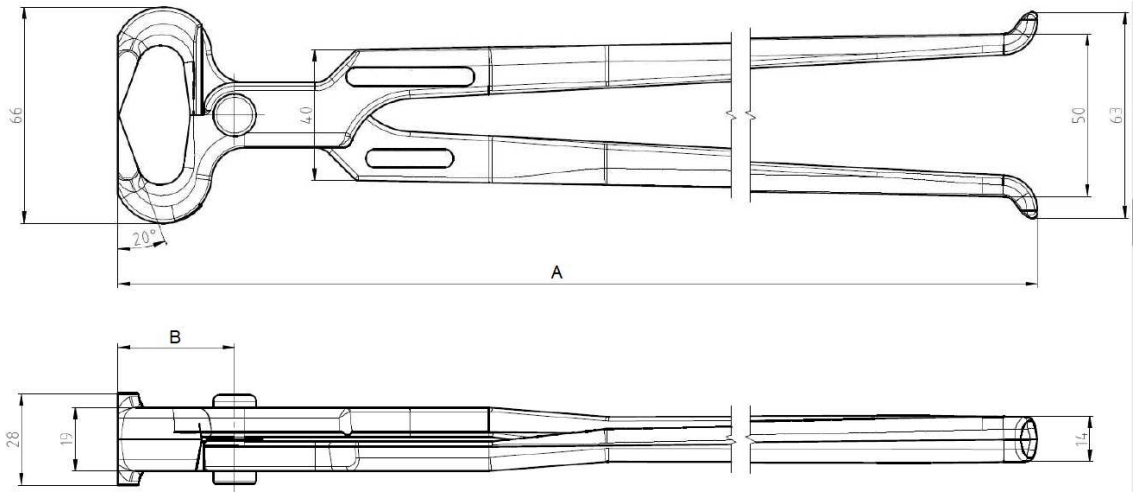


Figura 6: *Croquis de tenaza de desvasar*

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.4. Ensayos de Control

Se determinará, según lo exigido por Norma DIN ISO 9242:1994, la fuerza de corte para un alambre de 1,6mm de diámetro y la deformación permanente luego de aplicar el método de ensayo indicado en la Norma ISO 5744:2004(E), Inc. 4.2.

2.4.1. Cálculo de la fuerza de corte

Para el ensayo de corte, se utilizaron las normas DIN ISO 9242:1994 e ISO 5744:2004.
ISO 5744:2004 establece que, para pinzas de corte final, el ensayo debe llevarse a cabo a una distancia de 3 mm del extremo del filo cortante, como se observa en la Figura 7.

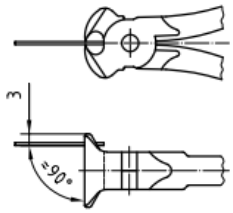


Figura 7: *Disposición de ensayo de corte*

Además, aconseja que si el ensayo no se puede realizar convenientemente según los puntos definidos para productos estándar, en las tablas de DIN ISO 9242:1994 (L_1 y L_2) ver Figura 8 y Tabla 2, las posiciones más adecuadas para la MUESTRA se definen según L_1' y L_2'. Ver Ecuación (1).

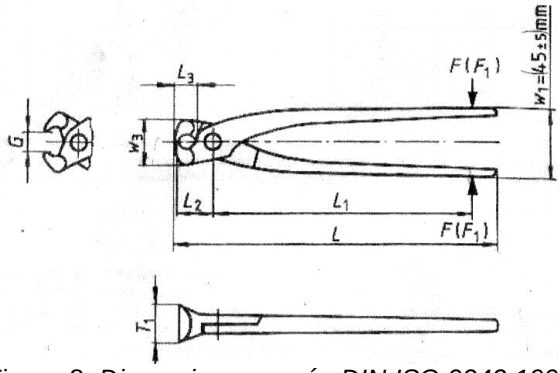


Figura 8: *Dimensiones según DIN ISO 9242:1994*

En la Tabla 2, se observan las distintas dimensiones estándar de pinzas y alicates y la fuerza máxima de corte ($F_{1, max}$) para un alambre de acero de dureza media y de diámetro 1,6mm.

Tabla 2: Tabla 4 de la *DIN ISO 9242:1994*

L	L_1	L_2	Ensayo de Corte	
			D	$F_{1, max}$
mm	mm	mm	mm	N
200	132	28	1,6	610
250	170	36	1,6	610
315	212	50	1,6	680
365	236	63	1,6	770

ISBN: 978-987-1676-63-7

Además, ambas normas establecen que para las herramientas que no se incluyan dentro de la tabla, la fuerza aplicada para el corte F_1' se calcula con la Ecuación (1).

$$F_1' = (F_2 \times 1{,}6 \times L_2') / L_1' \quad (1)$$

Donde:

- F_1': Fuerza de corte máxima calculada.
- F_2: Fuerza de corte para un alambre de dureza media, de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 3: Tabla 1 de la *ISO 5744:2004(E)*

Table 1 — Medium hard test wire

Nominal wire diameter d mm	Approximate tensile strength[a] MPa	Cutting force F_2 N
1,6	1 600	1 800 ± 90

[a] The tensile strength is given for guidance only.

- 1,6: Factor de corrección para alambre de dureza media.
- L_2': Distancia entre remache y filo de corte. Para nuestra MUESTRA, la misma es de 36mm.
- L_1': Distancia entre el remache y el punto de aplicación de la carga. Puesto que la MUESTRA no coincide dimensionalmente con las pinzas tabuladas (ver Tabla 2), se tomó L_1=170mm (L_1 tabulado para una tenaza estándar con L_2 = 36 mm). Para este caso, L_1'=171mm (medido con la MUESTRA montada en la máquina universal).

Entonces, utilizando los datos anteriores, se obtiene la carga máxima de corte calculada:

$$F_{1,\,máx}' = (1800 \times 1{,}6 \times 36) / 171 = 606{,}3\ [N] \quad (1a)$$

La carga que registró la Máquina Universal de Ensayos al cortar el alambre fue F_1' = 117 N, menor que la máxima calculada. En la Tabla 4 se resume la información obtenida de la experiencia del Ensayo de Corte.

Tabla 4: Resultados obtenidos en ensayo de corte

MUESTRA	**HORSE NIPPER**
$F_{1,\,máx}$'	**606,3 N**
F_1'	**117 N**
OBSERVACIONES	**NO PRESENTA DAÑOS EN LOS FILOS DE CORTE**

ISBN: 978-987-1676-63-7

2.4.2. Cálculo de la deformación permanente

Para la determinación de la deformación permanente, se montó la Muestra en la Máquina Universal de Ensayos como se muestra en la Figura 4 y se aplicó el método de ensayo indicado en la Norma ISO 5744:2004(E), Inc. 4.2. para Muestra del tipo “End Cutting Nippers”, el cual establece:

1. Aplicar una carga de 50 N y medir “w_1”, a una distancia especificada de la articulación.
2. Aumentar la carga al valor F especificado en las tablas para productos estándar, y descargar nuevamente hasta 50 N.
3. Repetir el paso anterior 4 veces, y medir “w_2”, a la misma distancia en que se midió “w_1”.
4. Calcular la deformación permanente “s” según Ecuación (2), la cual no deberá exceder el valor establecido por la norma.

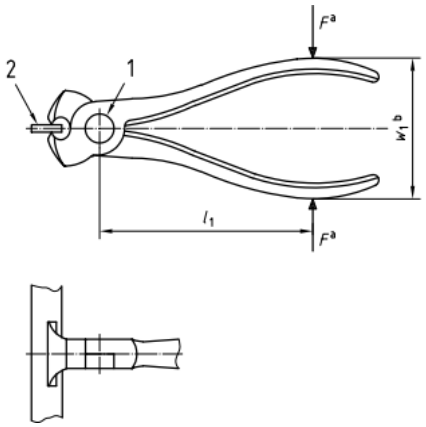
$$s = w_1 - w_2 \tag{2}$$

Al igual que en el ensayo de corte, DIN ISO 9242:1994 tabula para distintas dimensiones de pinzas y alicates la fuerza a aplicar, y la deformación máxima permitida “s_{max}”. Ver Tabla 5.

Tabla 5: Tabla 4 de la DIN ISO 9242:1994

L	L_1	L_2	Ensayo de Carga	
			F	s_{max}
mm	mm	mm	N	mm
200	132	28	755	1,4
250	170	36	950	1,8
315	212	50	1190	2,2
365	236	63	1325	2,5

Para este caso, se adoptó los valores de ensayo para la herramienta de igual distancia filo-articulación, que difiere en la longitud total. Se utiliza una “pieza de ensayo” con 30-40 HRC de dureza, de longitud tal que apoye 8 mm ± 1 mm en los filos de la herramienta. Ver Figura 9.



1: Articulación

2: Pieza de ensayo

Fa: Carga de ensayo

Figura 9: *Ensayo de Carga*

En la Tabla 6 se resume la información obtenida de la experiencia del Ensayo de Carga.

ISBN: 978-987-1676-63-7

Tabla 6: *Resultados obtenidos en ensayo de carga*

MUESTRA	**HORSE NIPPER**
CARGA INICIAL	**50 N**
CARGA TOTAL	**950 N**
w_1	**41,78 mm**
w_2	**41,34 mm**
s	**0,44 mm**

3. CONCLUSIONES.

Los resultados de los ensayos de control se resumen en la Tabla 7:

Tabla 7: Resumen de los resultados de los Ensayos de Control

ENSAYO	Valores obtenidos	Valores máximos (según Normas)	**RESULTADOS**	Observaciones
de Corte	117 N	606,3 N	**Satisfactorio**	No se observan daños en los filos de corte
de Carga	0,44 mm	1,8 mm	**Satisfactorio**	---

Se concluye entonces que la MUESTRA de la tenaza de desvasar tuvo resultados satisfactorios respecto a lo que establecen las normas de referencia adoptadas.

Además, se enfatiza que la confiabilidad de los resultados obtenidos a partir del método desarrollado para esta herramienta es producto de utilizar equipos e instrumentos calibrados con resolución adecuada para las magnitudes dadas y de adaptar correctamente la MUESTRA a las normativas existentes, desarrollando dispositivos que permitieron la correcta ubicación de las cargas para la realización de los ensayos.

4. REFERENCIAS.

[1] International Organization for Standardization – www.iso.org

[2] DIN ISO 9242:1994-09. Pliers and nippers - Construction worker's pincers - Dimensions and test values

[3] ISO 5744: 2004(E). Pliers and nippers - Methods of test

[4] Organismo Argentino de Acreditación – www.oaa.org.ar

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Ing. Fabián Nessier, de SNAE Argentina (BAHCO), por poner a disposición su conocimiento sobre la herramienta en cuestión y facilitar la misma para desarrollar el método expuesto.