

TRABAJOS

III CAIM 2012

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

Plaun, Leonardo
Trabajos CAIM 2012 : recursos energéticos . - 1a ed. - Buenos Aires
:Centro de Estudiantes de Ingeniería Tecnológica - CEIT, 2013.

E-Book. ISBN 978-987-1978-06-9

1. Ingeniería Mecánica. 2. Actas de Congresos. I. Título CDD 621

Fecha de catalogación: 06/06/2013

AREA TEMATICA D

**RECURSOS
ENERGETICOS**

III CAIM 2012
Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

XXV REUNIÓN
CIENTÍFICA
ACADÉMICA
del FoDAMI

D RECURSOS ENERGETICOS			
N	CODIGO	TITULO DEL TRABAJO	1er AUTOR
1	D- 001	PROPUESTA DE LA UTN.BA PARA LA CAPTACIÓN DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ	Pelissero, Mario
2	D- 004	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL USO DE PANELES FOTOVOLTAICOS EMPLEANDO ROBÓTICA PARALELA, PARA LA ALIMENTACIÓN DEL BLOQUE H DE LA UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO	Bermúdez, Andrés
3	D- 005	UNIDADE MODULAR INDUSTRIAL PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS", CÓDIGO	Brasil, Alex Nogueira
4	D- 006	USINA DIDÁTICA PARA SIMULAÇÃO INDUSTRIAL DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR IRRADIAÇÃO POR ULTRASSOM	Brasil, Alex Nogueira
5	D- 007	LA EFICIENCIA ENERGÉTICA COMO RECURSO ENERGÉTICO	Afranchi, Andrea
6	D- 008	IDENTIFICACION Y EVALUACION DEL POTENCIAL DE RECURSOS RENOVABLES EN EL ECUADOR Y SU VIABILIDAD DE DESARROLLO LOCAL	Peralta, Juan
7	D- 010	APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO SOLAR MEDIANTE ENVOLVENTE DE PLANOS ESPEJADOS	Masat, Sergio
8	D- 011	DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA CALDERA SOLAR AUTÓNOMA PARA USO DOMICILIARIO	Zambrano, Daniel
9	D- 012	DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA Y UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA PARABOLA DE USO SOLAR	Zambrano, Daniel
10	D- 014	ESCALADO DE MODELOS DE CONVERTORES DE ENERGÍA OCEÁNICA	Labriola, Carlos
11	D- 016	FORMA ALTERNATIVA DE GENERACIÓN POR GASIFICACIÓN POR ARCO DE PLASMA DE RESIDUOS URBANOS	Bussolini, Ignacio
12	D- 018	EVALUACIÓN DE LA COSECHA DE MICROALGAS CON MIRAS A LA EXTRACCION DE ACEITE PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL, A PARTIR DEL MÉTODO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN	Avila, Adrian
13	D- 019	EVALUACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL MANGO TOMMY ATKINS	Mendoza, Jorge
14	D- 020	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MOTOR STIRLING DE BAJA TEMPERATURA	Dietz, Rodrigo
15	D- 021	BANCO DE ENSAYOS PARA CONVERTORES DE ENERGÍAS MAREOMOTRIZ Y UNDIMOTRIZ	Labriola, Carlos
16	D- 023	ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE POTENCIA DE LOS ÓRGANOS MECÁNICOS QUE CONFORMAN UN CICLO RANKINE ORGÁNICO DE PEQUEÑA ESCALA	Gomez Khairallah, Anibal
17	D- 024	ENSAYO DE ROTORES EÓLICOS EN PEQUEÑA ESCALA	Gagliano, F
18	D- 028	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TERMO-ENERGÉTICO DE UNA VIVIENDA SOCIAL EN LA CIUDAD DE CORRIENTES A TRAVÉS DE MONITOREO EXPERIMENTAL Y PROGRAMAS SIMULADORES	Gallipoliti, Virginia

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



Propuesta de la UTN.FRBA para la captación de la energía undimotriz

Pelissero Mario*, Haim Alejandro*, Oliveto Guillermo, Galia Francisco, Plaun Leonardo, Rodolfo Alessio, Suppo Germán, Gagnieri Diego, Muiño Federico, Tula Roberto, De Vita Gustavo, Heinke Ezequiel y Ben Patricio

Departamento de Ingeniería Mecánica - Facultad Regional Buenos Aires

Universidad Tecnológica Nacional

Av. Medrano 951 – 3° piso – Of. 303 – C1179AAQ

Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina

Tel/Fax: +54-011-4867-7574 - E-mail: undimotriz@gmail.com

Web: <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz>

RESUMEN

El grupo de investigadores, docentes y alumnos de la UTN.FRBA integrantes del Proyecto "Aprovechamiento de la Energía Undimotriz" quieren dar a conocer la posibilidad de este recurso y el dispositivo que están desarrollando.

Establecimos una extensa actividad de difusión de esa temática en congresos, medios gráficos, televisivos e internet; además creamos una página web al respecto. Solo a partir de casi tres años de experimentación y desarrollo se pudo presentar y esta en vías de su estudio y aprobación en el INPI de la patente del sistema de captación de la energía undimotriz y su transformación en energía mecánica. Patente N° 20110103542 del 27/09/11 Esta solicitud se basa en una cadena cinemática que capta el movimiento ascendente y descendente de las boyas y lo traslada a un eje de movimiento regular constante conectado a un generador de energía eléctrica.

Se construyeron en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Mecánica los prototipos en una escala de 1:20 y se hicieron ensayos funcionales de la cadena cinemática, se verificó mediante el movimiento de los brazos la generación de una corriente eléctrica continua que nos permitió mantener encendida una lámpara de bajo consumo. Realizamos los contactos con el INA y la FIUBA para realizar los ensayos de los prototipos en sus respectivos canales de ensayos.

Las posibilidades que presenta este recurso en nuestro país son mundialmente reconocidas, hemos reconocido que algunas caletas del Golfo San Julián presentan condiciones ideales para este propósito.

Conclusión: tanto en España como en Portugal se produjo la puesta en servicio de las dos plantas comerciales de energía eléctrica a partir del recurso undimotriz, esto nos dice que es factible su aprovechamiento y los resultados obtenidos por este grupo de investigación aparecen como una posibilidad concreta para generar otra alternativa tecnológica para su captación.

Palabras Claves: Energía, Renovable, Undimotriz, Sustentable, Alternativa.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



1. INTRODUCCIÓN

En un mundo con una población en constante crecimiento con una demanda cada día más grande de energía se hace indispensable pensar que las fuentes tradicionales de energía como el carbón, petróleo y gas se irán agotando y que si no pensamos en nuevas alternativas el futuro será muy dramático.

En los estudios de los aprovechamientos de las energías renovables en general el foco siempre está en la relación agua-energía, el agua es un extraordinario vector energético por su capacidad de acumulación y transporte de la energía, esto nos lleva a considerar una de las fuentes de mayor potencial y presencia que tenemos en nuestro planeta, los mares.

La potencialidad de la energía del mar se encuentra radicada en su abundancia; sabemos que las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta están cubiertas por el mar; por lo tanto los mares se transforman en inmensos colectores que recogen diariamente una extraordinaria cantidad de energía proveniente del sol.

La clave de esto es que debemos entender al mar, se trata tan solo aprovechar una porción de su energía y el resto será para el deleite de la humanidad, dominar el mar es imposible pues siempre será más poderoso que nosotros. Una de las principales ventajas de la energía undimotriz es que es un recurso renovable, abundante y no genera ninguna contaminación durante su aprovechamiento.

La energía undimotriz tiene características propias que no deben confundirse con las otras energías oceánicas como la energía mareomotriz o la energía de las corrientes marinas. La energía undimotriz es el resultado simbiótico entre el mar y el viento; el mar como soporte y al viento como motor.

La energía undimotriz se debe considerar como derivada de la energía eólica pues es el viento quien cede a la superficie oceánica parte de energía creando las ondas; su importancia es tal que supera en densidad energética a la energía eólica y solar, se calcula que su potencia oscila entre 40 a 100 kW [1] por cada metro de frente de onda y además mantiene su constancia durante casi todo el día a lo largo de todo el año siendo esta característica lo que le da ventaja respecto de otras energías renovables.

En los inicios del proyecto no dudamos en consultar bibliografía de proyectos similares que se están estudiando en otros países pero nuestra intención no fue la de reproducir esos modelos sino la de generar una propuesta afín a nuestra geografía y necesidades.

Nos planteamos conformar un grupo de profesionales capaces de generar un proyecto confiable y consistente con identidad propia que refleje nuestra realidad sobre la base de nuestra capacidad intelectual y la mano de obra de nuestro país.

1.1 Fuentes oceánicas de energías

Una de las tecnologías más conocidas es la denominada energía mareomotriz, que está vinculada al aprovechamiento de la amplitud en los niveles de las mareas, sin embargo, el impacto ambiental que produce ha generado un total rechazo a su implementación. Otras alternativas en vías de estudio concreto lo representan el aprovechamiento de las corrientes marinas que junto con el aprovechamiento de la energía undimotriz están marcando un camino al respecto.

Algunas alternativas más exóticas lo representan el aprovechamiento del gradiente salino en los estuarios donde se mezcla el agua dulce con el agua de mar, la energía geotérmica submarina originada por las formaciones volcánicas sumergidas, los yacimientos de hidratos de carbono originados a partir de la descomposición de la flora y fauna marina y finalmente la energía maremotérmica, es decir aquella que se basa en la diferencia de temperatura entre el agua superficial y el agua del lecho marino.

El aprovechamiento de la energía undimotriz es uno de los planteos más jóvenes al respecto aunque se mencionan ejemplos de su aprovechamiento a principios del siglo XX, los datos recabados recientemente nos indican que el potencial es enorme; cabe señalar que existen interesantes experiencias en muchos países, donde existe una cantidad importante de dispositivos en fase experimental y algunos pocos se encuentran en fase de explotación comercial; tal el caso del sistema Pelamis o sea la captación mediante un dispositivo hidráulico oceánico en Portugal y el sistema de columna oscilante de agua denominado Mutriku en España.

Las posibilidades que nos brinda el mar son muchas, debemos tomar conciencia que el mar es una fuente extraordinaria de energía que no estamos aprovechando actualmente en nuestro país.



Diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema de generación de energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos empleando robótica paralela, para la alimentación del Bloque H de la Universidad del Atlántico

Bermúdez, Andrés, Rivero, Alvaro*, Polanco, Tatiana, Pastor, Fernando.

*Universidad del Atlántico, Facultad de Ingeniería.
081007 Km 7 Antigua Vía Puerto Colombia. Barranquilla, Colombia.
rivero90@hotmail.com*

RESUMEN.

El proyecto surge como una necesidad de reducir gasto energético en el Bloque H de la Universidad del Atlántico, pero luego la parte medioambiental comenzó a ser igual o quizás más importante que la primera iniciativa.

Previos estudios muestran a la energía solar como posible solución, con un valor agregado que ayudará que ésta sea más eficiente, la robótica paralela; planteada la idea, se comenzó con un censo de energía eléctrica en la edificación, luego se pasa a la fase de estudios estructurales en la azotea, paralelamente a esto, gracias a la asesoría de expertos, fue posible determinar la trayectoria del sol con respecto a la futura zona de paneles y la mejor forma de programar una tarjeta electrónica capaz de controlar las estructuras.

Finalmente, terminado el diseño del sistema, se procederá a la construcción y puesta en marcha; gracias a la implementación de ésta tecnología se garantizará un buen uso de recursos energéticos y la sociedad tendrá la oportunidad de apreciar los beneficios y gracias a esto habrá conciencia del cuidado que se debe tener con el medio ambiente.

Palabras Claves: recurso, hexápodo, amortización.

1. INTRODUCCIÓN

El uso racional de los recursos naturales y energéticos, la importancia de una estructura de desarrollo sostenible para la sociedad, la necesidad de detener o al menos tratar de sobrellevar el proceso del calentamiento global y el cambio climático, así como la toma de conciencia de la humanidad en reconocer, reflexionar y entender que todos hacemos parte de un mismo planeta, han influenciado de una u otra forma a que cada acción, en materia energética, esté encaminada al logro de la eficiencia.

Esto representa alcanzar los resultados requeridos con los menores costos energéticos posibles y el menor impacto ambiental.

2. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar, construir e implementar un sistema de generación de energía eléctrica mediante el uso de paneles fotovoltaicos para la alimentación del Bloque H de la Universidad del Atlántico.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estudio de factibilidad y viabilidad de la instalación.
- Determinar la cantidad de energía irradiada por el sol anualmente en el área.
- Maximizar la eficiencia de los paneles mediante el diseño de un sistema de seguimiento solar.
- Disminuir el impacto ambiental generado por el edificio.
- Reducir los costos de energía eléctrica en la edificación.
- Entrar en el proceso de certificación LEED.
- Crear conciencia en la comunidad de que si se puede salvar nuestro planeta.

4. ANTECEDENTES

[1] Un robot paralelo es aquel cuya estructura mecánica está constituida por un mecanismo de cadena cerrada en el que el efector final se acopla a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes.



Figura 1 *Mecanismo posicionador de antenas parabólicas*

Los robots paralelos simplifican estas cadenas de forma que cada una de ellas dispone, en general de un único actuador, reduciendo así su complejidad y permitiendo canalizar mejor la energía de los accionadores hacia mejorar las prestaciones del robot, bien en cuanto a velocidad de movimiento o a capacidad de carga de su efector.

La figura 1 muestra una estructura como las referidas destinada al posicionamiento de antenas. El movimiento de la misma se consigue variando la longitud de los accionadores lineales que la soportan.

4.1. Orígenes de los robots paralelos

Los primeros trabajos teóricos relacionados con las estructuras mecánicas paralelas aparecieron ya hace siglos, antes de que se empezara a hablar de robots, cuando los primeros geómetras franceses e ingleses realizaron sus estudios sobre los poliedros y sus aplicaciones. Ya en la época más actual, el primer mecanismo paralelo fue patentado en el año 1931 (US Patent No 1,789,680). Se trataba de una plataforma de movimiento destinada a la industria del entretenimiento (Figura 2) diseñada por James E. Gwinnett, (Gwinnett, 1931). Desgraciadamente el mecanismo diseñado por este ilustre visionario no fue nunca construido.

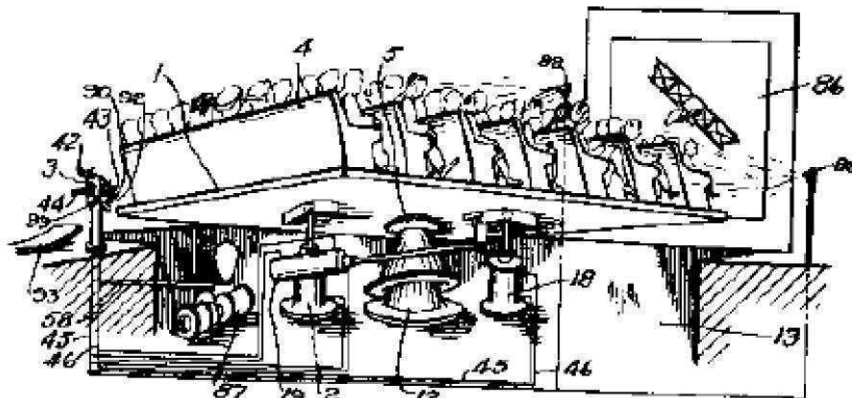


Figura 2 Posiblemente el primer mecanismo espacial paralelo

No hubo que esperar mucho más para que el primer diseño de robot industrial paralelo apareciera (US Patent No 2,286,571). En 1940, tan solo diecinueve años después de que Karel Kapek acuñara el término "robot", Willard L.V. Pollard presentaba un ingenioso robot de 5 grados de libertad destinado a operaciones de pintura con spray. El robot consistía en tres brazos de dos eslabones cada uno. Los eslabones estaban unidos mediante juntas universales. Los tres actuadores de la base comandaban la posición de la herramienta, mientras que la orientación era proporcionada por otros dos actuadores situados en la base y que transmitían el movimiento a la herramienta mediante la rotación proporcionada a unos cables flexibles (Figura 3).



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

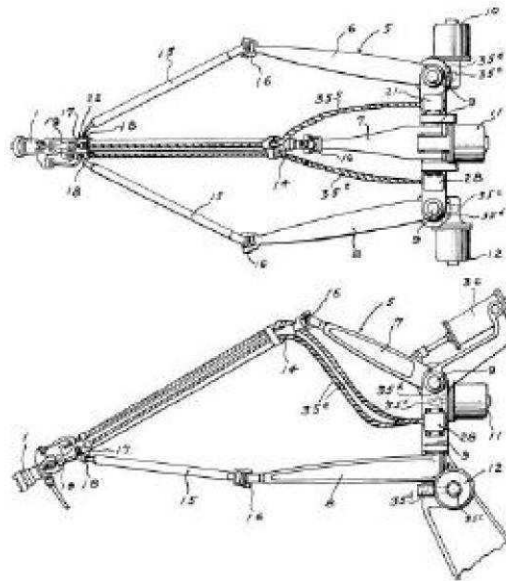


Figura 3 Primer robot industrial paralelo

Sin embargo, han sido otros mecanismos paralelos los que han logrado un mayor reconocimiento general y han contribuido a la aparición de un mayor número de publicaciones sobre la robótica paralela. Por estricto orden temporal, fue el Dr. Eric Gough quien en 1947 inventó la plataforma paralela más popular de todas. El Dr. Gough diseñó un octaedro hexápodo con lados de longitud variable (Figura 4) como plataforma para la comprobación del comportamiento de los neumáticos de la casa Dunlop (para la cual trabajaba) bajo cargas aplicadas en diferentes ejes. De esta forma, intentaba simular el proceso de aterrizaje de un avión. En la actualidad existen multitud de plataformas basadas en este diseño en numerosas empresas, y se conocen bajo el nombre de MAST (Multi-Axis Simulation Table).

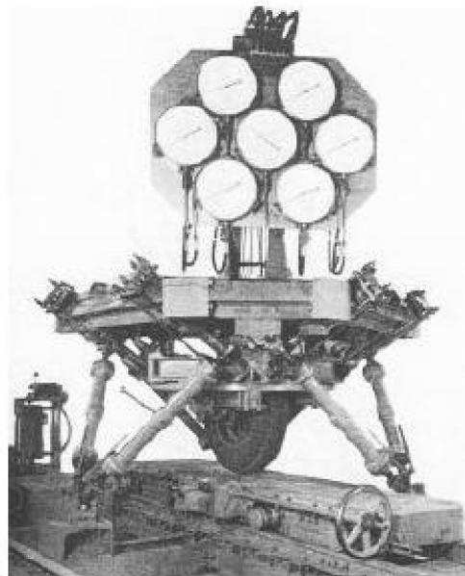


Figura 4 La primera plataforma de Gough

Ya en 1965, Mr. Stewart, (Stewart, 1965) presentó un artículo en el que describía una plataforma de movimiento de 6 grados de libertad destinada a trabajar como simulador de vuelo. Contrariamente a

la creencia general, el mecanismo de Stewart (Figura 5) es diferente al presentado por Gough. El artículo de Stewart tuvo y tiene una gran influencia en el mundo académico y se considera como uno de los primeros trabajos de análisis de plataformas paralelas.

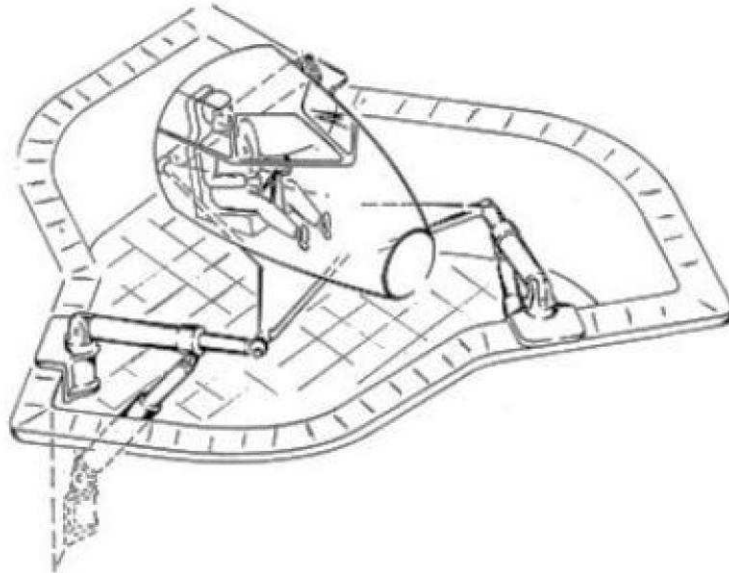


Figura 5 La primera y única plataforma de Stewart

Paralelamente, el ingeniero Klaus Cappel realizaba en el Franklin Institute Research Laboratory numerosas investigaciones con plataformas paralelas de 6 grados de libertad. En 1967 Mr. Cappel (Cappel, 1967) patentaba un simulador de movimiento basado en un hexápodo, y construyó varias de sus invenciones (Figura 6).

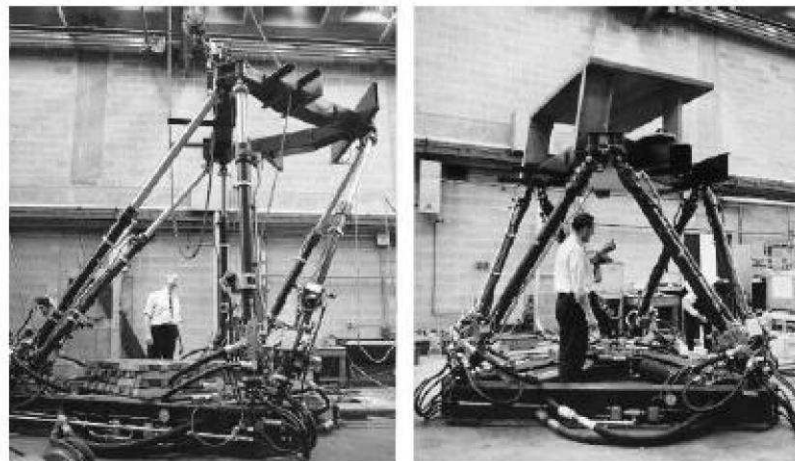


Figura 6 Simulador de movimiento de Klaus Cappel. Construido durante los años 60

Más tarde en 1978, Hunt (Hunt, 1978) sugirió que se usaran los mecanismos actuados de forma paralela de los simuladores de vuelo, como robots manipuladores y destacó que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Además de la excelente relación carga admisible/peso propio, los robots paralelos presentan otras características interesantes. En 1979, McCallion y Pham (McCallion and Pham, 1979) fueron los primeros que propusieron usar la plataforma de Stewart como un manipulador paralelo para una célula de ensamblaje robotizada, fundamentalmente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares de los robots en serie. La gran rigidez asegura que las deformaciones de los actuadores sean mínimas y esta característica contribuye en gran manera a la precisión en el posicionamiento del manipulador. ^[1]

^[2]En octubre de 1973, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), por motivos políticos más que por razones de estructura de costos, decidió incrementar el precio de este insumo desde 1.6 dólares el barril a casi 10 dólares, lo que originó una gran crisis económica a nivel mundial que produjo inflación y recesión en todos los países, principalmente en los importadores de petróleo. Tal crisis obligó a los países desarrollados a reflexionar sobre la posibilidad de sustituir al petróleo con otras fuentes de energía, ya que no querían depender de este vital insumo debido a que la mayor parte de las reservas mundiales se encontraban en el golfo arábigo. Los países desarrollados analizaron diferentes alternativas energéticas con el objetivo de diversificar sus fuentes de suministro energético. Entre ellas estuvieron la utilización de las energías renovables como la solar y la eólica, la energía nuclear, y la implementación de programas de ahorro de energía.

En la década del 80, como consecuencia de la intensificación de la internacionalización de la economía, los países repararon que, para ser más competitivos en los diferentes mercados, tenían que reducir sus costos de producción, entre ellos sus costos energéticos. Este fue otro de los factores que impulsó el desarrollo de este tipo de programas en esa década, pues la competitividad se había convertido en la piedra angular para conquistar otros mercados. La década del 90 estuvo marcada por la detección de una crisis ecológica, por lo tanto los científicos ya venían advirtiendo que el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera se estaba incrementando de manera importante y pronosticaban que se produciría el calentamiento de la tierra. Diferentes mediciones han demostrado efectivamente que durante el presente siglo la presencia de este gas en la atmósfera ha crecido significativamente, lo que ha dado origen a que la temperatura de la Tierra aumente en aproximadamente 0,5 grados. Si esa tendencia siguiera y no se adoptaran medidas para evitarla en los próximos 50 años, se pronostica que la temperatura podría incrementarse en 2 grados centígrados más. ^[2]

5. METODOLOGÍA

Inicialmente, se hizo un censo de carga eléctrica del Bloque H, con la colaboración del grupo de investigación Kaí, el cual es el encargado del área del uso eficiente de la energía; gracias a la asesoría prestada por el semillero, fue posible establecer los pasos para hacer dicho registro, en el cual se hizo énfasis en las luminarias, ya que los paneles solares cubrirán ésta demanda y disminuirá con esto el consumo eléctrico del edificio. Gracias a estudios previos se pudo establecer que la iluminación representa cerca del 10 % del requerimiento de energía eléctrica.

Gracias a previos estudios arquitectónicos, se pudo establecer que la azotea es apta para la instalación de paneles solares; permitiendo el establecimiento de hasta 247 paneles aproximadamente si así se requiere.

El número de paneles que pueden ser localizados en un área rectangular, teniendo en cuenta la sombra que produce cada panel, puede ser calculado mediante la Ecuación (1).

$$n(L_p + S_p) = A$$

$$c(A_p + d_p) = L$$

$$N = n * c$$

(1)

En donde:

L_p = longitud del panel

A_p = ancho del panel

d_p = distancia entre paneles para evitar sombreado

S_p = Separación entre paneles para facilitar mantenimiento **A**
= ancho total disponible en la sección rectangular

L = longitud total disponible en la sección rectangular **n**

= número de paneles a lo ancho del edificio

c = número de paneles a lo largo del edificio

N = número total de paneles que pueden disponerse en la sección rectangular

Todo lo anterior puede representarse en la figura 7:

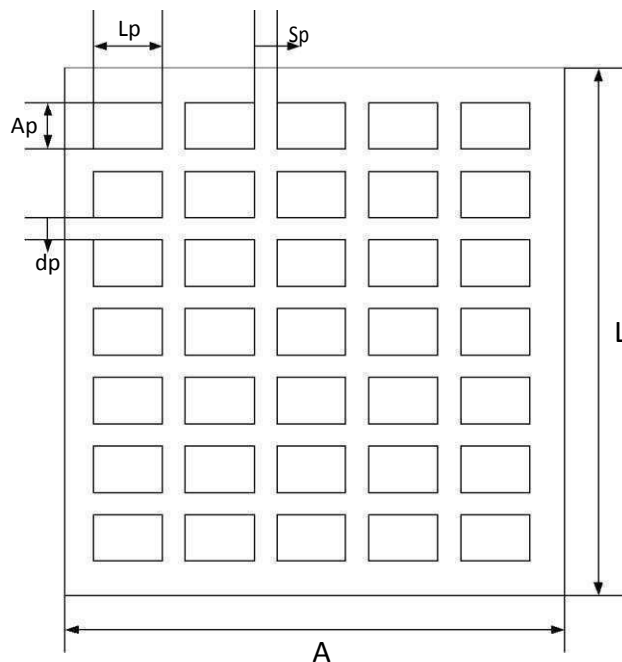


Figura 7 Representación de instalación de paneles

La azotea del edificio puede dividirse en tres secciones (S1, S2 y S3) rectangulares como se muestra en la figura 8, con sus respectivas dimensiones.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

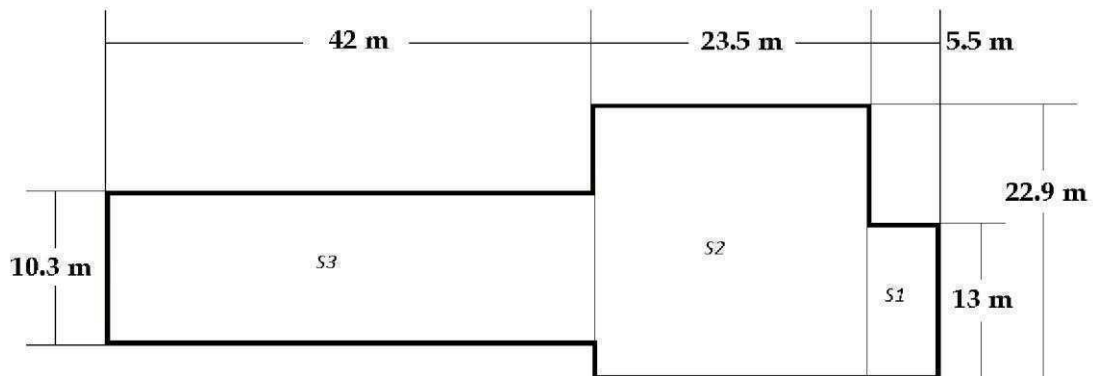


Figura 8 Vista superior del Bloque H

Se contó con la asesoría de un experto en instalación de paneles solares egresado de la universidad del Atlántico e instructor del Centro de aprendizaje Nacional (SENA); el cual sirvió como guía académico, mostrando cada uno de los detalles a tener en cuenta a la hora de la implementación de éste sistema, partiendo desde la identificación de cada equipo, siguiendo por el manejo de la carta solar, la cual permite seguir el comportamiento solar durante un año, que es fundamental para el proyecto, pues dará pautas para la programación de las tarjetas electrónicas que controlarán la estructura sobre la que irá cada panel, obviando de esta forma la utilización de cualquier clase de sensor.

^[3]La caracterización de la energía transportada por la luz solar que incide en el Bloque H, es uno de los ítems a tener en cuenta en éste proyecto. La potencia que proviene del sol se puede medir como una función de la posición y del tiempo, calculada en la azotea del Bloque H, Ecuación (2).

$$\begin{aligned}
 &u: R^2 \times R \rightarrow R \\
 &((x, y), t) \rightarrow u((x, y), t)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

u : Potencia por unidad de área proveniente del sol (Función de Insolación)

Para tal motivo, se imagina sobre la azotea del bloque un enmallado (Figura 9) de forma tal que sea posible la utilización de un sistema de coordenadas cartesianas $(x - y)$, que permita la ubicación de cualquier punto sobre la superficie superior del edificio.

En el caso de que no existan nubes ni ningún tipo de sombreado, el valor de la función de insolación será constante y no dependerá de la posición del edificio desde la que se mida, sino que dependerá solo del tiempo y de la posición del Sol con respecto a la Tierra. Resolviendo se tiene la Ecuación (3).

$$u = a(\theta(t))
 \tag{3}$$

En donde

θ = Ángulo de elevación del Sol

El ángulo de inclinación está dado por la Ecuación (4).



$$\sin \theta(t) = \cos h \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (4)$$

En donde:

θ = ángulo de elevación del Sol

h = es el ángulo horario

δ = declinación solar actual (ángulo del sol con respecto a la eclíptica)

φ = latitud local

El valor de la declinación solar puede calcularse mediante la siguiente Ecuación (5).

$$\delta = 23.44^\circ \sin \left[\frac{360^\circ}{365} (t + 284) \right] \quad (5)$$

El intervalo de tiempo para el cual se define la función es el siguiente:

$$0 < t < 365 \text{ días}$$

El valor de t representa la cantidad de días que han pasado desde el comienzo del año, por tanto

$$t_0 = 1 \text{ Enero a las } 12:00 \text{ AM} = 1$$

$$t_f = 31 \text{ de Diciembre a las } 11:59:59 \text{ PM} = 365$$

Para determinar el ángulo horario se puede utilizar Ecuación (6).

$$h = \frac{\text{Hora solar} - 12}{15^\circ} \quad (6)$$

La energía total que llega a la tierra puede determinarse mediante la Ecuación (7).

$$u(t) = \int_{\text{Alba}}^{\text{Ocaso}} K \sin \theta(t) dt \quad (7)$$

En donde

K = constante solar = 1336 W/m^2

Una vez caracterizada la potencia proveniente del Sol y conociendo la potencia a suministrar al Bloque H, se puede realizar la selección de los paneles más adecuados para la instalación.

Una vez seleccionados los paneles y conocida su eficiencia, se procede a realizar el estudio financiero del proyecto, en donde se determinará el tiempo de amortización del proyecto.^[3]

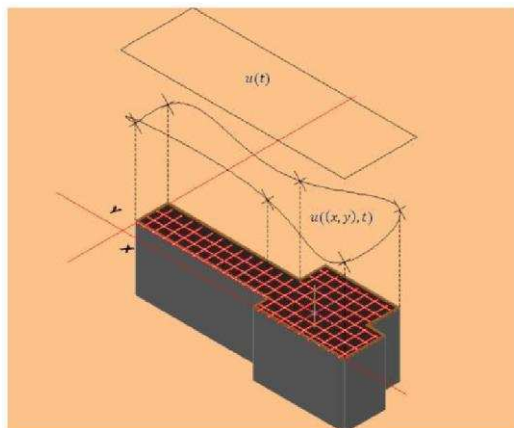


Figura 9 Enmallado Bloque H

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Se procedió a realizar un censo de energía eléctrica demandada por las luminarias de la edificación, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Censo de consumo de energía eléctrica en luminarias del Bloque H

ÁREA	CANTIDAD	TIPO DE LUMINARIA	CONSUMO EN WATTS	TIEMPO DE TRABAJO PROMEDIO HORAS/DÍA	TIEMPO DE TRABAJO PROMEDIO HORAS/MES	ENERGÍA CONSUMIDA PROMEDIO POR MES (W)
1er piso	116	CFL tubular T8 x 2 x 39	9048	5	85	769080
1er piso	8	CFL Lineal x 20	160	5	85	13600
2do Piso	131	CFL tubular T8 x 2 x 39	10218	6	102	1042236
2do Piso	8	CFL Lineal x 20	160	6	102	16320
3er Piso	131	CFL tubular T8 x 2 x 39	10218	6	102	1042236
3er Piso	8	CFL Lineal x 20	160	6	102	16320
4to Piso	127	CFL tubular T8 x 2 x 39	9906	7	119	1178814
4to Piso	8	CFL Lineal x 20	160	7	119	19040
5to Piso	136	CFL tubular T8 x 2 x 39	10608	5	85	901680
5to Piso	8	CFL Lineal x 20	160	5	85	13600
Total	681		50798	58	986	5012926

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Teniendo los datos anteriores, es posible establecer cuantos paneles, acumuladores, controladores e inversores se necesitarán en el Bloque H.

Hoy en día existe software lo suficientemente sofisticado para calcular de manera veraz los elementos a usar.

Gracias a la implementación del sistema fotovoltaico se reducirá un 23 % del consumo de energía eléctrica del Bloque H; también cuando el edificio carezca de energía ya no será necesario el uso de plantas eléctricas que necesitan de combustible fósil, contribuyendo al medio ambiente a lo que corresponde al ahorro energético y a la disminución de la contaminación atmosférica, lo cual evitará que progrese el calentamiento global de nuestro planeta.

Realizando una comparación con un censo de energía eléctrica realizado en una pequeña Isla de Costa Rica se tiene que:

^[4]En la tabla 3.1 se muestran los datos sobre los tipos y cantidad de cargas conectadas en la Isla, su potencia promedio, la potencia total demandada por el sistema y el consumo eléctrico diario aproximado calculado en base a una estimación de las horas de uso promedio de cada una de los aparatos. En la isla hay un aproximado de 130 casas.

Tabla 3.1 Cálculo del consumo eléctrico en la Isla

Carga	Cantidad	Potencia Promedio (W)	Potencia Total (W)	Horas Diarias de Uso	Consumo Diario Promedio (kWh/día)	Consumo Diario Máximo (kWh/día)	Consumo Diario Máximo + 30% (kWh/día)
Bombillo	100	20	2000	5	10	10	13
Televisores	45	100	4500	6	27	27	35,1
D.V.D	27	25	675	3 h, 4 veces/semana	1,08	2,025	2,6325
Radios	21	40	840	4	3,36	3,36	4,368
Celulares	100	13	1300	3 h, 3 veces/semana	1,56	3,9	5,07
Otros Componentes	3	200	600	2	1,2	1,2	1,56
		Total	9915		44,2	47,485	61,7305

El Consumo Diario Promedio corresponde al consumo mensual estimado promediado entre los 30 días. El Consumo Diario Máximo considera el caso en que todas las cargas, incluyendo las que no se usan todos los días (DVD y celulares), se conectan el mismo día la cantidad de horas promedio especificadas. Se considera además el caso en que el consumo diario aumenta en un 30%.^[4]

7. CONCLUSIONES.

Luego de realizado el trabajo se concluye que gracias a la robótica paralela, se puede hacer más eficiente los paneles solares, ya que la energía será recibida directamente durante las horas de sol, lo que garantiza que exista eficacia en la producción de energía eléctrica; también se puede decir que la energía solar, es una alternativa para salvar nuestro planeta y la utilización del sistema fotovoltaico contribuirá con la concientización de las personas de que hay de tener un mundo mejor a nuestra disposición.

8. REFERENCIAS.

[1] Aracil, Rafael; Saltarén, Roque; Sabater, José; Reinoso, Oscar. 2006. "Robots paralelos: máquinas con un pasado para una robótica del futuro". *Revista Iberoamericana de Automática e informática industrial. Volumen 3, ISSN: 1697-7912, páginas 16- 28.* Madrid, España.

[2] Manfre, Leonardo.2010. "*PLAN DE NEGOCIOS PARA EL ENSAMBLAJE, INSTALACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PANELES SOLARES COMO MÉTODO DE ENERGÍA ALTERNATIVA PARA EL ECUADOR*". Escuela Superior Politécnica del Litoral , *páginas 1- 2.*Guayaquil, Ecuador.

[3] Perpiñán, Oscar. 2012. "Energía solar fotovoltaica". Universidad Politécnica de Madrid. Páginas 7- 39. Madrid, España.

[4] Prado, Carlos. 2008. "Diseño de un sistema eléctrico fotovoltaico para una comunidad aislada". Universidad de Costa Rica. Página 67. San José, Costa Rica.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer primero que todo a Dios, pues nos ha guiado por el camino ideal para lograr nuestra meta; a nuestras familias, ya que nos han brindado apoyo incondicional; al Ingeniero, Dairón Polo, por toda su colaboración en conocimiento e instalación de paneles solares; por supuesto, al grupo de investigación Kaí y semillero de Ingeniería Mecánica, por toda la asesoría prestada y finalmente a nuestra alma mater por brindarnos la oportunidad de formarnos como ciudadanos contribuyentes a la sociedad y medio ambiente.

Código D-004

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UNIDADE MODULAR INDUSTRIAL PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEOS E GORDURAS RESIDUAIS

Brasil, Alex Nogueira¹, Oliveira, Leandro Soares², França, Adriana Silva²

¹ UFMG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / Universidade de Itaúna.
Rodovia MG 431 - km 45 - Caixa Postal 100 - Itaúna/MG - CEP: 35.680-142.

brasil@uit.br.

² Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.
leandro@demec.ufmg.br

RESUMO

O biodiesel, pelo forte apelo socioambiental, tem assumido papel de grande relevância na busca por uma redução expressiva nas emissões dos gases de efeito estufa, particularmente agora que as evidências do aquecimento global vêm assumindo proporções alarmantes em várias regiões do planeta. A produção e comercialização de biodiesel têm crescido nos últimos anos tendo em vista os incentivos fiscais e regulatórios do Governo Federal, pela obrigatoriedade de sua adição ao diesel mineral. Inicialmente o foco industrial se manteve em grandes escalas de produção para fornecimento comercial, entretanto algumas ações tem se desenvolvido para viabilizar pequenas unidades produtoras. De forma análoga, a operação de usinas em pequena escala permite a utilização de resíduos de óleo vegetal e gordura hidrogenada oriundos de frituras, como matéria-prima para produção de biodiesel. Vários são os prejuízos causados pelo descarte incorreto dos óleos e gorduras residuais, dentre os quais podemos salientar: a poluição do solo e da água e o entupimento das tubulações da rede de esgoto. Tendo em vista o panorama de disponibilizar uma unidade produtora de biodiesel que atendesse a pequenas escalas de consumo, o presente trabalho visa discutir o projeto, construção e operação de uma usina modular para produção de biodiesel a partir de óleos residuais do processo de fritura de alimentos, utilizando irradiação por ultrassom na reação de transesterificação. O projeto tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento sustentável do processo de produção de biodiesel pela criação de tecnologias inovadoras. Envolve produção de biodiesel a partir de óleos e gorduras residuais, e desenvolve tecnologia para essa produção, utilizando irradiação por ultrassom, com o intuito de favorecer uma maior interação entre as fases e consequente aumento do rendimento, redução no tempo de reação e no consumo de reagentes e, por conseguinte, economia de energia.

Palavras Chaves: biodiesel, usina, óleos vegetais, gorduras residuais.



1. INTRODUÇÃO

Os maiores componentes de óleos vegetais e gorduras animais são os triacilgliceróis (TAG: muitas vezes chamados triglicerídeos). Quimicamente, os TAG são ésteres de ácidos graxos (AG) com glicerol (1,2,3-propanotriol; glicerol é muitas vezes chamado de glicerina). Os TAG de óleos vegetais e gordura animal contêm, tipicamente, diferentes tipos de AG. Assim, diferentes AG podem estar ligados à cadeia do glicerol. Os diferentes AG que estão contidos nos TAG revelam o perfil de AG (ou composição em AG) de óleos vegetais e gorduras animais. Como cada AG apresenta propriedades químicas peculiares, o perfil de AG é, provavelmente, o parâmetro de maior influência sobre as propriedades dos óleos vegetais e gorduras animais de onde se originam.

Para que o biodiesel seja produzido, óleos vegetais e gorduras animais são submetidos a uma reação química denominada transesterificação. Nesta reação, óleos e gorduras reagem na presença de um catalisador (usualmente uma base) com um álcool (usualmente metanol) para produzir os alquil ésteres correspondentes (para o caso do metanol, os ésteres metílicos) da mistura de AG que é encontrada no óleo vegetal ou na gordura animal.

O biodiesel pode ser produzido de uma grande variedade de matérias-primas. Estas matérias-primas incluem a maioria dos óleos vegetais e gorduras de origem animal, bem como óleos usados em processos de fritura de alimentos.

O biodiesel é miscível com o diesel de petróleo em qualquer proporção e, além de ser totalmente compatível com o diesel mineral em praticamente todas as suas propriedades, o biodiesel ainda apresenta várias vantagens adicionais em comparação com este combustível fóssil.

A usina modular proposta, pertencente ao campo dos equipamentos para produção de biodiesel, e foi desenvolvida para trabalhar com óleos vegetais residuais de processos de fritura de alimentos, álcoois etílico ou metílico anidro como reagente de processo e metilato de sódio 30% em metanol como catalisador.

Em vista ao exposto, o presente projeto, tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento sustentável do processo de produção de biodiesel pelo desenvolvimento de tecnologias inovadoras, envolvendo: produção de biodiesel a partir de óleos e gorduras residuais; desenvolvimento de tecnologia para produção de biodiesel utilizando irradiação por ultrassom, com o intuito de favorecer uma maior interação entre as fases e conseqüente aumento do rendimento, redução no tempo de reação e no consumo de reagentes e, por conseqüente, economia de energia.

O caráter modular, a utilização de óleos e gorduras de descarte como matéria prima para produção de biodiesel e a possibilidade de utilização de irradiação por ultrassom são os principais parâmetros inovadores conforme o estado da técnica em nível mundial. No quesito inovação, destacam-se: o projeto do reator para síntese de biodiesel por irradiação por ultrassom, os projetos do destilador de álcool e do módulo de pré-tratamento de óleos e gorduras residuais. Utiliza ainda processo de purificação a seco, "Dry Wash", por meio de resina polimérica de troca iônica, sem geração de água de lavagem residual, tão problemática nos processos convencionais de produção de biodiesel.

Diante de todo o exposto da técnica e fundamentos já existentes, constitui o objeto do projeto, o desenvolvimento de uma usina e processo para produção de biodiesel por irradiação por ultrassom, com ênfase em um processo de elevada sustentabilidade técnico-econômico-ambiental.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com foco no desenvolvimento sustentável a Usina Modular de Produção de Biodiesel, Fig. 1, foi projetada para trabalhar com qualquer tipo de oleaginosa incluindo os óleos oriundos de processos de cocção de alimentos. Os desenhos da planta modular foram realizados com auxílio do software SolidWorks 3D. Os álcoois etílico e metílico serão utilizados como reagentes no processo, dando prioridade ao etanol por ser oriundo de fontes renováveis e porque o Brasil possui grande disponibilidade deste insumo. Como catalisadores, tem-se a proposta de se trabalhar com metilato de sódio 30% em metanol.



Figura 1 Usina modular de produção de biodiesel.

Como motivação inicial, a utilização de resíduos como matéria prima para produção de biodiesel é um dos fatores inovadores em questão. Todo o processo produtivo, desde o pré-tratamento dos óleos e gorduras residuais, como a rota produtiva do biodiesel, tendo agregado o módulo de pré-tratamento de resíduos e a parte de armazenamento e tancagem. Adicionalmente, associou-se o módulo de produção de biodiesel contemplando os tanques, reatores, decantadores, destilador, colunas de purificação e demais equipamentos da usina.

No projeto da Usina Modular para Produção de Biodiesel foram considerados diversos fatores ligados diretamente com a parte técnica e econômica do processo de produção do biodiesel. Pesquisa da compatibilidade dos materiais utilizados nas tubulações, conexões, válvulas, confecção dos tanques e construção do reator de ultrassom.

A Figura 2 apresenta o fluxograma de processo da usina de biodiesel, identificando seus diversos equipamentos e etapas. A unidade de processamento e produção de biodiesel acima suscitada, possui capacidade nominal produtiva de 100 (cem) litros/hora operando em sistema semicontínuo.

De fácil instalação e operação, a Usina Modular de Produção de Biodiesel possui reservatórios e equipamentos construídos em aço inoxidável, adequado ao processo em questão. Para maior segurança, o sistema de aquecimento utiliza óleo térmico em reservatórios encamisados, evitando o contato dos reagentes com a resistência elétrica, mesmo que encapsulada.

Devido às características físico-químicas do biodiesel e seus reagentes, todos os reservatórios, equipamentos, tubulações, válvulas e acessórios foram projetados e desenvolvidos em aço inoxidável. As vedações especificadas e construídas em Viton[®] e mangueiras em material polimérico resistente ao biodiesel.

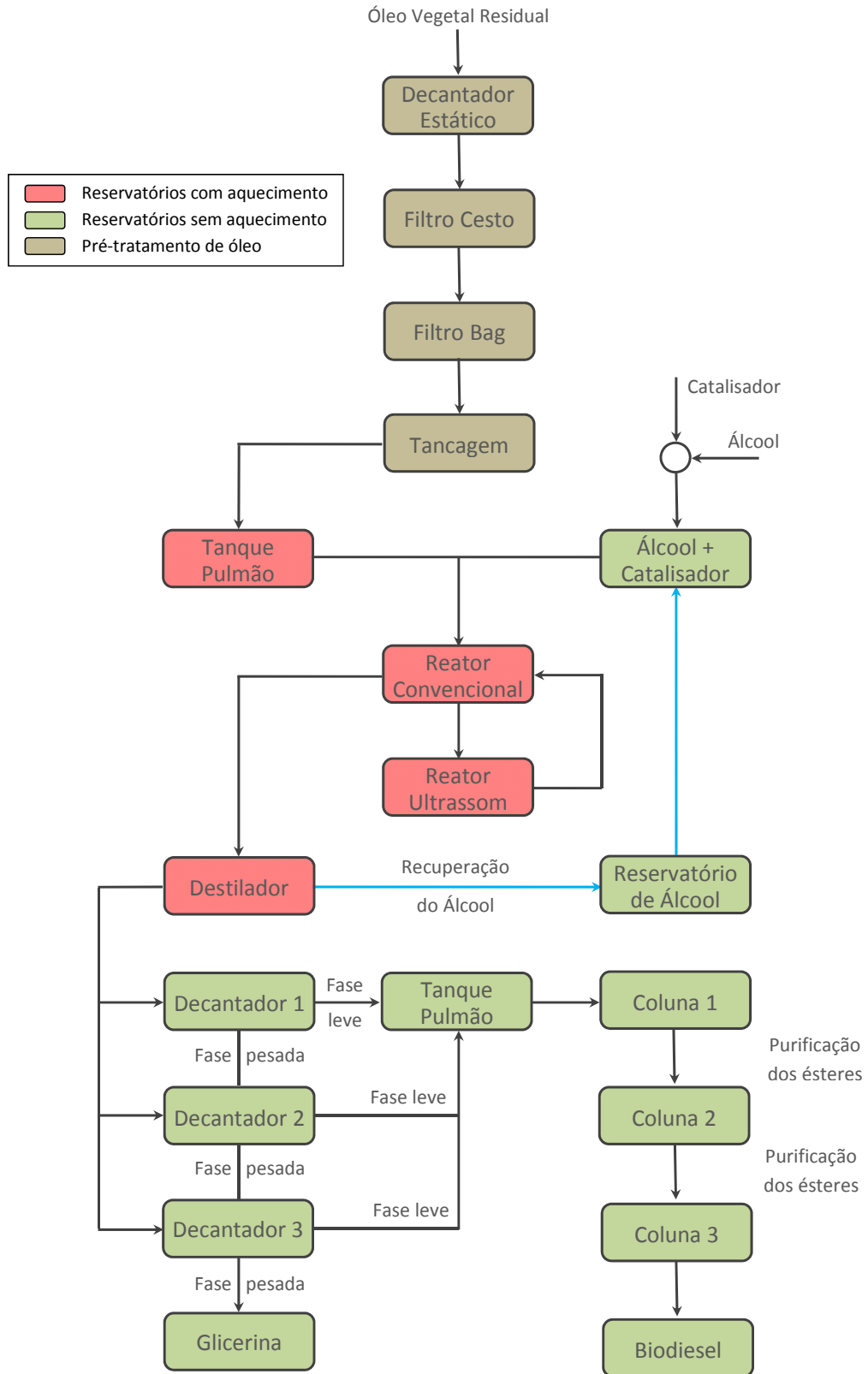


Figura 2 Fluxograma de processo da usina de biodiesel.

A Unidade de pré-tratamento, representada na Fig. 3, é formada por um conjunto composto por decantador estático para separação por gravidade dos particulados sólidos em suspensão, filtro tipo cesto e filtro tipo bag para purificação final, anterior ao processo de produção do biodiesel.

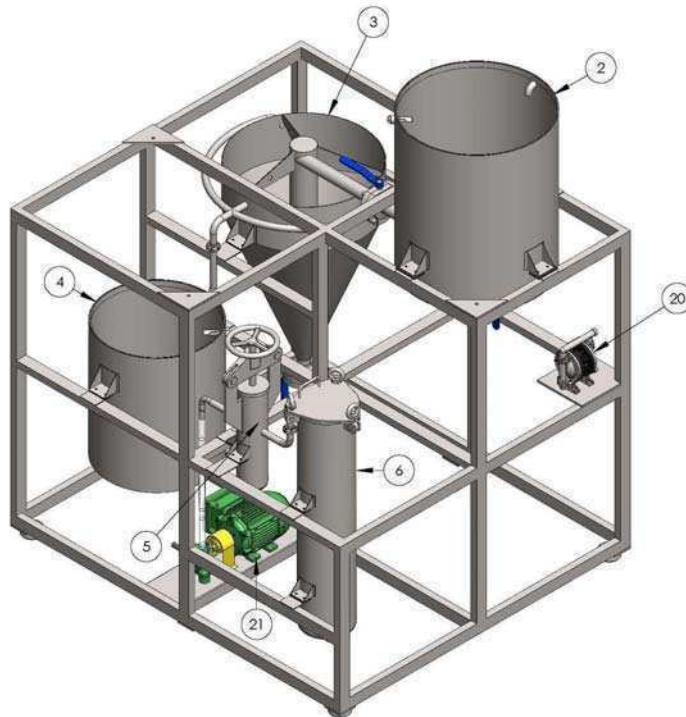


Figura 3 *Unidade de pré-tratamento de óleo residual.*

A unidade de pré-tratamento de óleo residual de fritura, com capacidade para 200 litros por hora, Fig. 3, é composta pelo conjunto de sistemas e equipamentos abaixo enumerados:

- (1) painel elétrico de controle central: permite o acionamento das bombas, motores, equipamentos e sistema de fluxo de ar comprimido e vácuo. Ativação do aquecimento do pulmão e destilador. Possui CLP (controlador lógico programável) e IHM (interface homem-máquina), que permitem o controle e acompanhamento de todos os parâmetros de processo. Por questões de segurança, possui botão de emergência para desligamento geral da usina;
- (2) pré-decantador: construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico e fundo cônico, permite o direcionamento do óleo por gravidade, em vazão contínua, para o decantador estático;
- (3) decantador estático: construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico e fundo cônico. Sistema de decantação por gravidade que permite a separação da fase leve por transbordo e direcionamento da mesma por gravidade para a próxima etapa de filtração;
- (4) tanque pulmão (filtração): construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico e fundo cônico. O óleo vegetal após decantação por gravidade é direcionado com auxílio de bomba de engrenagens para os filtros cesto e bag;
- (5) filtro cesto: o equipamento possui um cesto filtrante em chapa perfurada com furos de diâmetro igual a 3,2 mm, revestido internamente com tela metálica M60 em aço inoxidável AISI 304, oferecendo uma excelente combinação de alta eficiência e resistência mecânica;
- (6) filtro bag: o sistema de filtro possui um cesto filtrante em aço inoxidável para sustentação do bag e retenção de material particulado em óleo vegetal, com vazão de 0,2 m³/h.

As Figuras 4 e 5 representam o módulo de produção de biodiesel composto por: reator por agitação mecânica com motor à prova de explosão, reator por irradiação por ultrassom, decantadores para separação por gravidade das fases éster e glicerina em mistura, destilador para remoção e recuperação do álcool em excesso do processo, colunas de polimento a seco, reservatórios para armazenamento do álcool recuperado e do biodiesel produzido.

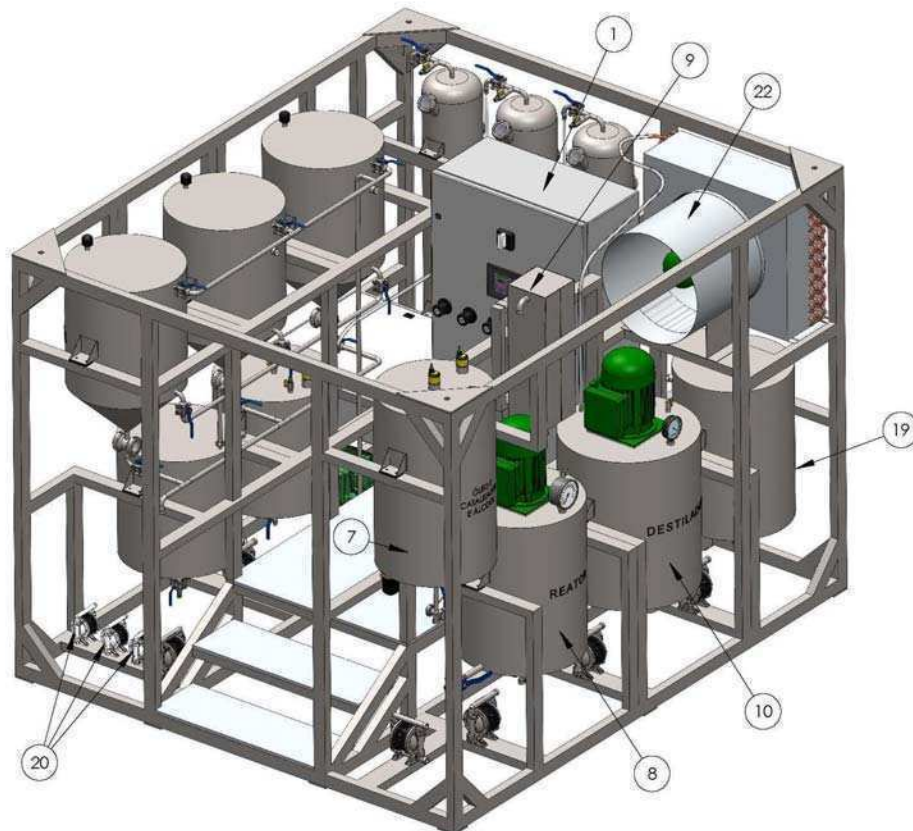


Figura 4 *Perspectiva isométrica do módulo de produção de biodiesel.*

O módulo de produção de biodiesel, com capacidade para 100 litros por hora, Figs. 3 e 4, é composto pelo conjunto de sistemas e equipamentos abaixo enumerados:

- (7) tanque pulmão (reação): construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico encamisado e fundo cônico. Sistema de aquecimento por resistência elétrica encapsulada para óleo, medição e controle de temperatura por termopar PT100 acoplado ao CLP. Os reagentes: óleo, álcool e catalisador são dosados por bomba de diafragma com auxílio de sensores de ultrassom;
- (8) reator convencional: de agitação mecânica, construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico encamisado, dotado de dificultores (quebra vórtice), fundo cônico raso e vedação em Viton® para isolamento da atmosfera externa. Agitação com hélice naval, impelida por motor à prova de explosão, adequado ao trabalho necessário;
- (9) reator de ultrassom: por irradiação por ultrassom e sistema de controle dos parâmetros da reação. Construído em aço inox, possui transdutores piezelétricos de baixa frequência (19 kHz);
- (10) destilador: para remoção e recuperação do álcool em excesso, apresenta sistema de aquecimento por resistência. Acoplado a esse, uma bomba de vácuo para remoção de ar da atmosfera de evaporação e redução do ponto de ebulição do álcool;

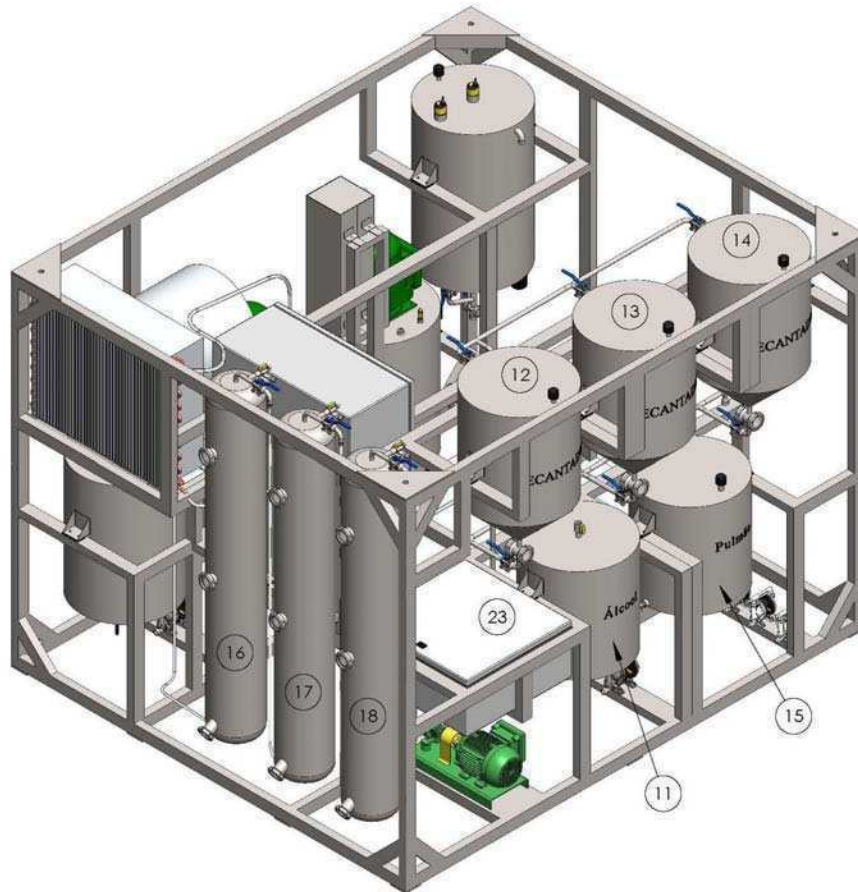


Figura 5 Perspectiva isométrica do módulo de produção de biodiesel.

- (11) reservatório de álcool recuperado: construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico e fundo cônico, destinado ao acondicionamento do álcool recuperado pelo destilador e condensado pelo trocador de calor;
- (12) primeiro decantador: para separação por gravidade das fases éster e glicerina em mistura, construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico;
- (13) segundo decantador: idem ao primeiro decantador, funcionando em paralelo com o mesmo;
- (14) terceiro decantador: idem ao primeiro decantador, funcionando em paralelo com o mesmo;
- (15) tanque pulmão (purificação): construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico e fundo cônico;
- (16) primeira coluna de polimento a seco: em tubo de aço inoxidável com visores devidamente posicionados para acompanhamento do processo de polimento e saturação da resina polimérica de troca iônica contida na mesma. A vazão do éster bruto nas colunas é contínua e o fluxo impulsionado por bomba de engrenagem com rotação controlada por inversor de frequência;
- (17) segunda coluna de polimento a seco: idem à primeira coluna, trabalha em série com a mesma;
- (18) terceira coluna de polimento a seco: idem à segunda coluna, trabalha em série com a mesma;
- (19) reservatório de biodiesel: construído em aço inoxidável de corpo cilíndrico e fundo cônico, destinado ao acondicionamento do biodiesel finalizado, oriundo das colunas de purificação. O biodiesel produzido passa por filtro industrial de pequena abertura para remoção de impurezas particuladas do fluxo de biodiesel;



- (20) bomba de diafragma: com corpo, diafragma e assentos confeccionados em materiais compatíveis com os reagentes de processo;
- (21) bomba de engrenagens internas: com corpo e cabeçote em ferro fundido, rotor, engrenagem interna e eixo em aço carbono. Possui selo mecânico com vedação em Viton[®] e motor elétrico à prova de explosão;
- (22) trocador de calor (condensador): formado por placas em alumínio interligadas por tubulação em cobre e sistema de ventilação forçada, tem como função condensar o vapor de álcool formado durante o processo de destilação e direcioná-lo para o reservatório de armazenamento de álcool recuperado;
- (23) painel pneumático: tem como função distribuir e controlar a vazão de ar comprimido e vácuo fornecidos às bombas de diafragma, “bomba” de vácuo e sistema de regeneração da resina polimérica de troca iônica;

Bomba de vácuo: destina-se a promover vácuo no reservatório de álcool e, conseqüentemente no destilador, de forma a diminuir a temperatura de ebulição do álcool e, desta forma, favorecer o processo de destilação.

Compressor de parafuso: destina-se a impulsionar ar para acionamento das bombas de diafragma e, como segunda função, retirar todo resíduo de álcool da resina contida nas colunas de purificação durante a regeneração da mesma.

Estrutura modular: confeccionada em perfil retangular de aço inoxidável para fixação dos reservatórios e equipamentos dos módulos de pré-tratamento de óleo residual e produção de biodiesel, utiliza niveladores mecânicos com regulagem de altura de 40 mm;

Dotada de plataforma de operação com acabamento do piso em chapa xadrez de alumínio ou aço inoxidável, permite a manipulação das válvulas e acessórios do segundo nível da usina. Possui, ainda, sistema para fixação dos olhais de içamento, utilizados para o levantamento da usina durante seu transporte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Usina de Produção de Biodiesel utiliza óleo vegetal *in natura* ou proveniente de processos de fritura de alimentos, desde que esta matéria-prima apresente uma acidez máxima de 3%.

Óleo vegetal residual quando coletado em estabelecimentos comerciais, carrega consigo particulados sólidos residuais dos processos de fritura de alimentos que precisam ser retirados antes de sua entrada na Unidade de Produção de Biodiesel. A Unidade de Pré-tratamento de Óleo, Fig. 3, tem como função retirar todo o particulado sólido residual do óleo de fritura, contaminantes e ainda corrigir a acidez caso esta se encontre acima de 1%.

A produção de biodiesel acontece mediante reação química, denominada transesterificação, que representa a conversão de triglicerídeos (óleos e gorduras) em ésteres (biodiesel).

A estequiometria apresenta o estudo e o cálculo das relações quantitativas dos reagentes na reação de transesterificação. A relação estequiométrica determina uma molécula de óleo para três moléculas de álcool (razão molar álcool:óleo igual a 3:1), considerando que a reação supracitada é reversível, utiliza-se 100% de excesso de álcool resultando em uma razão molar álcool:óleo de 6:1. A massa de catalisador é determinada como 0,6% da massa de óleo, considerando que o metilato de sódio está em solução de 30% em metanol teremos 2% de metilato de sódio em relação à massa de óleo.

O processo de produção de biodiesel, representado na Fig. 2, se dá por meio de: óleo vegetal residual, coletado e armazenado em bombonas, é direcionado com auxílio de bomba de diafragma para o pré-decantador. Em vazão contínua, controlada por válvula, este é encaminhado por gravidade para o decantador estático, de corpo cilíndrico e fundo cônico, para separação por gravidade dos particulados sólidos do óleo residual de fritura. Por transbordo, o óleo é direcionado do decantador estático para o tanque pulmão e, com auxílio de bomba de engrenagens, impulsionado através dos

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



filtros cesto e bag para purificação final. Caso a acidez do óleo esteja superior a 1%, este deverá passar por uma etapa de purificação com uso de adsorvente. Após o pré-tratamento, o óleo vegetal é bombeado para o contêiner de armazenamento de óleo purificado.

Óleo de fritura pré-tratado, oriundo do container é adicionado ao tanque pulmão sob aquecimento e recirculação. Tão logo o óleo atinge a temperatura de processo (60°C), este é bombeado para o primeiro reator. Álcool e catalisador são acrescentados e sob forte agitação mecânica, para forçar a mistura das fases, e controle de temperatura, a reação é desenvolvida. Esta mistura é então bombeada para o segundo reator onde ultrassom é irradiado para que a reação ocorra por completo e a conversão em éster mínima de 96,5% seja atingida.

Reagidos os insumos, tem-se biodiesel e glicerina, estes separarão após a etapa de destilação. Devido à considerável diferença de densidade, o processo pode ser realizado por decantação, com o auxílio da gravidade, buscando uma economia de energia e de espaço.

Por bombeamento, a mistura com excesso de álcool é direcionada ao destilador, um sistema de aquecimento por resistência elétrica encapsulada é acionado para evaporação do álcool adicionado em excesso na etapa de reação. Vácuo é adicionado ao sistema através de “bomba” de forma a retirar o oxigênio do destilador e reduzir a temperatura de ebulição do álcool, evitando assim, a oxidação e conseqüente degradação do biodiesel.

O excesso de álcool evaporado no destilador passa por um trocador de calor, condensa e é recuperado no reservatório de álcool, podendo ser reutilizado em processos posteriores.

Após a etapa de destilação, a mistura é direcionada por bomba ao primeiro, ao segundo ou ao terceiro decantador para realização da separação de fases por gravidade. A fração pesada, glicerina bruta, oriunda da etapa de separação de fases é direcionada por bomba de diafragma ao seu reservatório de destino. A fração leve, ésteres graxos, é direcionada por gravidade para o tanque pulmão que posteriormente é bombeada em vazão contínua, passando pelas colunas de polimento a seco, com auxílio de bomba de engrenagem controlada por inversor de frequência. O biodiesel bruto percola pela resina de troca iônica que retém todos os resíduos de glicerina, catalisador e sais da fração leve (ésteres graxos), obtendo um biodiesel com alta pureza, que é direcionado ao reservatório de biodiesel.

Dentre os avanços em processos de transesterificação por irradiação por ultrassom, observou-se efetivo aprimoramento no processo, seja do ponto de vista de graus de conversões, de redução de tempo reacional e de redução no consumo de energia, além disso, a unidade de produção tornou-se mais compacta.

4. REFERÊNCIAS

- [1] Brasil, Alex Nogueira; Oliveira, Leandro Soares; Kucek, Karla Thomas (2010). “Biodiesel Didactic Plant And Industrial Simulation”. *Congreso Mundial INGENIERIA 2010*. Buenos Aires, Argentina.
- [2] Brasil, Alex Nogueira; Oliveira, Leandro Soares; Nunes, Diego Luiz (2009). “Design and Operation of a Mobile Biodiesel Production Unit”. *2009 International Conference on Chemical, Biological & Environmental Engineering (CBEE 2009)*. Nanyang University, Singapore.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



USINA DIDÁTICA PARA SIMULACIÓN INDUSTRIAL DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL POR IRRADIACIÓN POR ULTRASSOM

Brasil, Alex Nogueira¹, Oliveira, Leandro Soares², França, Adriana Silva²

¹ UFMG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / Universidade de Itaúna.
Rodovia MG 431 - km 45 - Caixa Postal 100 - Itaúna/MG - CEP: 35.680-142.
brasil@uit.br.

² Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Departamento de Engenharia Mecânica.
leandro@demec.ufmg.br

RESUMO

O Brasil, como outras nações do mundo, está engajado nessas pesquisas e, dentre as ações mitigadoras adotadas, encontra-se a formulação e implantação de políticas públicas de incentivo à utilização de biocombustíveis visando uma redução progressiva da utilização de combustíveis fósseis. Os processos de produção industrial de biodiesel mais comumente implantados se baseiam na transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais, utilizando metanol ou etanol como agente esterificante e catalisadores homogêneos, principalmente os fortemente alcalinos, tais como o hidróxido de sódio ou potássio e o metóxido de sódio. Dentre os avanços em processos de transesterificação supracitados, aqueles que empregam ultrassom se destacam pelo efetivo aprimoramento no processo, seja do ponto de vista de graus de conversões, de redução do tempo reacional ou de redução de consumo de energia. Além disso, as unidades de produção tendem a serem mais compactas, principalmente se processos de produção contínua forem desenvolvidos e se tornarem viáveis, permitindo a construção de unidades para produção em pequena escala a um baixo custo. O presente trabalho apresenta projeto e construção de equipamento e processo para produção de biodiesel por irradiação por ultrassom, de forma didática e em pequeno volume, proporcionando um sistema reacional e de processamento o qual simula as condições e características existentes em processos industriais de produção de biodiesel, possibilitando o estudo, conhecimento e controle de importantes variáveis do processo. O presente projeto tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento sustentável do processo de produção de biodiesel pela criação de tecnologias inovadoras. Envolve a concepção de reator e usina para produção de biodiesel utilizando irradiação por ultrassom, com o intuito de favorecer uma maior interação entre as fases e consequente aumento do rendimento, redução do tempo de reação, no consumo de reagentes e, por conseguinte, economia de energia.

Palavras Chaves: biodiesel, ultrassom, usina, simulação industrial.



1. INTRODUÇÃO

Os processos de produção industrial de biodiesel, mais comumente implantados, se baseiam na transesterificação de óleos vegetais e gorduras animais, utilizando metanol ou etanol como agente esterificante e catalisadores homogêneos, principalmente os fortemente alcalinos, tais como o hidróxido de sódio ou potássio e o metóxido de sódio. Dentre os avanços em processos de transesterificação supracitados, aqueles que empregam ultrassom se destacam pelo efetivo aprimoramento no processo, seja do ponto de vista de graus de conversões, de redução do tempo reacional ou de redução do consumo de energia. Além disso, as unidades de produção tendem a serem mais compactas, principalmente se processos de produção contínua forem desenvolvidos e se tornarem viáveis, permitindo a construção de unidades para produção em pequena escala a um baixo custo. Outros avanços na área de produção de biodiesel estão relacionados com o desenvolvimento e aplicação de catalisadores alternativos, principalmente, visando processos em catálise heterogênea. Este meio reacional apresenta vantagens sobre a homogênea, podendo-se citar: facilidade de utilização em processos contínuos; possibilidade de obtenção de uma glicerina mais limpa; ausência de uma etapa de neutralização do catalisador e da adição contínua deste, no processo.

O presente projeto, pertencente ao campo dos equipamentos para produção de biodiesel, proporciona um sistema reacional e de processamento que simula as condições e características existentes em processos industriais de produção de biodiesel por irradiação por ultrassom e, possibilita o estudo, conhecimento e controle de importantes variáveis do processo. Por trabalhar com menor volume, proporciona uma economia no uso e consumo de reagentes e insumos, além de possuir a propriedade de portabilidade, ou seja, ser facilmente transportada e alocada em espaços reduzidos.

Em vista ao exposto, o módulo didático, tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento sustentável do processo de produção de biodiesel pelo desenvolvimento de tecnologias inovadoras, envolvendo: a preparação de novos catalisadores heterogêneos; desenvolvimento de tecnologia para produção de biodiesel utilizando irradiação por ultrassom, com o intuito de favorecer uma maior interação entre as fases e conseqüente aumento do rendimento, redução no tempo de reação e no consumo de reagentes e, por conseguinte, economia de energia.

O caráter didático e a possibilidade de simulação de processos industriais de produção de biodiesel por irradiação por ultrassom são os principais parâmetros inovadores, comparados com o estado da técnica em nível mundial, aliados à versatilidade e flexibilidade em termos da possibilidade de variação de todos os parâmetros de processo tais como: óleo vegetal, álcool, catalisador, tempo e temperatura de reação (convencional ou por irradiação por ultrassom), decantação e destilação. No quesito inovação, destacam-se: o projeto do reator para síntese de biodiesel por irradiação por ultrassom, a construção dos reservatórios em vidro tipo borossilicato transparente, o que permite o acompanhamento visual de todas as etapas do processo, a utilização de aço inoxidável para construção dos demais equipamentos, e de material polimérico resistente ao biodiesel, para as vedações.

Outra característica inovadora está relacionada ao pequeno volume processado, até seis litros por batelada, que proporciona uma economia no uso e consumo de reagentes e insumos, além de ser facilmente transportada e alocada em espaços reduzidos. Utiliza ainda processo de purificação a seco, "DryWash", por meio de resina polimérica de troca iônica, sem geração de água de lavagem residual, tão problemática nos processos convencionais de produção de biodiesel.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Usina para Simulação de Processos Industriais de Produção de Biodiesel por Irradiação por Ultrassom, Fig. 1, foi projetada para trabalhar com qualquer tipo de oleaginosa incluindo os óleos oriundos de processos de cocção de alimentos. Os álcoois etílico e metílico serão utilizados como reagentes no processo, dando prioridade ao etanol por ser oriundo de fontes renováveis e porque o

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Brasil possui grande disponibilidade deste insumo. Como catalisadores, tem-se a proposta de se trabalhar com metilato de sódio (30%) como já está sendo utilizado nas sínteses em bancada, não impedindo que outros catalisadores, tais como os heterogêneos, possam ser utilizados.



Figura 1 Usina para Simulação de Processos Industriais de Produção de Biodiesel por Irradiação por Ultrassom.

No projeto da Usina para Simulação de Processos Industriais de Produção de Biodiesel por Irradiação por Ultrassom foram considerados diversos fatores ligados diretamente com a parte técnica e econômica do processo de produção do biodiesel. Pesquisa da compatibilidade dos materiais utilizados nas tubulações, conexões, registros, confecção dos tanques e construção do reator de ultrassom.

A Figura 2 apresenta o fluxograma de processo da usina, identificando suas diversas etapas:

- mistura dos reagentes: os reagentes de processo: álcool, óleo e catalisador, são misturados por agitação mecânica em temperatura controlada;
- reação ultrassom: a reação de transesterificação para produção de biodiesel é realizada por irradiação por ultrassom;
- destilação: a recuperação do excesso de álcool, etílico ou metílico, adicionado na etapa reacional é realizada por processo de destilação;
- álcool recuperado: o álcool, recuperado na etapa de destilação pode ser reutilizado em reações posteriores;
- separação de fases: a separação das fases éster e glicerina é realizada por gravidade, antes e/ou após a etapa de destilação;
- glicerina: a fase pesada, glicerina, é direcionada por gravidade para seu reservatório de destino;
- purificação em coluna: a fase leve, ésteres graxos, é purificada em colunas de polimento a seco;
- biodiesel: o biodiesel produzido é armazenado em seu reservatório de destino.

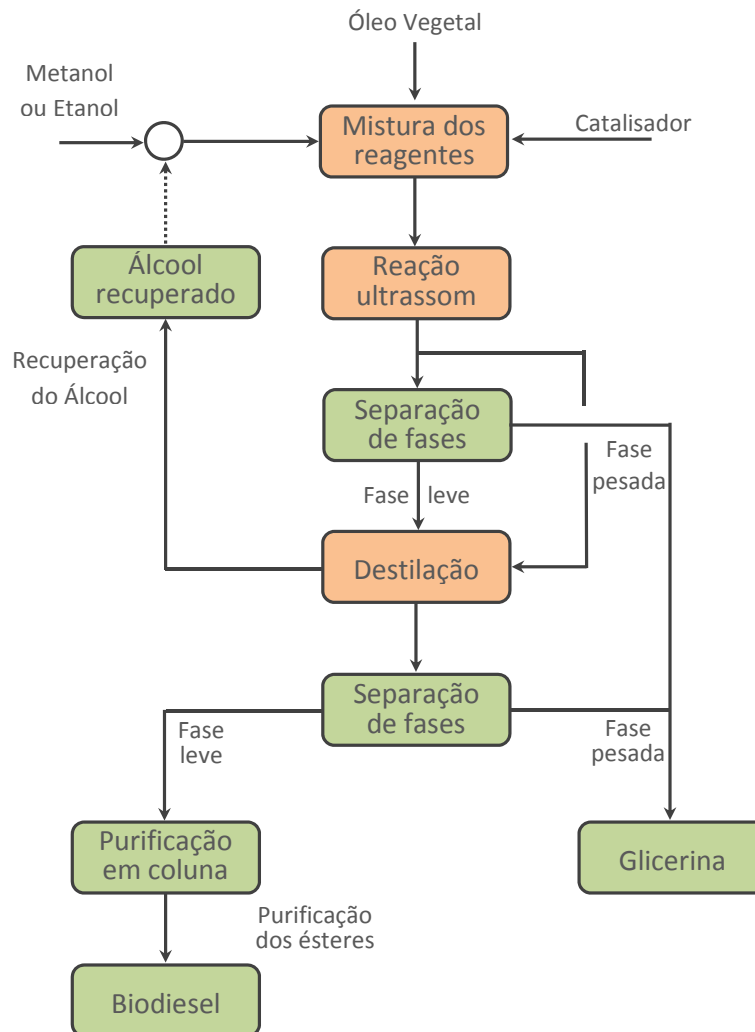


Figura 2 Fluxograma do processo de produção de biodiesel por irradiação por ultrassom.

O módulo de simulação industrial em questão foi projetado e construído tendo como parâmetro básico a necessidade de um equipamento versátil e que pudesse ser utilizado em salas de aulas convencionais ou laboratórios de pesquisa.

Conforme apresentado na Fig. 3, a Usina para Simulação de Processos Industriais de Produção de Biodiesel por Irradiação por Ultrassom foi projetada e construída sobre uma plataforma estrutural móvel, dotada de encaixes para levantamento e rodízios.

Sobre tal estrutura foram construídos e organizados os equipamentos e utilidades, a saber:

- (1) painel elétrico de controle central: permite o acionamento das bombas, motor de agitação, equipamentos e sistema de fluxo de ar comprimido e vácuo, além do acionamento do destilador, do reator de ultrassom e aquecimento do primeiro reator multifuncional. Possui controlador digital de temperatura que permite o acompanhamento das temperaturas de processo. Por questões de segurança, possui botão de emergência;
- (2) primeiro reator multifuncional: de recipiente transparente com aquecimento realizado por resistência elétrica interna, encapsulada, a seco, sistema automático de controle de temperatura entre ambiente e 120 °C, além de agitação com hélice naval impelida por motor com controle de rotação. Confeccionado em corpo cilíndrico de vidro tipo borossilicato de alta resistência, com

flanges de suporte em aço inoxidável e vedação em Viton®; além de permitir a realização da reação de transesterificação, possui uma segunda função como decantador para separação por gravidade das fases éster e glicerina e, uma terceira função, como destilador para remoção do excesso de álcool da etapa reacional; possui aletas internas em aço inoxidável com resistência elétrica interna que fornecem calor para aquecimento dos reagentes de processo, além de favorecer a mistura dos mesmos, impedindo a formação de vórtice durante a agitação da mistura reacional; possui válvulas de controle de fluxo para ajuste da injeção de ar comprimido. Alimentação da mistura na parte lateral superior e quatro saídas, duas inferiores e duas superiores, controladas por válvula manual de esfera tripartida e válvula controladora de fluxo. Uma saída inferior para destinação da mistura reacional para a próxima etapa de reação por ultrassom e outra para remoção da fase pesada (glicerina). Uma saída superior para encaminhamento do biodiesel em processamento para a etapa de purificação e outra para remoção do álcool recuperado. Acoplado a este uma bomba de vácuo para remoção de vapor de álcool da atmosfera de evaporação;

- (3) agitador mecânico: de haste com hélice naval em aço inoxidável e rotação variável de 5 a 2000 rpm. Desenvolvido para agitação de substâncias com diversas viscosidades, permite uma agitação homogênea e constante;
- (4) segundo reator: por irradiação por ultrassom e sistema de controle dos parâmetros da reação. Construído em aço inoxidável, possui transdutores de ultrassom (cristais piezoelétricos), de baixa frequência, 19 kHz, externos à coluna do reator, com sistema de refrigeração dos transdutores e visores transparentes para visualização da etapa reacional;
- (5) gerador de ultrassom e sistema de controle dos parâmetros da reação por irradiação por ultrassom;
- (6) bomba de combustível: tem como função direcionar a mistura reacional do primeiro reator para o segundo reator durante o processo de irradiação por ultrassom;

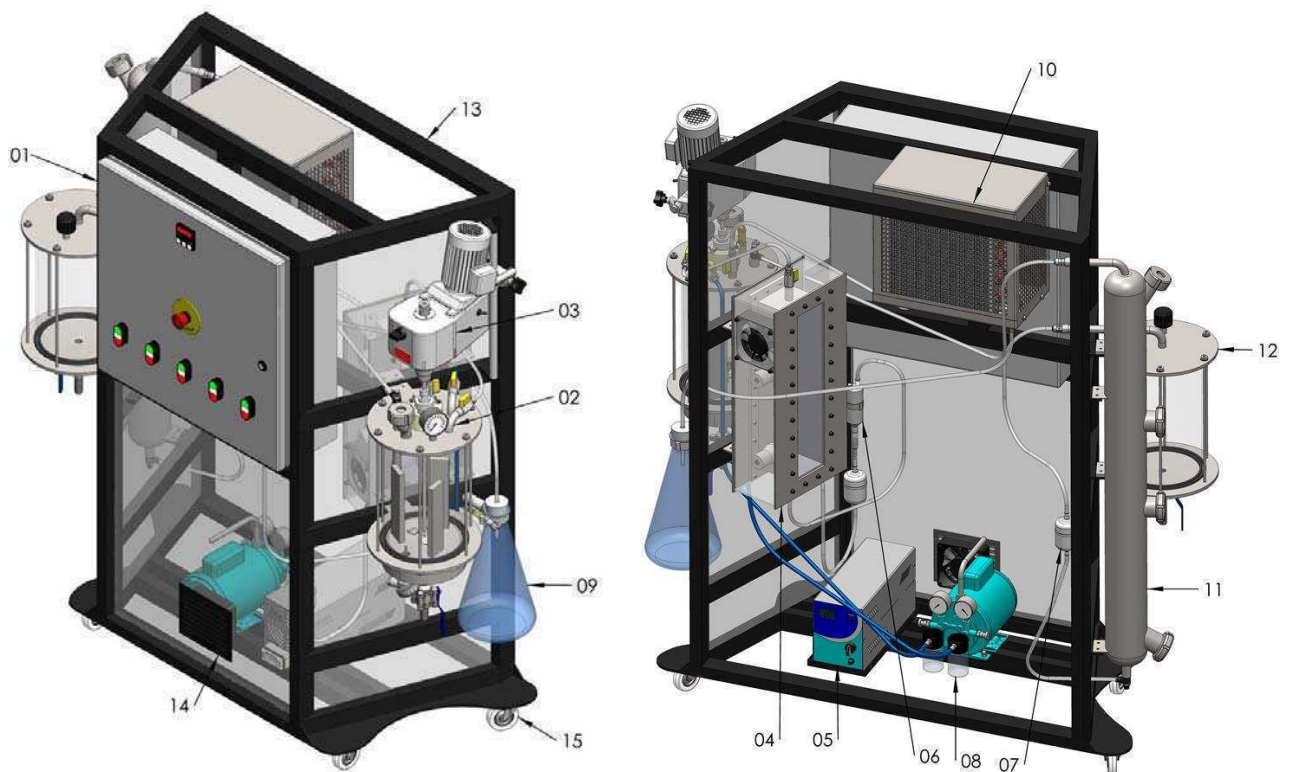


Figura 3 Vistas isométrica e posterior do módulo de produção de biodiesel.



- (7) filtro de combustível: destinado a reter qualquer particulado oriundo do primeiro reator, evitando que este passe pela bomba de combustível;
- (8) bomba de vácuo e ar comprimido: destina-se a promover vácuo no reservatório de álcool, de forma a diminuir a temperatura de ebulição do álcool e, desta forma, favorecer o processo de destilação no reator multifuncional. Além disso, possui a função de fornecer uma pressão positiva durante o processo de purificação do biodiesel;
- (9) reservatório de álcool: em vidro tipo borossilicato com saída lateral superior para acoplamento da bomba de vácuo e entrada superior para direcionamento do álcool recuperado durante a etapa de destilação;
- (10) trocador de calor: confeccionado com tubos de cobre e placas em alumínio, está destinado a remover o calor do vapor de álcool oriundo da etapa de destilação;
- (11) coluna de polimento a seco: em tubo inox com visores devidamente posicionados para acompanhamento do processo de purificação e saturação da resina contida no mesmo. Com acessos na parte superior e inferior para alimentação e remoção da resina de troca iônica. Alimentação na parte superior por tubo em material polimérico acoplado por conector “engate rápido”, saída na parte inferior acionada por válvula controladora de fluxo. A vazão do éster bruto na coluna é contínua e o fluxo impulsionado por ar comprimido fornecido por bomba de vácuo e ar comprimido;
- (12) reservatório de biodiesel: de corpo cilíndrico em vidro tipo borossilicato de alta resistência, com flanges de suporte em aço inoxidável e vedação em material polimérico resistente ao biodiesel. Alimentação do biodiesel purificado pela parte superior e uma saída inferior, controlada por válvula manual de esfera tripartida para remoção da biodiesel;
- (13) plataforma estrutural móvel: confeccionado em aço carbono, para fixação dos reservatórios e equipamentos da Usina para Simulação de Processos Industriais de Produção de Biodiesel por Irradiação por Ultrassom;
- (14) sistema de exaustão: formado por exaustor axial, impede a entrada de vapor de álcool na caixa de bombas, caso ocorra algum vazamento;
- (15) rodízios: permite a movimentação e deslocamento da usina.

O reator e o reservatório de biodiesel são construídos em corpo cilíndrico de vidro tipo borossilicato, com flanges de suporte em aço inoxidável, vedação em material polimérico resistente ao biodiesel (Viton®) e tubulação aparente em aço inoxidável. O peso total do conjunto de sistemas e equipamentos é de aproximadamente 100 kg, com dimensões de comprimento 1250 mm x largura 540 mm x altura 1400 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de produção de biodiesel por irradiação por ultrassom, representado na Fig. 2, se dá por meio de: óleo vegetal eventualmente pré-tratado é adicionado no primeiro reator sob aquecimento das resistências elétricas internas, álcool é acrescentado e, por meio do agitador mecânico, forte agitação é realizada para forçar a mistura das duas fases. Tão logo o catalisador é adicionado e, sob agitação mecânica e controle de temperatura, a reação é desenvolvida. Esta mistura pode permanecer por tempo suficiente para que a reação ocorra por completo, entre 60 e 120 minutos ou, pode ser encaminhada para o segundo reator para que a conversão em éster mínima de 96,5% seja atingida por irradiação por ultrassom.

Reagidos os insumos, tem-se biodiesel e glicerina, estes separarão antes ou após a etapa de destilação no reator multifuncional. Devido à considerável diferença de densidade, o processo pode ser realizado por decantação no reator multifuncional, com o auxílio da gravidade, buscando uma economia de energia e de espaço.



Através da bomba, a mistura reagida no segundo reator de ultrassom é direcionada de volta ao primeiro reator multifuncional. Assim que a mistura com excesso de álcool retorna ao primeiro reator, a temperatura do sistema de aquecimento é alterada para destilação do álcool, adicionado em excesso, na etapa de reação, com o objetivo de elevar a eficiência e cinética da reação. Vácuo é produzido sobre o sistema, através de bomba de vácuo e ar comprimido, de forma a retirar o oxigênio do primeiro reator e reduzir a temperatura de ebulição do álcool, evitando assim, a oxidação e consequente degradação do biodiesel.

O excesso de álcool evaporado no primeiro reator passa por um trocador de calor, condensa e é recuperado no reservatório de álcool, podendo ser reutilizado em processos posteriores.

Após a etapa de destilação, a mistura permanece no primeiro reator multifuncional para realização da separação de fases por gravidade. A fração pesada, glicerina bruta, oriunda da etapa de separação de fases é retirada por gravidade com auxílio de válvula de esfera em aço inoxidável. A fração leve, ésteres graxos, é bombeada em vazão contínua, passando pela coluna de polimento a seco, com auxílio da bomba de vácuo e ar comprimido. O biodiesel bruto percola pela resina de troca iônica que retém todos os resíduos de glicerina, catalisador e sais da fração leve, ésteres graxos, obtendo um biodiesel com alta pureza, que é direcionado ao reservatório de biodiesel.

A distribuição de fluxo de processo é realizada por mangueiras poliméricas flexíveis na parte interna da usina e em tubulação em aço inoxidável nas partes visíveis. As válvulas são do tipo esfera, em aço inoxidável, tripartida, facilitando operação e manutenção do sistema.

Propostas de transposição de escala de laboratório para escalas de produção em usinas industriais serão efetuadas para o sistema (tipo de catalisador/tipo de reator) que apresentar o melhor desempenho para conversão de óleos em ésteres alquílicos de ácidos graxos e também o melhor rendimento. A transposição de escala para o caso da etapa de remoção de impurezas do biodiesel seguirá os preceitos básicos de projeto de unidades de adsorção, fundamentados em dados obtidos em testes em batelada.

Testes preliminares foram realizados para desenvolvimento do equipamento de irradiação por ultrassom e, posteriormente, adequações serão realizadas para aplicação em processo de pequena escala de produção de biodiesel em uma Usina Móvel de Biodiesel.

4. REFERÊNCIAS

- [1] Brasil, Alex Nogueira; Oliveira, Leandro Soares; França, Adriana Silva (2011). "Biodiesel Production Using Heterogeneous Catalysis with Ultrasound Irradiation". *21st International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2011)*. Natal, Brasil.
- [2] Stavarache, Carmen (2005). "Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy". *Ultrasonics Sonochemistry 12 (2005)*. 367-372.



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FODAMI

Identificación y Evaluación del Potencial de Recursos Renovables en el Ecuador y su Viabilidad de Desarrollo Local

Peralta Juan^{1,2}, Otero Carlos², López Ángeles², Sosa Ian², Delgado Emérita^{1,2}, Barriga Alfredo²

1. Universidad Santiago de Compostela, Facultad de Física.

Rúa Xosé María Fernández Núñez, campus sur, cp 15706. España.

juanmanuel.peralta@usc.es, carlos.otero@gmail.com, a.lopez.aguera@usc.es,

erroba@gmail.com, emeritaalexandra.delgado@rai.usc.es

2. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, CDTs.

Km 30.5 vía Perimetral . Campus Gustavo Galindo. Ecuador

jperal@espol.edu.ec, eadelgad@espol.edu.ec, abarriga@espol.edu.ec

RESUMEN

Actualmente, la mayor parte de los países del mundo no cuentan con el suficiente número de estaciones y equipamiento que permitan conformar una red meteorológica sólida para el estudio o evaluación de recursos solar y eólico, y en general cualquier otro recurso energético renovable. Este es el caso de Ecuador, más aún considerando la complejidad topográfica y la diversidad de condiciones climáticas que presenta nuestro territorio se dificulta su aplicación. Por tal razón, una aproximación mediante herramientas de simulación numérica, puede ser de gran utilidad para estimar y orientar sobre el potencial y la densidad energética existente.

En el presente trabajo, presentamos un ejemplo de actuación utilizando el modelo atmosférico WRF "Weather Research and Forecasting Model" desarrollado por National Center for Atmospheric Research. Inicialmente se realizó el levantamiento y recopilación de la información a nivel nacional e internacional con respecto a datos históricos y estadísticos de la velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura, entre otros; correspondiente al territorio continental del Ecuador. A partir de los datos iniciales obtenidos de la atmósfera a gran escala, se podrá desarrollar algoritmos dentro del WRF que se utilizara para la simulación y predicción del potencial energético solar y eólico.

Con los resultados que se obtenga a futuro de la modelización será posible obtener la cartográfica energética regional y el grado complementariedad temporal y/o espacial entre el recurso solar y eólico en una localización concreta a lo largo del tiempo. Además el conocimiento del grado complementariedad será de gran utilidad a la hora de seleccionar las zonas para la instalación de sistemas de energización.

Como valor añadido, el protocolo puesto a punto podría ser replicado en otros países.

Palabras Claves: recurso, solar, viento, potencial

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el Ecuador, se ha encontrado con la necesidad de lograr la diversificación de la matriz energética nacional basada tradicionalmente en fuentes convencionales de energía, por una que pueda sustentarse por medio de recursos renovables autóctonos (hídrica, solar, eólica biomasa y geotermia).

Esta necesidad de cambio de fuente de generación energética, se base en tres aspectos de interés para el gobierno nacional [1]:

- Aumento progresivo de la demanda de petróleo y sus paulatina disminución de producción
- El cambio Climático y su afectaciones
- Seguridad Energética enmarcado en la Constitución vigente

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Para lograr esta meta es fundamental conocer el potencial de recursos existentes en el territorio continental. En lo relacionado al recurso solar y eólico el Ecuador es uno de los pocos países de Latinoamérica que no cuenta con una red de estaciones meteorológicas lo suficientemente densa y equipada que permita la evaluación exhaustiva de los recursos solar y eólico principalmente, la mayoría de las mismas no trabajan en forma continua, ni monitorean los parámetros necesarios desde el punto de vista energético, más aún considerando la complejidad topográfica y la diversidad de condiciones climáticas que presenta nuestro territorio dificulta la instalación masiva de estaciones de medición.

El presente artículo presenta una revisión, identificación y recopilación de las fuentes principales de información local e internacional relacionada al recurso solar y eólico, que permitan el desarrollo a futuro de modelos de simulación computacional, que sirvan para orientar sobre el potencial energético renovable existente en el Ecuador.

1.1. Marco Institucional

Enmarcados dentro del contexto internacional el Ecuador ratificó el Protocolo de Kioto en el año 2000. Mediante el Decreto Ejecutivo 1101 de 1999 se creó el Comité Nacional del Clima (CNC), la cual, define y establece las políticas y estrategias para la ejecución del Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, bajo la dirección del Ministerio del Ambiente.

El Decreto Ejecutivo 1815 de julio de 2009 ha declarado política de Estado la adaptación y mitigación del cambio climático y ha dispuesto que las funciones inicialmente atribuidas al Comité Nacional del Clima sean asumidas por la Dirección de Cambio Climático, Producción y Consumo Sustentable del Ministerio del Ambiente. Existe una "Guía Ecuatoriana para la Formulación de Proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio" donde hay un alto interés en proyectos de Energía Renovable.

Actualmente dentro de sus políticas de cambio de la matriz energética nacional, impone la necesidad de evolucionar a un sistema de mayor eficiencia y equilibrio del suministro de energía, que permita la seguridad nacional y la conservación del medio ambiente. Con el fin de lograr esta meta se expidió la regulación CONELEC 004/11, basada en el artículo 63 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico, que establece que el Estado fomentará el desarrollo y uso de los recursos energéticos no convencionales a través de los organismos públicos, la banca de desarrollo, las universidades y las instituciones privadas

Entre las medidas emprendidas está el fomento e impulso a las fuentes de energía renovables; dentro de los mecanismos se encuentran los privilegios de instalación de sistemas por medio del Fondo de Electrificación Rural y Urbano Marginal (FERUM) y la compra de la generación eléctrica (solares, eólicos, biomasa o cogeneración).

1.2. División Geográfica y Climática del Ecuador

El Ecuador se encuentra localizado en la región intertropical (zona Tórrida) en el noroeste de Sudamérica entre los meridianos 75°11'E y 81°02'E y entre los paralelos 1°21' N y 5°S. La Cordillera de los Andes atraviesa el territorio continental de Norte a Sur, dividiendo al país en tres regiones con características climatológicas diferentes. Estas regiones son llamadas: Costa, Sierra y Oriente.

La Costa es denominada Región Litoral es una zona con elevaciones inferiores a los 500 metros (por lo cual se lo puede considerar plana). Limita con el Océano Pacífico al Oeste y con la cordillera Occidental al este. El clima de la zona depende del comportamiento del océano



(corriente del Niño y Humboldt) en la práctica en su mayoría es de clima tropical húmedo y pequeñas zonas bosque tropical seco. [2, 3]

La Sierra es llamada Región Interandina se encuentra entre la cordilleras Occidental y Central. Con elevaciones mayores 3000 metros. Esta zona se caracteriza por tener un clima de paramo con temperatura que puede llegar a ser menores de 10 °C, de carácter húmedo y seco en su mayoría. [2, 3]

El Oriente es denominada Región Amazónica se empieza en los límites de la Cordillera Central aproximadamente a 1000 metros de nivel del mar hasta el límite con el Perú. Esta región presenta un relieve relativamente plano, con clima de bosque tropical húmedo con grado de precipitación considerable.

Esta variación en el relieve continental permite la presencia de regiones con microclimas muy particulares por ejemplo el litoral costero puede presentar radiación con promedio de 4 KWH/m², en cambio las estribaciones de la región interandina presenta una alta nubosidad lo que no permite promedio elevados de radiación. [2, 3]

2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Se han realizado diversos estudios sobre el potencial de energías renovables centradas en generación hídrica, los cuales presentan resultados sólidos que el país cuenta con un gran potencial hidroeléctrico regional.

En lo relacionado al campo de la energía solar y eólica existen estudios aislados que presentan información preliminar la cual en la mayoría de los casos no se ha podido validar principalmente por la falta de información histórica. [4]

2.1. Recurso Solar

Los primeros datos sobre insolación registrados en el Ecuador corresponden a los registrados por las estaciones meteorológicas del INAMHI. Estos registros desde 1962 contienen información sobre insolación global (Wh/m²/día) y heliofanía (h/día) en forma muy dispersa.

Las estaciones registraron la insolación global a nivel del suelo en forma manual, la duración diaria de insolación directa en estaciones de primer orden y la insolación directa mensual en estaciones de segundo orden (heliofanía diaria y mensual). Las mediciones diarias fueron tomadas en 8 puntos del territorio continental. [5]

A partir de esta información se ha elaborado el primer "Estudio del Potencial Solar y Eólico del Ecuador" realizado por el INECEL (Instituto Nacional Ecuatoriano de Electrificación) y el INE (Instituto Nacional de Energía), ambos desaparecidos actualmente. Este estudio recopiló la información desde el año 1968 hasta el año 1980, siendo publicado en el año 1981.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

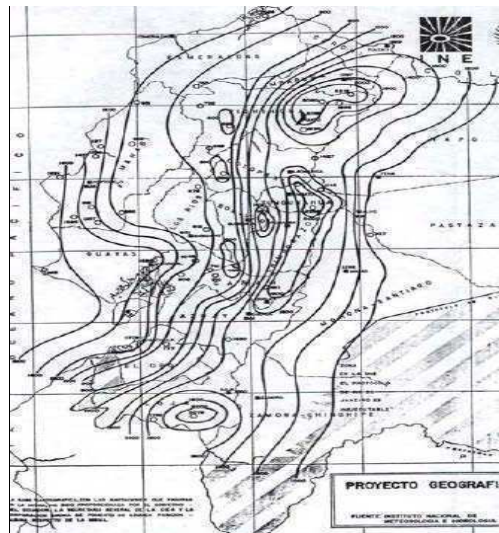


Figura 1. Mapa Solar Ecuador 1981 [5]

Lamentablemente con la desaparición de entidades públicas a cargo del manejo energético en el país, mucha de la información recopilada en ese periodo de tiempo se encuentra perdida hoy en día. A esto se suma que la mayoría de las estaciones de INAMHI en el transcurso de los años salieron de servicio paulatinamente debido a su antigüedad, por esta razón existen escasos registros de mediciones para años más recientes.

Posteriormente dentro del Proyecto OPET América Latina y el Caribe realizado en el año 2005 por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), se determinó que Ecuador debido a su situación geográfica, tiene un alto potencial solar. La radiación media es de alrededor de 3-4 kWh/m²/día preliminarmente. En la Tabla 1 se muestran los valores medios estimados por región [6]

Tabla 1. Potencial Solar del Ecuador

Región	Radiación Media
Costa	4.5 kWh/m ² año.
Sierra	3.5 kWh/m ² año.
Oriente	3.8 kWh/m ² año.
Galápagos	4.5 kWh/m ² año.

La única información sobre insolación solar por parte del gobierno existente en los últimos 20 años es referente a bases de información satelital con resolución de 40Km x 40Km. Esta información fue utilizada para elaborar "Atlas Solar con Fines de Generación Eléctrica" por medio de la Corporación de Investigación Energética, por solicitud del CONELEC, el mismo, que no se ha valido por medio de datos de ninguna estación meteorológica local.

2.2. Recurso Eólico.

La información recopilada también es bastante dispersa y con una resolución temporal bastante pobre. La mayoría de las estaciones del INMAHI se encontraban en los aeropuertos hasta el año 1981 que se elaboró el Estudio de Potencial Solar y Eólico del Ecuador, la mayoría han sido dadas de baja. Se han identificado por medio de la información existente posibles puntos de interés principalmente en el callejón interandino. [5]

Actualmente otro punto de información de datos de viento en resolución horaria son las registradas por las estaciones aeronáuticas provenientes de los aeropuertos locales que se encuentran bajo el control de la Dirección de Aviación Civil del Ecuador.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FODAMI

Basado del estudio del INE e INECEL se estableció preliminarmente que las provincias de Carchi, Imbabura, Chimborazo, Cañar, Loja, y las costas de Esmeraldas, Pedernales y Salinas, serían las zonas con un potencial interesantes. Estos resultados no fueron validos hasta el momento

En la región ecuatoriana no hay muchas zonas con vientos permanentes de alta velocidad. Hay viento disponible principalmente en lugares específicos dentro de micro-zonas de la región interandina y la región costera. Hasta la fecha no existe una metodología para el inventario de recursos eólicos, aunque mediante datos meteorológicos se han identificado algunas regiones con velocidades medias superiores a 5 m/s. [6]

Tabla 3. Velocidad de Viento Media en el Ecuador

ZONA	PROVINCIA	POBLACIÓN	Velocidad media (m/s)
Norte interandina	Carchi	El Ángel	6.6
	Imbabura	Salinas	7.0
Central Interandina	Pichincha	Tabacundo	5.0
		Machachi	7.1
		Malchinguí	6.6
	Cotopaxi	Olmedo	5.3
	Azuay	Páramo del Cotopaxi	5.9
		Huascashaca	7.9
Sur interandina	Loja	Saraguro	5.2
		Yangana	5.5
		Lucardi	5.6
Costa	Manabí	Boyacá	5.6

3. INVENTARIO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ECUADOR.

Se han identificado las entidades que cuentan con redes de monitoreo, que permitan desarrollar una base de datos con información histórica relevante para la evaluación del recurso renovable.

En Ecuador las estaciones meteorológicas en su mayoría pertenecieron al ahora desaparecido Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) en la década del 90, siendo repartidas entre las diferentes entidades del estado, lamentablemente la información obtenida a lo largo del tiempo no fue almacenada ni procesada, inclusive en algunos casos no se conoce las coordenadas de ubicación. Basado en el Anuario Meteorológico del INAMHI del 2000 se identificación las siguientes entidades: [7]

- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)
- Dirección de Aviación Civil (DAC)
- Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (INOCAR)
- Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE)
- Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI)
- Programa Regional para el Desarrollo del Sur (PREDESUR)
- Comisión de estudios de Desarrollo de la Cuenca baja del Río Guayas (CEDEGE)

Existen otras estaciones repartidas entre universidades o centros de investigación; la mayoría de las estaciones existentes son del tipo pluviométrica. Nuestro inventario se centrara en las estaciones que miden la mayoría de parámetros meteorológicos de las tres primeras entidades gubernamentales.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



3.1. El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador

El INAMHI mantiene la base de datos Hidrológicos para el país. La función básica de INAMHI es recolectar, registrar y mantener Información de hidrológico y meteorológico. Se estima que en el Ecuador existen más de 250 estaciones meteorológicas de varios tipos, de recolección sinóptica y manual, en la mayoría de caso no existe un programa de mantenimiento apropiado para la red de estaciones, por lo cual no se conoce el estado de funcionamiento real de las mismas. Las principales variables que se miden en las diferentes estaciones son:

- Humedad (%)
- Precipitación Atmosférica (mm)
- Heliofania (horas y decimos)
- Evaporación
- Viento (direcciones N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, tenemos: Velocidad (m/s))
- Nubosidad (octas en cielo cubierto)

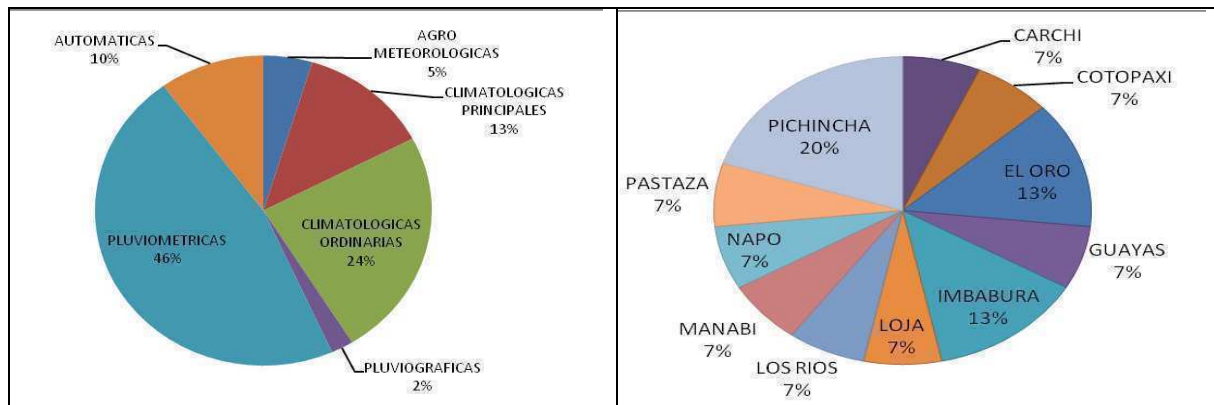


Figura 3. Clasificación y Ubicación de la Estaciones [7]

La mayoría de los registros existentes se encuentran dados en forma diaria y en muchas ocasiones existen vacíos en los anuarios reportados. Actualmente se estiman que apenas 10 estaciones automáticas están activas y solo 4 registran datos de interés, los cuales no se encuentran estandarizados, parametrizados ni validados para su uso.

3.1.1 Estaciones Convencionales

La información recolectada de las principales estaciones del INAMHI corresponde a promedios mensuales de velocidad y heliofania (duración de brillo solar, o horas de sol). Los primeros registros aislados son de la década del 60, recién desde la década del 80 se empieza a recopilar formalmente la información de las estaciones en lo relacionado a estas variables.

Desde el año 1982 el INAMHI mantiene una red de medición de magnitud y dirección de viento (valor diario) en 140 estaciones aproximadamente. En su mayoría la lectura se realiza en forma manual, por lo cual existen periodos en los que no se toman medidas debido a condiciones climáticas o humanas, en promedio logran recopilar datos de 95 estaciones anualmente

Basándonos en la información existente (figura 4.) se tiene que el callejón interandino presenta los valores más elevados en lo relacionado a la magnitud de viento principalmente la provincia de Tungurahua y Loja con valores superiores a 4 m/s. En cambio la costa por ser una orografía relativamente plana presenta muy poca fluctuación de viento a excepción de la provincia de Manabí. (Los datos promedios no consideran variaciones locales ni microclimas en las zonas de estudio)

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

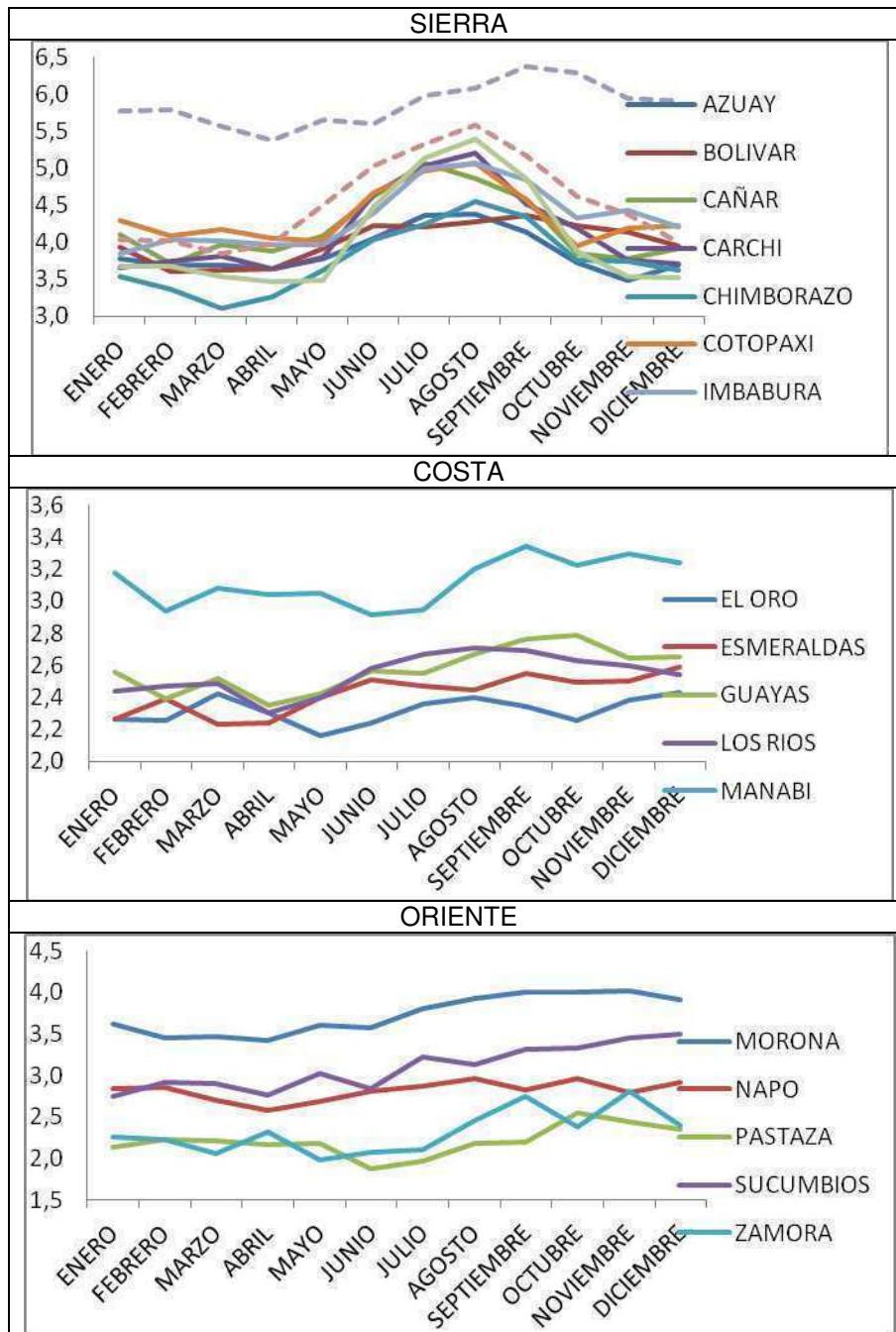


Figura 4. Velocidad Promedio Mensual por Provincia [7]

La información existente con respecto a la radiación solar es registrada solamente por medio del parámetro de heliofanía. A partir de los datos existentes se puede apreciar que Imbabura recibe el mayor promedio anual de horas sol aproximado de 1800 horas. [3, 7]

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

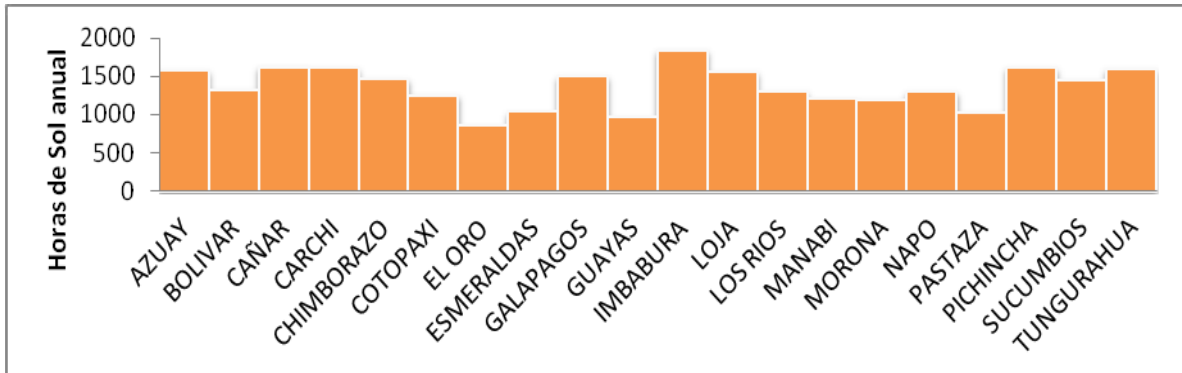


Figura 6. Horas de Sol Anual Promedio por Provincia [7]

3.2. Dirección General de Aviación Civil del Ecuador

La DGAC es la entidad encargada del manejo de las estaciones en los aeropuertos del Ecuador.; siendo las principales las estaciones ubicadas en la ciudad de Guayaquil, Quito, Cuenca, Manta y Esmeraldas. La información de la magnitud y dirección del Viento tabulada registrada es de carácter horaria. [7].

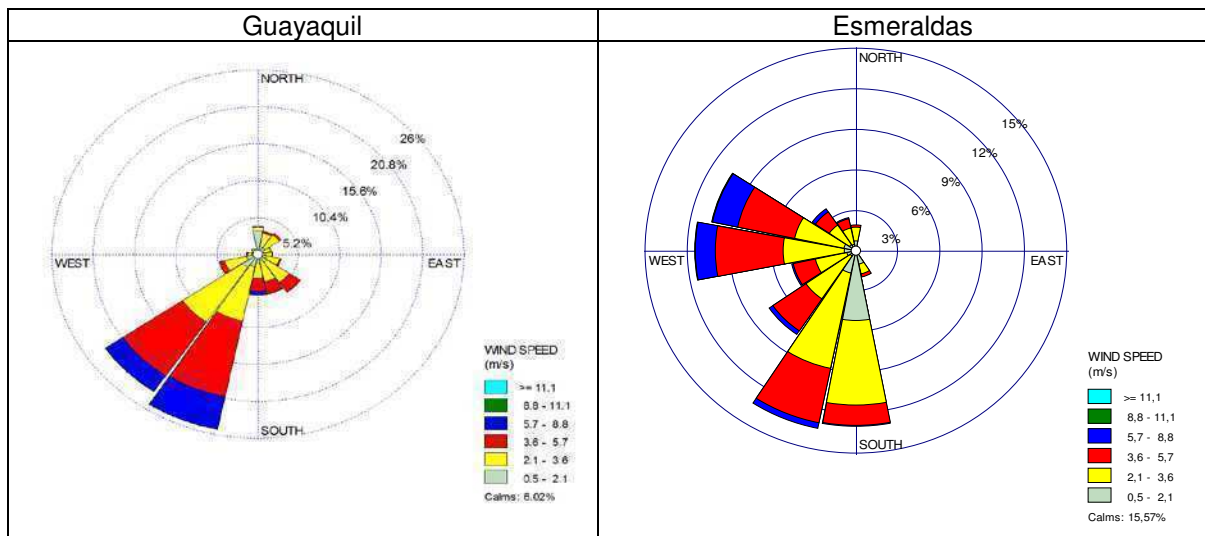


Figura 7. Ejemplos de Rosa de Vientos de Estaciones de la DGAC [7]

3.3. Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador

El INOCAR está encargado de monitorear las condiciones climáticas en el espacio marítimo, para lo cual tiene montada siete estaciones en los puertos principales del Ecuador (San Lorenzo, Esmeraldas, Manta, Puna, Libertad, Puerto Bolívar), La medición de las variables climatológicas se la realiza en forma sinóptica. Las variables principales meteorológicas que monitorea son: temperatura, presión, heliofania, velocidad y dirección del viento. [8]

Los registros de medición de Heliofania son pocos, dispersos y no tiene continuidad horaria por lo cual no es fiable para su utilización, la mayoría de las mediciones son de las 7 y 19 horas.

Los máximos valores de magnitud de viento se encuentran a las 13:00 para las estaciones de San Lorenzo, Esmeraldas, Manta, Libertad. Mientras la estaciones de Guayaquil, Puna y Puerto Bolívar presenta sus máximos valores a las 19:00. [8]



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FODAMI

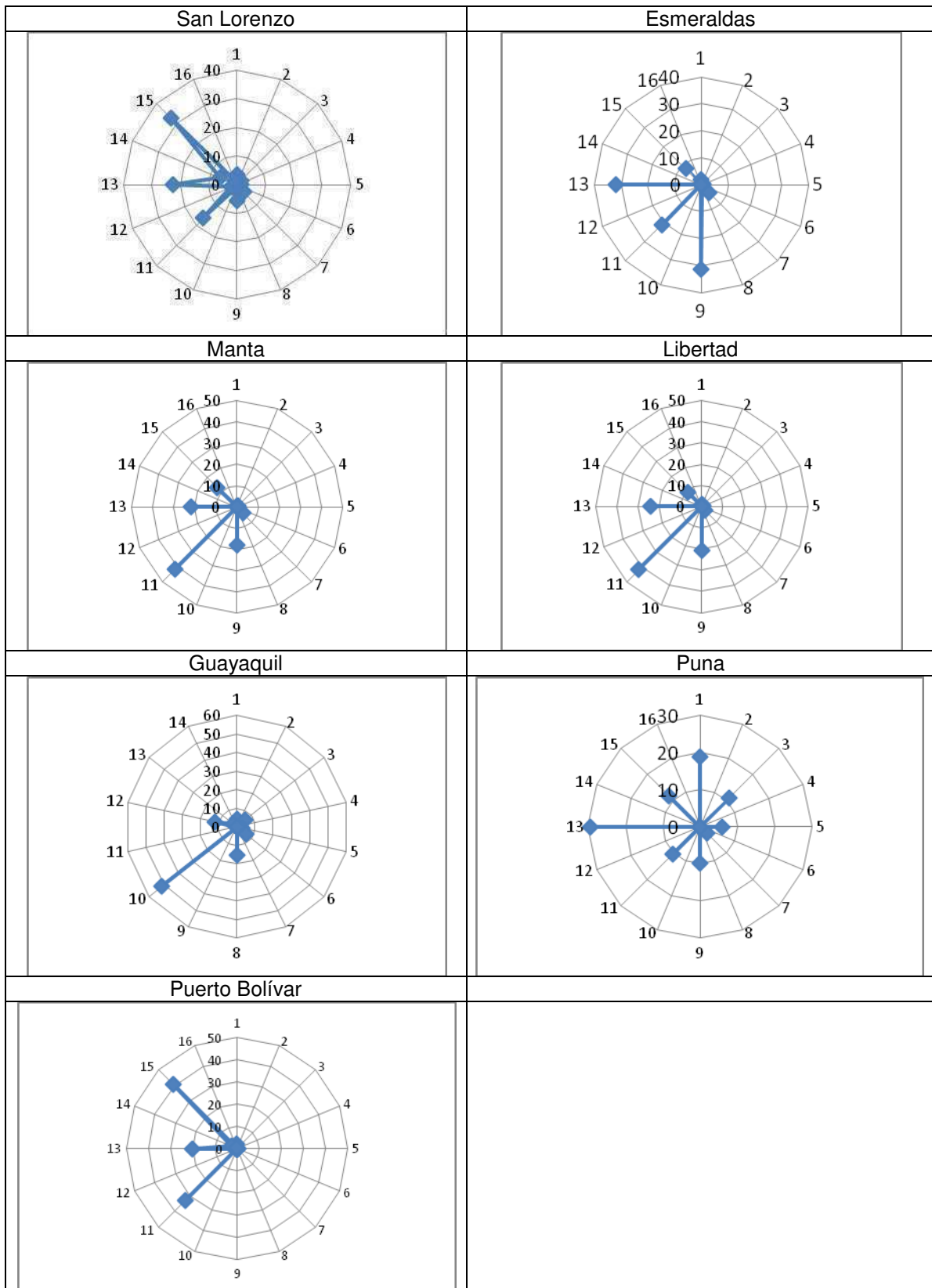


Figura 6. Rosa de Vientos representativas de la estaciones del INOCAR [8]

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Tabla 4. Dirección Y Magnitud de Viento Principal de la Estaciones

Estación	Dirección	Velocidad Promedio
San Lorenzo	315	1.34
Esmeraldas	270	3.59
Manta	225	2.45
Libertad	225	2.03
Guayaquil	225	1.23
Puna	270	1.17
P. Bolívar	315	1.31

4. METODOLOGÍA DE MODELAMIENTO DE RECURSO.

Se utiliza el Modelo “Weather Research and Forecasting Model (WRF)”, que fue desarrollado por la colaboración de distintas Instituciones con el National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), the Forecast Systems Laboratory (FSL), Force Weather Agency (AFWA), entre otras. Permite modelar y representar las variables de la atmósfera (viento, presión, temperatura, radiación etc.) en una malla tridimensional. [9 10]

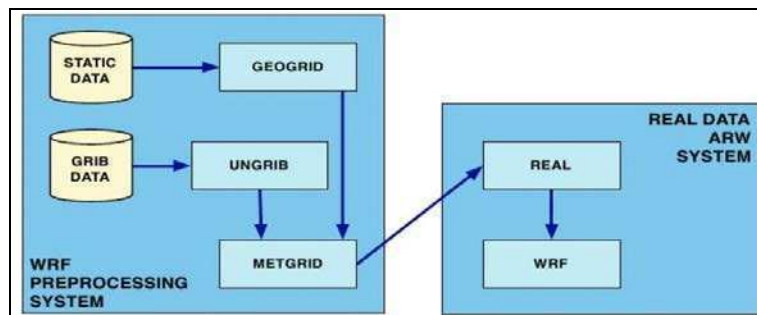


Figura 7. Módulos de ejecutables WRF [10]

El paquete computacional del modelo WRF consta de dos módulos de trabajo que son:

- WRF preprocessing System: Se encarga del primer procesado de datos estáticos y meteorológicos, está conformado por los paquetes: GEOGRID que crea los dominios e interpola los datos estáticos, UNGRIB que lee los datos meteorológicos en formato GRIB y METGRIB que interpola los datos meteorológicos.
- Real Data ARW System: Se encarga de procesar y simular por medio de los paquetes REAL que interpola tridimensionalmente la información y gestiona los formatos para que puedan ser cargados y WRF que ejecuta el modelo computacional.

La etapa preliminar del estudio se lo realiza para un periodo de 30 años (1982 -2012) y se utiliza la variable de presión al nivel del mar (SLP) perteneciente a la base de Datos de Reanálisis NCEP-NCAR, se pueden descargar los datos en la dirección: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html>. Adicionalmente se debe proceder a la clasificación de grupos y selección de días tipos que representen el comportamiento característico, para un año patrón en función de una jerarquía de pesos obtenidos por el proceso de selección.

Entre las principales técnicas de análisis multivariante y técnicas de agrupamiento de datos que se puede emplear para seleccionar los días tipos tenemos:

- Análisis de las componentes Principales (CPA) [11]
- Algoritmo de K-medias (kmean) [12]
- Redes Neurales SOM (Self-organizing map, basado en modelo de Kohonen) [12]

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



La resolución espacial seleccionada para este ejemplo es de un 1 km en un grilla de 22 x 26 puntos con un rango de 12.5 a -40 en latitud 260.0, 322.5 en longitud con un total de 43829 planos de interés. La configuración del dominio global es forma anidada, donde existe un dominio padre al cual se referencias las simulaciones sucesivas con una relación 1 :1/5 : 1/5 : 1/3, con 23 niveles de presión. La información proporcionada por el archivo GRID se procesa y se clasifica por medio de Matlab, con el fin de obtener los días tipos a modelar por medio de WRF.

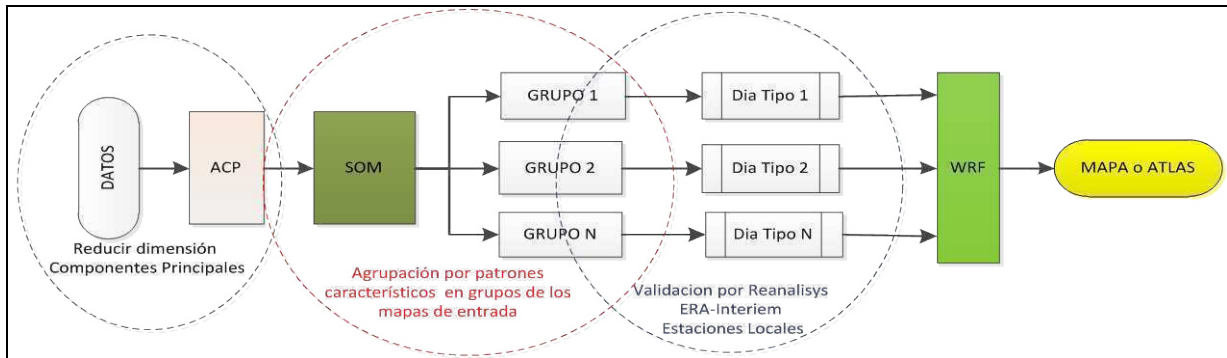


Figura 8. Diagrama de Flujo

5. RESULTADOS PRELIMINARES

A modo de ejemplo la metodología seleccionada en conjunto para la aplicación del modelo WRF nos permite obtener resultados preliminares en magnitud del recurso eólico, para los días seleccionados. Los gráficos son procesados con el programa IDV 3.0u2 descargable en <http://www.unidata.ucar.edu>.

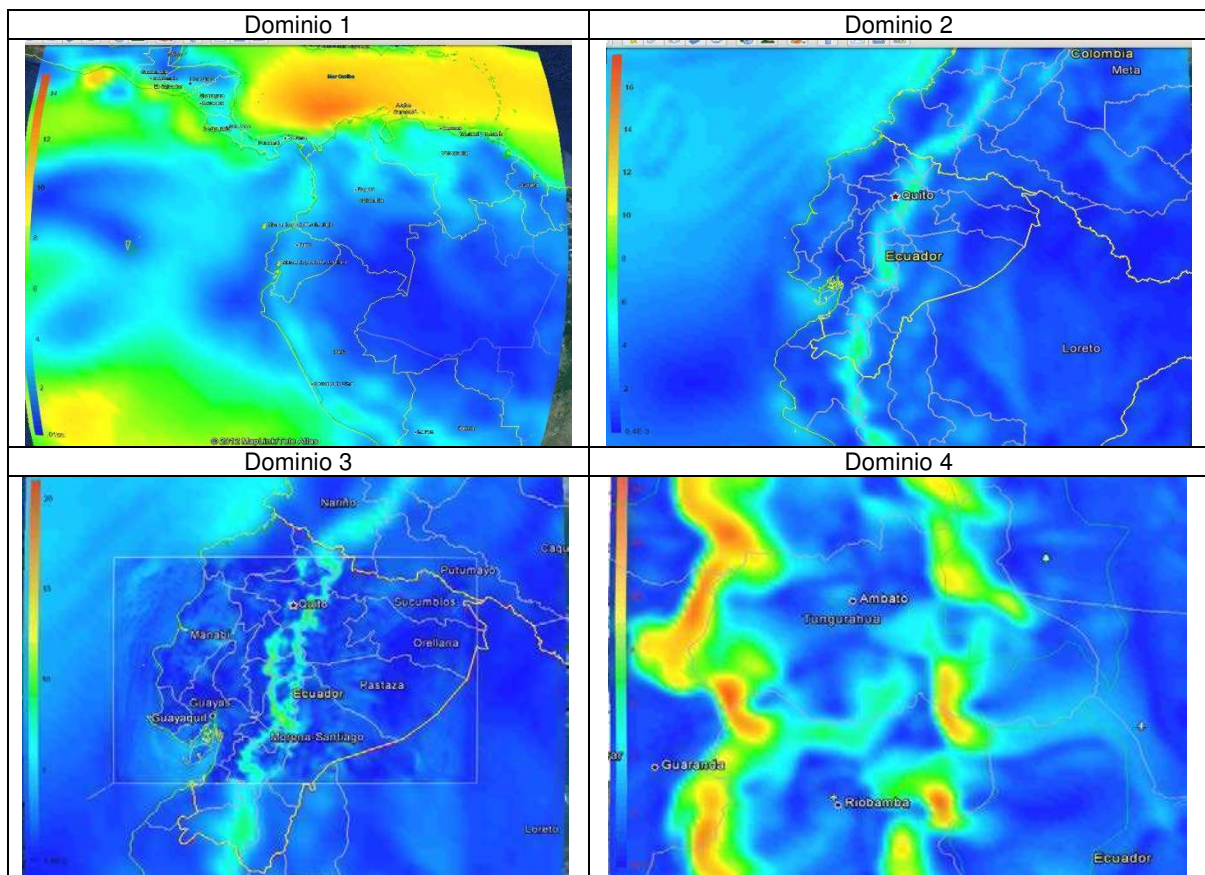


Figura 9. Mapa de Magnitud Viento de los dominios anidados

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Dentro de la validación se plantea la comparación de la magnitud y dirección del viento obtenido por la simulación de WRF, además de los datos históricos de las estaciones locales.

En lo relacionado a recurso solar actualmente nos encontramos seleccionando y procesando los datos históricos y satelitales previo a la ejecución del WRF, se espera obtener mapas de radiación global que permitan identificar zonas de interés.

6. CONCLUSIONES

Aunque las energías renovables presentan un menor impacto en el medio ambiente a largo plazo en comparación con las fuentes de energía convencionales. Su rendimiento de producción está ligado directamente a condiciones geográficas y climáticas locales. Su explotación eficiente obliga a disponer de “atlas de recurso” que nos permitan abordar el problema de la intermitencia de los recursos energéticos de origen renovable y su nivel de aprovechamiento, mediante el estudio de su potencial y su complementariedad espacio-temporal.

En este sentido, la aplicación de modelos numéricos como WFR en complemento con registros meteorológicos locales, en algunos casos precarios, constituyen una herramienta adecuada para establecer zonas geográficas de disponibilidad energética y centrar estudios futuros en dichas zonas del comportamiento de parámetros atmosféricos como son la radiación solar y el viento; su grado de potencial y disponibilidad como recursos energético local.

Los primeros resultados obtenidos para el caso de Ecuador permiten identificar zonas con un potencial de interés el campo eólico, principalmente en la zona Sur de la región interandina.

7. REFERENCIAS

- [1] Castro Miguel. (2011). Hacia una matriz energética diversificada en el Ecuador. Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental, CEDA, Quito
- [2] Rodriguez Nelson y Defines Gérard Zonas y patrones Climáticos en la región Andina .Colombia Universidad de los Andes, Grupo de Analisis de Datos y Estadística Multidimensional.
- [3] Quevedo Fausto Ing.(2000). Hidrografía e Hidrología del Ecuador.Cuenca Universidad Católica de Cuenca.
- [4] CEPAL- Naciones Unidas(2004). Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe: situación y propuestas de políticas, Quito
- [5] INE Instituto Nacional de Energía. (1982).Geografía Energética del Ecuador, Bases para la Caracterización energética de las Regiones Ecuatorianas.Quito
- [6] IDEA, Proyecto OPET América Latina y Caribe. Informe Sintético - WP4 Ecuador, febrero 2005
- [7] INAMHI Bases de Datos Anuarios Meteorológicos 20001-2008.- Quito
- [8] INOCAR Bases de Datos. - Guayaquil : [s.n.], 2011
- [9]. Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. (2009). Modelación del Recurso Solar y Eólico en el Norte ce Chil . Comisión Nacional de Energía Chile, Santiago de Chile
- [10] NCAR, NCEP, FSL The Weather Research & Forecasting Mode [Online]. - 03 2012. <http://www.wrf-model.org/index.php>.
- [11] Alvarez Domingo F. Rasilla. (2003). Aplicación de un Método de clasificación sinóptica a la península Ibérica Investigaciones Geográficas .pp. 27 – 45. España
- [12] . Guitierrez José M, Cano Rafael, Cofiño Antonio S.,. Sordo Carmen M. 2004. Redes Probabilísticas y Neuronales en las Ciencias Atmosfericas. Universidad de Cantabria. Santander-España.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Investigación del Ecuador (SENESCYT) por el apoyo brindado para continuar mi formación profesional.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO SOLAR MEDIANTE ENVOLVENTE DE PLANOS ESPEJADOS

Masat, Sergio Gustavo¹; Morzán, Adrián²; Cian, Pablo²

¹ **Autor:** *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista.
Calle 44 N° 1000, 3560 Reconquista.
msergiogustavo@gmail.com.*

² **Estudiantes Becarios:** *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Reconquista.
Calle 44 N° 1000, 3560 Reconquista*

RESUMEN

Una de las formas de transformación energética es la obtenida a través de la radiación Solar. Según investigaciones, esta fuente de tipo renovable puede ser considerada como la suficiente para abastecer todas las necesidades a las que el ser humano enfrenta. Entre ellas podemos destacar el Agua Caliente Sanitaria, Energía Eléctrica, Iluminación, Calefacción, Refrigeración, etc. El sol emite mediante ondas electromagnéticas un potencial muy importante de radiación capaz de ser utilizado convenientemente.

El ser humano, a medida que fue evolucionando en su tecnología, ha descubierto maneras de aprovecharlo y cubrir –aunque sea en parte-, tales necesidades. Son importantes y necesarios entonces la investigación, estudio, desarrollo, y aplicación concreta de dispositivos que permitan llevar a cabo tales cometidos. Esto sin dudas redundará en beneficios tanto en economía como en cuestiones ambientales.

El caso que nos ocupa, es el del caldeo de un fluido. Como sabemos, existen en el mercado numerosos desarrollos en aplicación al Agua Caliente Sanitaria, con variadas tecnologías en juego.

La presente idea se fundamenta en conseguir la mayor concentración de radiación posible a través de espejos reflectantes, con una distribución envolvente que permita, durante la mayor parte del tiempo de insolación, transformar dicha radiación en energía calórica y transmitirla al fluido circulante en tubos dispuestos especialmente para tal fin.

Se ha estudiado el proceso sugerido en base a consideraciones específicas y de acuerdo a experiencias en sistemas similares. Igualmente, esta investigación, que ha sido realizada en softwares computacionales, se someterá a desarrollos de aplicación práctica.

Palabras Claves: Colector Solar, Eficiencia, Reflexión de radiación, Energías Renovables, Medio Ambiente

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo ha sido llevado a cabo a partir de una experiencia que se halla en funcionamiento hace unos años, bajo determinadas consideraciones físicas y geométricas del principio de concentración de la radiación solar mediante la interposición de una superficie reflectante cilíndrica parabólica, de una determinada longitud, en un medio confinado. Este medio, además, presenta la característica de contar con un cristal como cubierta, generando así un efecto invernadero que maximiza la capacidad de entrega de calor al fluido.

Como sabemos, la parábola presenta como particularidad en su constitución física, la de concentrar en un punto determinado (llamado *foco*) –en nuestro caso tratándose de cilindros parabólicos, una línea focal–, toda la radiación que sea paralela a su eje de simetría proveniente desde una fuente dada, incluso verificándose en sentido inverso.

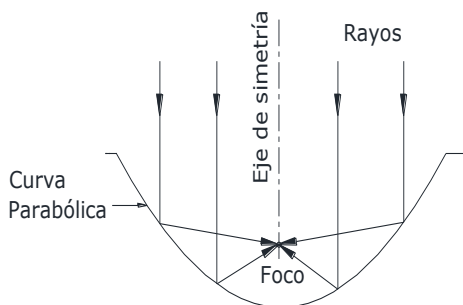


Fig. 1: Concentración hacia un foco

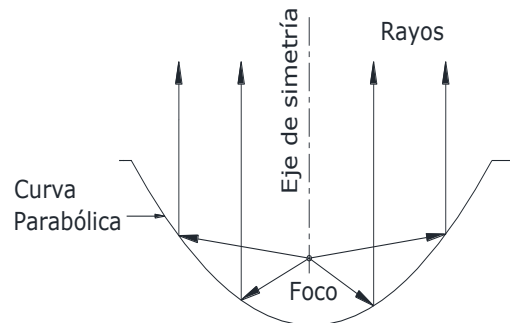


Fig.2: Concentración desde un foco

1.1. Colector Solar Concentrador

Un Colector Solar Concentrador está compuesto básicamente por Cilindros Parabólicos orientados al Sol, siguiendo constantemente “su” trayectoria (v.gr.: es la tierra la que describe la trayectoria). Los más conocidos son los abiertos, que concentran toda la radiación en la línea focal a determinada distancia de los cilindros, hallándose generalmente por encima de la curva: Fig. 3.

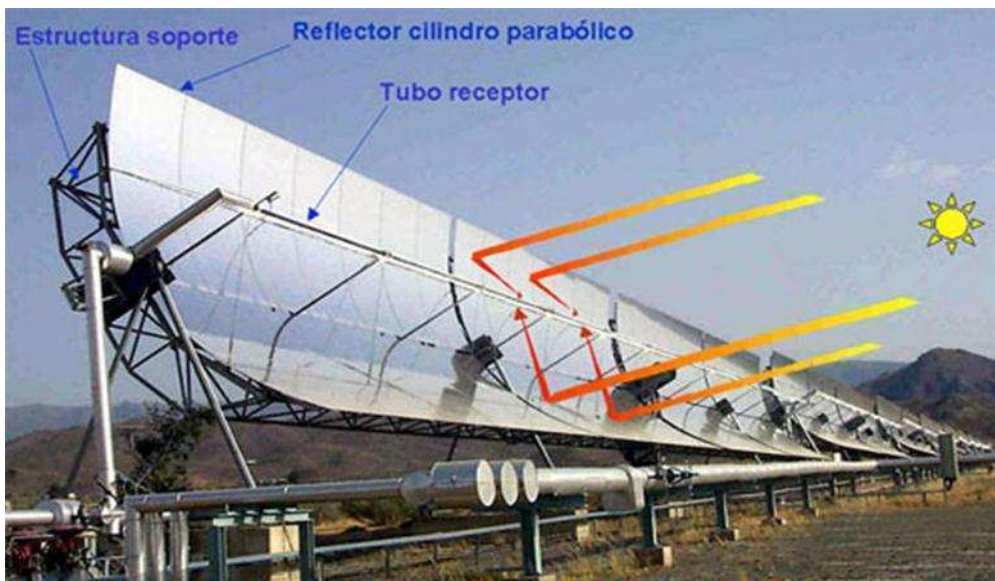


Figura 3: Sistemas Concentradores de alta Temperatura

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

En nuestro caso, dadas las características de diseño adoptadas, dicha línea se halla “dentro” de la citada curva, como lo muestran las Figuras 1 y 2. Para el óptimo funcionamiento de estos equipos, es preciso el seguimiento solar, como lo dijimos, a efectos de que la radiación permanezca centrada en la línea focal.

Y es ahí donde se centra la atención en este trabajo. Dadas las posibilidades tecnológicas, económicas, incluso mecánicas, no siempre es factible la implementación de estos sistemas que de por sí presentan altos costos de diseño, desarrollo, construcción, puesta a punto, mantenimiento posterior, etc. Además, lo que se busca con esta propuesta es que pueda ser utilizado por la sociedad en general y no adaptado sólo a selectos sistemas de transformación energética.

Un sistema colector cilíndrico parabólico confinado y bajo cubierta puede presentar una configuración como la indicada en la figura 4, donde el centro de los tubos conductores del fluido se halla en la línea focal, determinada por esta curva parabólica. Dispuestos así los tubos, en modo paralelo, confluyen en un tubo distribuidor el que conduce a un tanque térmico el fluido caldeado, cerrándose el circuito tal como ocurre en cualquier otro sistema calentador ya conocido.

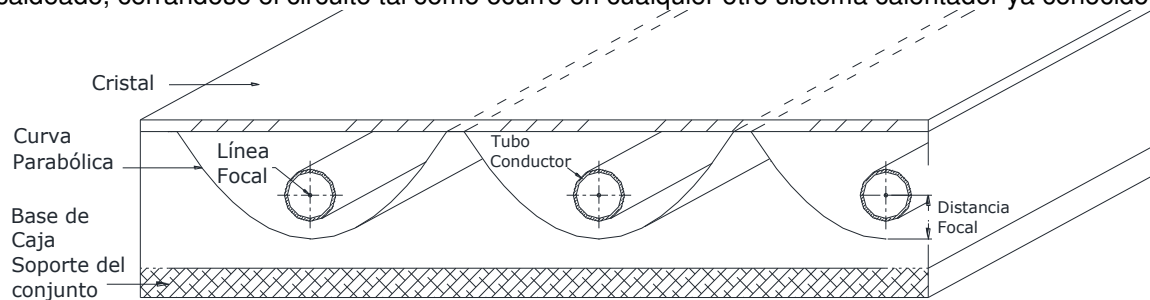


Figura 4. Conformación del Prototipo Actual.



Figura 5: Colectores en funcionamiento para Agua Caliente Sanitaria domiciliaria

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

El prototipo de la figura 5, responde a un proyecto ya en funcionamiento, en una casa de familia y presenta 3(tres) placas de 1 (un) m² c/u, orientadas de tal modo que permitan captar la radiación en períodos determinados. Lo ideal sería sin dudas darle orientación permanente como en los casos que conocemos. Es por ello que hemos destinado nuestro esfuerzo a establecer un esquema similar, basado en esta experiencia y que pueda responder al menos a un requerimiento de ingeniería básico con los elementos de estudio computacionales a nuestro alcance.

2. Criterios de arranque para la propuesta

Sea el esquema descrito con su configuración parabólica fija, (Fig. 4), y dejando de lado el seguimiento solar, la propuesta radica en lograr que la reflexión de los rayos se produzca ahora en planos estratégicamente dispuestos, a fin de permitir que al tubo conductor llegue el flujo de radiación la mayor parte del tiempo de insolación diaria. Otra expresión sería que la cuota de radiación diaria se proyecte en los tubos el mayor tiempo posible en el día.

Partimos de premisas tales como la existencia de una radiación directa y otra difusa. Es sobre la directa la que se opera. Asumimos igualmente, que para que actúe la difusa, es preciso contar con materiales que permitan retener el calor el mayor tiempo posible dentro del recinto que contiene todo el sistema.

En primer lugar, para que haya reflexión (radiación en los tubos), se deberá contar con espejos orientados en forma conveniente, de acuerdo a un patrón de referencia fijado. Contando con un esquema base, dado por una curva con determinadas características, y mediante la cual se localiza el tubo a una cierta altura de la base (distancia focal), se parte definiendo intervalos de tiempo de radiación a lo largo del día, dividido en 2 (dos) períodos A y B para establecer los parámetros que definirán la envolvente buscada. Una vez finalizada esta distribución especular, se determinará la posición exacta del tubo en altura, empleando una herramienta matemática.

2.1. Determinación de los intervalos de tiempo

Las franjas horarias de trabajo planteadas responden a intervalos de actuación correspondientes a los períodos de insolación diarios elegidos: luego, para ángulos de 15° entre intervalos, quedan definidos los espacios de tiempo dentro de los cuales se realiza el estudio.

Tabla 1 *Intervalos y períodos de insolación*

Intervalo	1	2	3	4
Período A	9:00 a 10:08 Hs	10:08 a 11:16	11:16 a 12:24	12:24 a 13:32
Período B	13:32 a 14:40	14:40 a 15:48	15:48 a 16:56	16:56 a 18:04

Cada período entonces queda definido en franjas horarias de 60° cada uno. Es decir, partiendo a las 9:00 horas del día, en que el sol –para nuestra latitud, 29° Sur, 59° Oeste- comienza a surtir efecto considerable, hasta las 18:00 horas. En total se dispone de una amplitud de 120° (30° a 90° y 90° a 150°). A continuación, se deben determinar los planos de los espejos que se ubicarán en las distintas posiciones de la envolvente, con respecto a los flujos de radiación definidos para los intervalos establecidos. Nota: se aclara que los ángulos de incidencia solar elegidos, corresponden a la latitud señalada; en cuanto a la estación del año, para el verano el sol comenzará a calentar más temprano y hasta más tarde que a las horas señaladas; en invierno, en cambio, se cumplirá a las horas que se mencionan

Elección de los espejos: consideramos para nuestro análisis, que el espejo plano de vidrio es lo más práctico, más económico, y adquirible en cualquier negocio del ramo vidrierías

3. Consideraciones acerca de la reflexión

La óptica geométrica, a través del *principio de Huygens*, estudia la reflexión en un medio [1]: para un espejo plano M, un rayo de luz r_i , al incidir en un punto p dado de dicho espejo, a un cierto ángulo α_1 con respecto a la normal n del plano, no puede moverse más allá del espejo sino que debe expandirse hacia arriba en un rayo reflejado r_r con un ángulo α'_1 . El principio establece que, considerando un frente de onda contenido en un plano B, emerge de la superficie del espejo contenido en el mismo plano B (Figura 6).

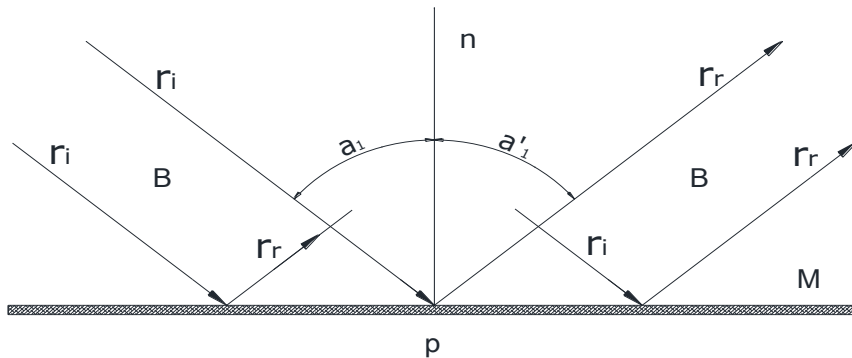


Figura 6: Reflexión de rayos en una superficie espejada

En conclusión, la Ley de la Reflexión establece que si la radiación incidente y reflejada que incide sobre una superficie M, pertenece a un plano B, los ángulos

$$a_i = a_i' \quad (1)$$

3.1. Determinación de la envolvente

Con los intervalos definidos en la Tabla 1, la posición original del tubo conductor, y la base de la caja soporte, se determinan las posiciones de cada espejo. Se hace uso del Software AutoCAD para determinar la ubicación y posición angular definidas de los espejos. También se ha determinado, para cada ubicación y posición, el ancho de cada espejo. La longitud quedará establecida en función del tamaño que se elija para la etapa de pruebas en campo.

3.1.1. Ubicación de los espejos

a) Espejo 1: Se elige el intervalo correspondiente a la franja horaria de las 9:00 a las 10:08 de la mañana. El espectro de incidencia de radiación presenta una apertura desde 30° a 45°. Para que actúe la reflexión de un rayo central de dicho flujo en el centro del tubo conductor, deberá incidir en un espejo plano cuya normal n determine el ángulo de reflexión para dicho rayo. De esta manera, empíricamente, se asume que el flujo hará lo propio en todo el plano. Es decir, actuará el 1er. espejo para el intervalo en cuestión. En el esquema siguiente (Figura 7), se puede observar esta situación. El ángulo del plano de este espejo es, con respecto a la vertical, de 6° con un ancho de 10 mm.

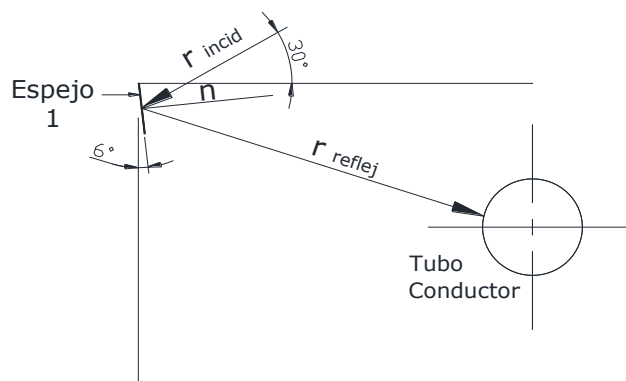


Figura 7: Determinación del plano de espejo para el Intervalo 9:00 a 10:08

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Se indica a continuación, para el flujo incidente en el plano del espejo de la franja descrita, su reflexión en el Tubo, asumiendo idéntico comportamiento para el resto de los espejos (Figura 8).

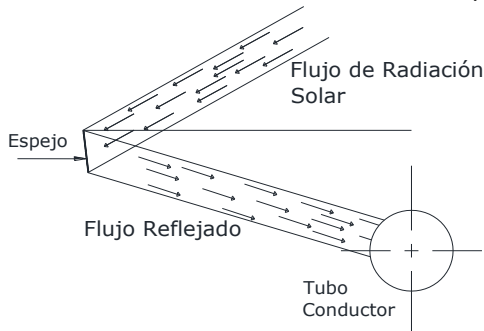


Figura 8: Incidencia del flujo de radiación en el espejo

b) Espejo 2: Franja horaria de las 10:08 a 11:16: El espectro de incidencia de radiación tiene una apertura desde 45° a 60° . Con idéntico razonamiento que para el ejercicio anterior, se procede a determinar la ubicación del espejo correspondiente a la 2da. Posición del flujo de radiación para dicho intervalo (Figura 9).

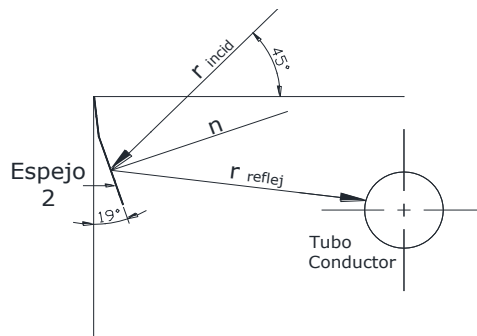


Figura 9: Determinación del plano del espejo para el Intervalo 10:08 a 11:16

c) Espejo 3: Franja horaria de las 11:16 a 12:24: El espectro de incidencia de radiación tiene su apertura desde 60° a 75° . Como en el ejercicio anterior, se procede a determinar la ubicación del espejo correspondiente a la 3ra. Posición del flujo de radiación para dicho intervalo (Figura 10).

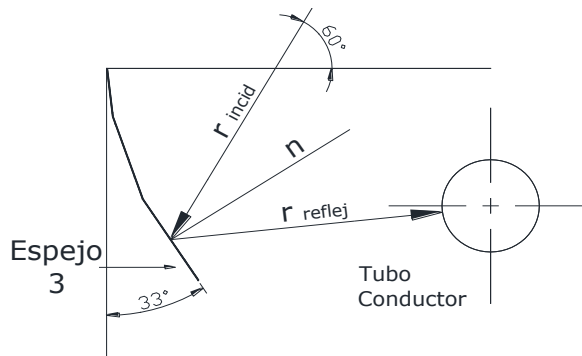


Figura 10: Determinación del plano del espejo para el Intervalo 11:16 a 12:24

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

d) Espejo 4: Franja horaria de las 12:24 a 13:32: El espectro de incidencia de radiación tiene ahora una apertura desde 75° a 90° . Como en el ejercicio anterior, se procede a determinar la ubicación del espejo correspondiente a la 4ta. Posición del flujo de radiación para dicho intervalo (Figura 11).

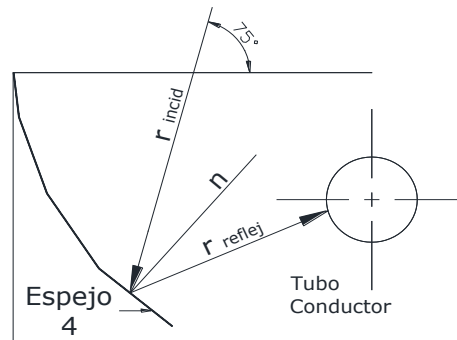


Figura 11: Determinación del plano del espejo para el Intervalo 12:24 a 13:32

e) Espejo complementario: a continuación del 4to espejo, se adiciona el 5to (complementario) a los fines de cerrar la envolvente (Figura 12)

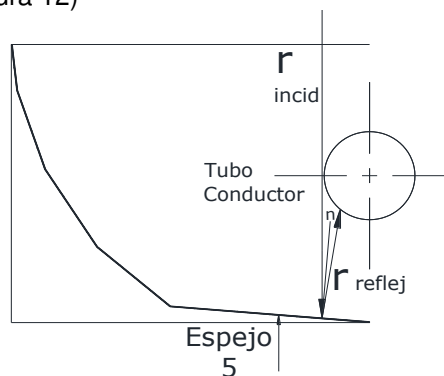


Figura 12: Espejo Complementario

3.1.2. Construcción de la Envolvente:

Con las ubicaciones y posiciones angulares de los espejos correspondientes al período A, con sus intervalos respectivos, se procede, por simetría con respecto al eje del tubo conductor, a completar la envolvente de los espejos, considerando que para el período B se deben cumplir las mismas condiciones de reflexión de la radiación incidente para dicho período. El esquema siguiente (Figura 13), muestra tal configuración.

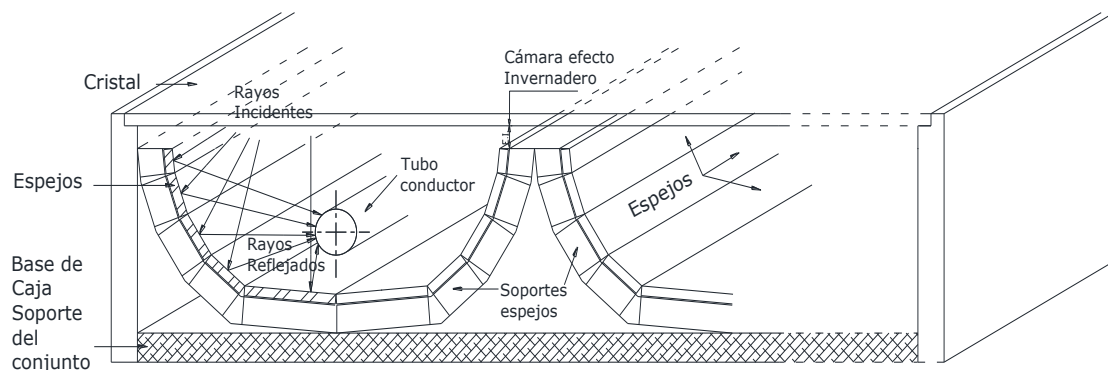


Figura 13: Envolvente especular propuesta



4. Determinación de la ordenada al origen para el Tubo Conductor

4.1.1. Consideraciones previas

Hasta ahora se han llevado a cabo los análisis pertinentes a la determinación de la envolvente especular a partir de una dada ubicación del tubo conductor del fluido a caldear.

Esta posición quedaba fijada en virtud de la presentada a través del experimento que da origen a este proyecto, tal como fue expresado al comienzo. Resta a partir de ahora, hallar su óptima localización *en altura* respecto a su eje vertical.

Se define el lugar geométrico de mayor densidad de flujo de radiación, aquel en el que se obtiene el mayor aprovechamiento de la energía radiante incidente en el tubo conductor.

4.1.2. Elección del lugar geométrico

La Probabilidad y Estadística ofrecen herramientas que consideramos necesarias y suficientes para el cálculo del espacio buscado.

Esto establece como premisa la identificación de intervalos de ordenadas a lo largo de la línea central, determinados por la reflexión de radiación correspondiente a distintos ángulos de incidencia. Se ha ampliado, en consecuencia, el número de intervalos con respecto a los tomados para el posicionamiento de los espejos, en función de ángulos que se hallan incluidos en los 15° adoptados al principio. Ascende a 45 dicha cantidad.

a) Definición de muestras

Para cada ángulo de incidencia adoptado, por ej. 35°, se establecen de acuerdo a cada intervalo de tiempo y el correspondiente espejo, muestras de rayos con sus elementos iniciales y finales respectivamente. Es decir, cada espejo aporta un espectro de radiación con una amplitud determinada.

b) Definición de distancias de localización del tubo sobre el eje de simetría

Dadas las muestras de rayos de cada espejo, se determinan las ordenadas al eje de simetría del tubo conductor, provistas por la intersección de los rayos con dicho eje. Habrá entonces intervalos de distancias correspondientes a cada intervalo de radiación. Estas distancias se toman desde la base de la envolvente hasta la intersección de cada rayo reflejado, correspondiente a cada extremo del intervalo considerado. Vemos en la figura siguiente la situación descripta.

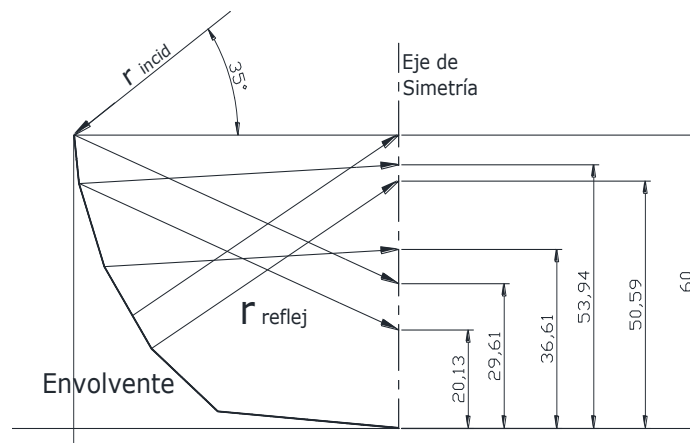


Figura 14: Determinación de muestras de rayos para distintos ángulos de incidencia

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

c) Definición de los intervalos de Distancias para cada intervalo de radiación

Como vemos en la figura anterior, los valores {20,13; 29,61} (medidas en mm), corresponden a puntos de reflexión mínimos y máximos para el espejo 1, dentro del período 9:00 a 10:08 Hs, y un ángulo de incidencia de 35°. Los valores {36,61; 53,94}, pertenecen a otro espejo, el mismo ángulo de incidencia y período horario. Luego, así quedarán definidos todos los intervalos de distancias que los reflejos de cada espejo generen a distintos períodos horarios, y en distintos ángulos de incidencia.

En consecuencia, los intervalos quedan definidos de la forma

$$\{di; df\}$$

Esto es, distancias inicial y final respectivamente.

d) Conceptos estadísticos

Sea el conjunto $X (X_1, X_2, \dots, X_n)$ valores de la variable para cada intervalo de distancias de ubicación del tubo a lo largo del eje de simetría de la envolvente. Así tendremos la variable X_1 definida para uno de ellos a un cierto ángulo de incidencia, por ejemplo 35° correspondiente al espejo 1; X_2 será para el espejo 2, y así sucesivamente.

El criterio seguido es determinar mediante cálculos estadísticos, con todas las variables en juego, cuál es el punto, en el eje analizado, de mayor densidad de radiación alcanzado; será esa entonces, la posición exacta del tubo conductor. En términos probabilísticos, será la altura "media"

El *Teorema Central del Límite* (TCL), establece que *la suma de un número grande de variables aleatorias será aproximadamente distribuida normal, independiente de la distribución individual de las variables aleatorias.* [2]

La distribución normal nos ofrece un conjunto importante de herramientas de cálculo. No obstante, a esta altura estaríamos en condiciones de decir que con determinar las frecuencias acumulativas de la variable dada y efectuando simples cálculos matemáticos, hallaríamos la solución a nuestro problema.

4.1.3. Determinación de valores medios de los intervalos

a) Búsqueda de la solución mediante software matemático

Con los intervalos definidos, se procede al cálculo de la "clase" –media aritmética–, de cada uno; éstas serán variables aleatorias normales para el cálculo de la media poblacional y su desvío estándar.

De acuerdo al TCL, y al cálculo estadístico, empleamos la Herramienta informática Wolfram Mathematica Versión 8.0. [3]

Para su operación, es necesario especificar la frecuencia de la variable. Tal la situación planteada, de acuerdo a un espectro de radiación, para un horario determinado, y por cada espejo de reflexión, se cuenta con frecuencias unitarias.

El cálculo interno del sistema es para esta etapa muy simple, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Clase de Intervalo: } bi = (di + df)/2 \quad (2)$$

En la tabla 2, se detallan los valores medios hallados, los que servirán como argumentos para cálculos posteriores.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Tabla 2. Intervalos de Muestras, clases y frecuencias

Intervalo {di; df}	Clase (bi)	Frecuencia (f)	Intervalo {di; df}	Clase (bi)	Frecuencia (f)
27,4 – 36,99	32.195	1	11,94 – 13,53	12.735	1
42,6 – 60	51.3	1	45,05 – 49,37	47.21	1
20,13 – 29,61	24.87	1	0 – 8,69	4.345	1
36,61 – 53,94	45.275	1	12,28 – 28,29	20.285	1
12,33 – 21,69	17.01	1	27,55 – 49,25	28.4	1
30,99 – 47,49	39.24	1	5,05 – 16,42	10.735	1
3,84 – 13,07	8.455	1	7,22 – 22,27	14.745	1
24,72 – 41,03	32.875	1	21,90 – 41,53	31.715	1
38,20 – 59,15	48.675	1	19,13 – 21,60	20.365	1
18,59 – 34,36	26.475	1	14,52 – 24,89	19.705	1
32,65 – 52,55	42.6	1	2,03 – 16,09	9.06	1
6,76 – 14,63	10.695	1	18,63 – 37,06	27.845	1
12,25 – 27,48	19.865	1	24,79 – 26,75	25.77	1
27,37 – 46,27	36.82	1	25,12 – 34,36	29.74	1
17,73 – 25,24	21.485	1	0 – 9,63	4.815	1
5,57 – 20,22	12.895	1	14,62 – 31,58	23.1	1
22,41 – 40,36	31.385	1	0 – 60	30	2
38,49 – 60	49.245	1	17,53 – 18,72	18.125	1
30,29 – 37,39	33.84	1	14,98 – 17,53	16.255	1
0 – 12,42	6.21	1	37,24 – 41,93	39.585	1
17,27 – 34,23	25.75	1	0 – 8,65	4.325	1
32,68 – 56,27	44.475	1	10,79 – 26,34	18.565	1

4.2. Cálculos finales

a) Determinación de valores de Media y Desvío Estándar Poblacional

Usando la misma herramienta para el cálculo de los estimadores estadísticos, arroja los valores siguientes de:

$$\begin{aligned} \text{Media Poblacional } \mu &= 25,5347 \text{ mm} \\ \text{Desvío Estándar Poblacional } \sigma &= 1,96494 \text{ mm} \end{aligned}$$

b) Definición del intervalo de Confianza para una probabilidad del 97,5%

Trabajando con la Tabla de Distribución Normal Estandarizada, y de acuerdo a la fórmula

$$z = (X - \mu) / \sigma \quad (3)$$

El valor de z encontrado para una Probabilidad mayor al 97,5% de hallar la variable es de 1,96.

Con lo cual, el Intervalo de Confianza queda expresado de la forma:

$$IC_{\mu} = \{ [\mu - (1,96 \cdot \sigma)] ; [\mu + (1,96 \cdot \sigma)] \} = \{ 21,6834 ; 29,3859 \} \quad (4)$$

c) Gráfica de Función de Distribución para la variable con los valores hallados

De acuerdo al I.C. determinado, la función de Distribución representa la mayor concentración de valores de la variable X (mayor densidad de flujo), en la posición buscada del tubo conductor (Figura15).

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

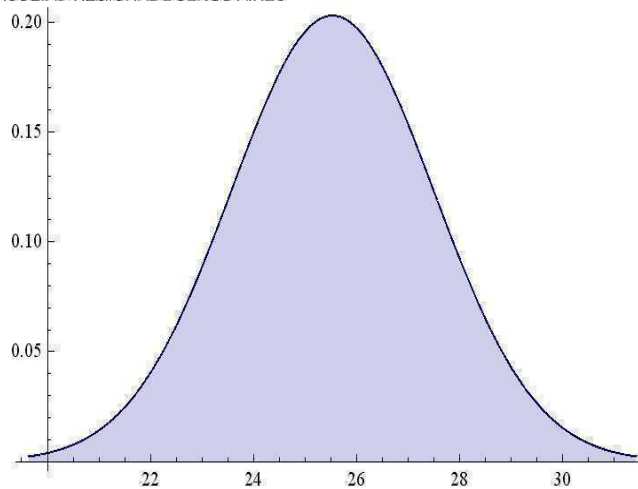


Figura 15. Distribución Normal de la Media Altura del Caño Colector

El sistema de cálculo ha determinado que la mayor densidad se da para valores $25 < \mu < 26$ mm, y los muestra en sentido "x".

4.2.1. Valor final: posición del centro del Tubo Conductor

La herramienta de cálculo, finalmente, determina el valor de la ordenada al origen respecto al eje de simetría planteado, lo que, conforme la construcción propuesta, es la altura *media* a la que se ubica el centro del tubo conductor, desde la base de la envolvente.

$$h = 25,5347 \text{ mm}$$

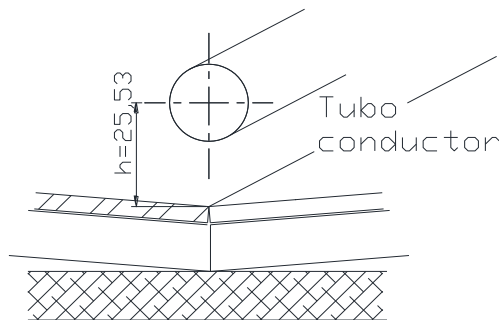


Figura 16. Altura Media del Centro del Tubo Colector

5. Evaluación Económica del producto con respecto a los artefactos de uso convencional

Se somete a consideración para la evaluación económica, el ahorro absoluto y porcentual entre el gasto de consumo de un calefactor a Electricidad y a Gas, sin y con Colector Solar, respectivamente

El estudio corresponde a un consumo de Agua Caliente Sanitaria (ACS), para una familia de 4 (cuatro) personas, en un total de 200 litros diarios, lo que lleva 73.000 litros/año. Su cálculo se ha llevado a cabo mediante la herramienta de cálculo RETscreen [4]

Fuente de poder	a) Electricidad [\$/Kw.h 0,459]		b) Gas Envasado [\$/Kg 5,04]	
	Sin Colector Solar	Con Colector Solar	Sin Colector Solar	Con Colector Solar
Gasto Energético	\$/año 1872	\$/año 460	\$/año 1417	\$/año 348
Ahorro	71%		80%	
Amortización de la Inversión en Solar	5 años		4,5 años	

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

6. Conclusiones

Este trabajo ha sido abordado con criterio empírico. A partir de una experiencia planteada con un aspecto innovador respecto a las existentes mayormente en el mercado, y por los resultados obtenidos en ella, se buscó una mejora tecnológica que brinde un rendimiento idéntico ó mayor a los del mercado, disminuyendo o eliminando la posibilidad de implementar costosos mecanismos de movimiento de paneles para el seguimiento solar –con lo que significa a la hora del diseño, y posteriores erogaciones–, que en suma pueden tropezar con el inconveniente de no ser “vendible”. Otra característica de la propuesta radica en su practicidad, racionalidad y confiabilidad con respecto a la anterior, por los materiales, construcción, y comportamiento aparente.

La diferencia se fue notando a medida que se llevaban a cabo cada una de las determinaciones, ya que se tuvo que ir planteando los intervalos de radiación para conseguir un modelo confiable. Asimismo, la sensibilidad del sistema de cálculo se pudo evidenciar en función de los desplazamientos del tubo conductor a lo largo del eje de simetría de la envolvente.

Tal los valores hallados, y el diseño acordado, se puede afirmar que el trabajo a seguir será el de llevarlo a la práctica para obtener mediante las pruebas la seguridad de su buen funcionamiento.

7. REFERENCIAS.

- [1] Halliday, David; Resnick, Robert; Krane, Kenneth (1996). *Física Vol 2*. México. 2da. Reimpresión. Editorial: CECSA
- [2] Bowker, Albert H.; Lieberman, Gerald. (1981). *Estadística para Ingenieros* Madrid 12, España. Editorial Dossat, S.A
- [3] Carnevali, G; Franceli, E; Gervasoni, G. (2010). Publicación: “Probabilidad y Estadísticas” UTN Rosario. *Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina*
- [4] RETscreen: herramienta de cálculo informático de origen canadiense retscreen.net capaz de resolver funciones relacionadas con temas de energía renovable

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a autoridades de la Facultad Regional Reconquista de la Universidad Tecnológica Nacional por su apoyo prestado, su prestancia para todo lo que hemos requerido y seguramente así será en adelante para lo que sea pertinente. Entre ellos, figuran:

- Dra. Sandra Mendoza, Jefa del Departamento de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Reconquista (UTN)
- Ing. Julio Doyharzábal, Docente Investigador de la Facultad Regional Santa Fe (UTN)
- Ing. Martín, Héctor, Director del Grudim (Grupo de Investigación Mecánica) – FRRqta (UTN) –
- Sr. Walter Soto, coordinador operativo del Grudim –FRRqta, (UTN) –



Diseño conceptual y desarrollo de una caldera solar autónoma para uso domiciliario.

Zambrano, Daniel ^(1,2,3), Morón, Ignacio⁽¹⁾

(1) Instituto de Industria (IDEI), Universidad Nacional de General Sarmiento.
J. M. Gutiérrez 1150. Los Polvorines. Prov. Bs. As. Argentina. dzambran@ungs.edu.ar

(2) Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas. Universidad Argentina de la empresa. Lima 775.
CABA. Argentina. dzambrano@uade.edu.ar

(3) Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. Paseo Colón 850. CABA. Argentina.
dzambrano@uade.edu.ar

RESUMEN.

El presente trabajo se orienta al aprovechamiento de energías renovables como fuente para reemplazar o complementar el consumo de energías no renovables. Se desarrolló el diseño de una caldera solar autónoma y adaptable a sistemas de calentamiento de agua preexistentes tradicionales, teniendo como objetivo economizar la energía consumida de un termotanque ordinario [1]. El trabajo se centra en dimensionar y diseñar una caldera solar con espejo parabólico, para calentar agua de uso sanitario que permita satisfacer las necesidades básicas de una vivienda [2]. Para el diseño se ha tenido en cuenta la necesidad de obtener un producto integrado, de tal forma que contenga todos los elementos necesarios para el funcionamiento en una sola plataforma. Para ello se diseñaron y dimensionaron los componentes para obtener una distribución óptima de la instalación. El sistema posee un receptor parabólico que concentra la energía solar en el foco [3] donde se encuentra un intercambiador de calor, a través del cual se transmitirá la energía térmica al agua sanitaria. Luego de algunos estudios se concluye, que el sistema debe utilizarse como parte de un sistema híbrido (solar convencional), debido a la limitada capacidad de acumulación de energía. De acuerdo a éstas limitaciones se dimensionaron los componentes obteniéndose la máxima capacidad de respuesta del sistema teniendo en cuenta los distintos factores de rendimiento inherentes al proceso. Tratándose del aprovechamiento de energía solar, el análisis se desarrolló teniendo en cuenta los posibles emplazamientos geográficos, analizando los diferentes rendimientos y seleccionando zonas favorables para la implementación del sistema.

Palabras Claves: caldera solar, agua de uso sanitario, ACS.



1. INTRODUCCIÓN

El consumo masivo de hidrocarburos está produciendo alteraciones de la atmósfera a nivel mundial. Los niveles de dióxido de carbono (CO₂) que se detectan actualmente son significativamente mayores que los que existían en 1950. Esto produce el conocido efecto invernadero, que provoca el incremento en las temperaturas promedio mundiales. Los combustibles fósiles son también causantes de la lluvia ácida, que origina grandes daños al suelo y por lo tanto a la flora y la fauna. Tanto por razones económicas como ecológicas, es imperativo el desarrollo de nuevas alternativas energéticas que sean menos agresivas para el medio ambiente. El agua caliente constituye un consumo energético importante en una vivienda teniendo diversos usos como la higiene personal y la limpieza, donde a nivel mundial se ha convertido en el segundo uso energético doméstico en importancia después de la calefacción y la refrigeración. Por esta razón, el calentamiento de agua mediante energía solar, más allá de ser una alternativa ecológica, se ha convertido en una tecnología económicamente atractiva y competitiva en muchos países. En los últimos años se está produciendo un aumento notable de instalaciones de energía solar térmica en el mundo; los avances tecnológicos permitieron la fabricación de sistemas de mejor calidad y a menor costo y la sociedad está entendiendo la necesidad de sustituir los combustibles fósiles. El uso de sistemas complementarios para la sustitución parcial de energías convencionales, es un camino válido para mejorar la calidad de vida. En este proyecto se analiza la posibilidad de sustituir parte de la energía convencional utilizada para calentar agua de uso sanitario en los domicilios particulares, por una fuente alternativa que utilice energía renovable. Teniendo en cuenta estas pautas se ha diseñado un sistema autónomo que permitirá complementar y sustituir la energía que hoy se destina a este efecto. Partiremos de desarrollos ya realizados en la universidad [3] y trabajos similares [1].

2.1. La energía solar y su aprovechamiento.

El aprovechamiento energético está condicionado por la intensidad de radiación solar recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas del lugar. Definimos como energía solar a aquella que mediante la conversión a calor o electricidad se aprovecha de la radiación proveniente del sol. Otra forma de aprovechamiento asociado considera la posibilidad de hacer uso de la iluminación natural y las condiciones climatológicas de cada emplazamiento en la construcción de edificios mediante lo que se denomina arquitectura bioclimática. Desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de $5,6 \times 10^{35}$ GeV, y de ella la tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de $1,73 \times 10^{14}$ kW, o sea $1,353 \text{ kW/m}^2$, que se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa entre $\pm 3\%$ debido a la variación periódica de la distancia Tierra Sol [4]. La atmósfera y la superficie terrestre se encuentran a temperaturas medias distintas y, por lo tanto también irradian energía. Así, la longitud de onda de la radiación solar está comprendida entre, $0,05 \mu\text{m}$ y $4 \mu\text{m}$, es decir, se trata de emisiones de onda larga. Los $1,73 \times 10^{14}$ kW de energía solar que inciden sobre la Tierra, se reparten en la siguiente forma:

- Energía solar reflejada por la atmósfera hacia el espacio exterior: 30% ; $0,52 \times 10^{14}$ kW.
- Energía solar que se utiliza para calentar la atmósfera: 47% ; $0,80 \times 10^{14}$ kW.
- Energía solar que se utiliza en la evaporación de los océanos: 23% ; $0,40 \times 10^{14}$ kW.
- Energía solar que se utiliza en generar perturbaciones atmosféricas, como el viento: $0,0037 \times 10^{14}$ kW.
- Energía solar utilizada en la fotosíntesis: $0,0004 \times 10^{14}$ kW.

De lo anterior se deduce que el 47% de la energía solar incidente alcanza la superficie terrestre, de forma que el 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser difundida por el polvo, vapor de agua y moléculas de aire, el resto de la energía solar, el 53%, no alcanza la superficie de la Tierra, ya que un 15% es absorbida por la troposfera (agua, ozono y nubes), un 23% es reflejada por las nubes, un 7% es reflejada por el suelo, el 2% es absorbida por la estratosfera, principalmente por el ozono y el 6% restante es la energía difundida por la atmósfera [4]. La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la



atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000 W/m^2 en la superficie terrestre. A esta potencia se la conoce como irradiancia. La heliofanía representa la duración del brillo solar u horas de sol, y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliofanógrafo, registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa. La ocurrencia de nubosidad determina que la radiación recibida por el instrumento sea radiación solar difusa, interrumpiéndose el registro. Por lo tanto, si bien hay energía incidente disponible, la concentración o densidad de la misma no es suficiente para ser registrada.

2. DESARROLLO

Con el fin de remplazar como fuente calórica al gas o a la electricidad, para calentar el agua de uso sanitario, en este trabajo se propone la utilización de un sistema de calentamiento solar. Para ello se analizaron diferentes configuraciones de sistemas que permiten la utilización de estas fuentes alternativas, para entonces proponer un sistema que debe desarrollarse tanto en su faz técnica como económica.

Dentro de los parámetros utilizados para la elección del sistema más adecuado, nos hemos propuesto como objetivo diseñar y dimensionar un sistema de aprovechamiento energético que pueda funcionar en forma autónoma y como un solo bloque constructivo utilizando la energía solar térmica y que además pueda complementarse e integrarse al sistema tradicional para calentamiento de agua sanitaria (ACS), funcionando como economizador de la energía eléctrica o GAS consumida por un termo tanque ordinario, consiguiendo de esta forma un sistema "híbrido".

Desde su primera invención, hace 120 años, se han desarrollado diversas formas de colectores solares térmicos, que van de los colectores planos a los colectores parabólicos y heliostatos. Se estima que en todo el mundo, el área instalada de $58 \times 10^6 \text{ m}^2$

En Argentina el uso de colectores solares [5] con este fin es muy bajo en contraste con otros países como los europeos y China. En la zona central y norte de la Argentina el clima es relativamente benigno, pero en los meses invernales y algunos días de otoño y primavera es necesario proveer calefacción para brindar mínimas condiciones de confort en las viviendas.

Dadas las variaciones climáticas que ocasionan secuencias de varios días nublados y/o muy fríos, no es posible cubrir el 100 % de la energía necesaria para calentar agua mediante energía solar únicamente y es necesario proveer un porcentaje de la demanda con otro tipo de energía. En general, las dificultades para proveer energía calórica se magnifican en las regiones alejadas de los grandes centros poblados, en donde no llega la red de gas natural y peor aún en lugares aislados donde además no existe la posibilidad de disponer de energía eléctrica.

2.1. Colector solar convencional

Dentro de los sistemas existentes para el calentamiento de agua mediante energía solar podemos analizar el sistema de colector convencional [6]. En este sistema (Figura 1), se utiliza un colector solar convencional integrado al sistema de calefacción existente, incorporando un intercambiador de calor intermedio. Esta configuración permite el uso de sistemas de paneles solares en circuito cerrado de agua y utiliza un intercambiador de calor, para transferir la energía térmica al agua que será utilizada con destino sanitario. Permite además la conexión al sistema de calentamiento existente, sea esta un simple calefón o una caldera. En general estos sistemas poseen una bomba de circulación.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

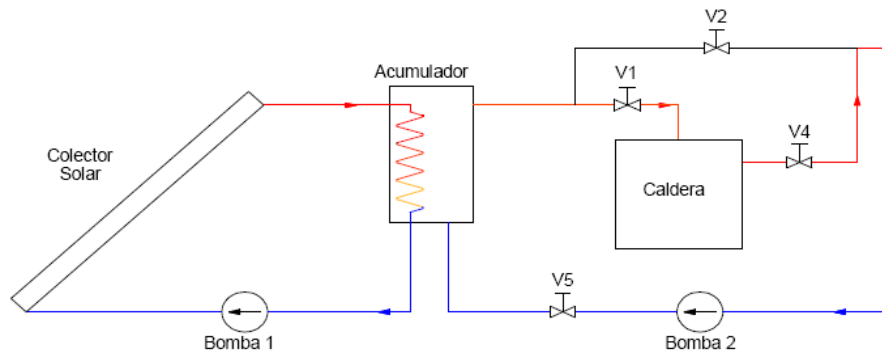


Figura 1. Sistema "convencional" con acumulador-intercambiador

En esta aplicación (Figura 1), se precalienta agua de una caldera utilizando un acumulador que funciona como intercambiador de calor. La Bomba 1 recircula el fluido que transporta la energía recibida del sol. Este fluido por medio del calentador que está ubicado en el concentrador solar recibe la energía proveniente del sol por conducción y convección. El calor una vez transferido al acumulador calienta el agua apta para consumo que ingresa por la válvula V5 mediante la Bomba 2 y entra a la caldera por medio de la válvula V1 precalentada. Este fluido que llega con cierta temperatura T_e , hace que la caldera trabaje en un régimen menor al normal disminuyendo el consumo de gas entre un 10% a un 15%.

En los calentadores solares convencionales, al estar fijos respecto a la tierra, puede demostrarse que las placas absorbedoras disminuyen su eficiencia por no poseer un mecanismo que acompañe la trayectoria solar durante el día y recibir así los rayos solares en forma directa (radiación directa). La incidencia directa varía también según la época del año. A continuación, en la (Figura 2) se muestra el cambio de trayectoria de un punto fijo sobre la corteza terrestre en los diferentes meses del año.

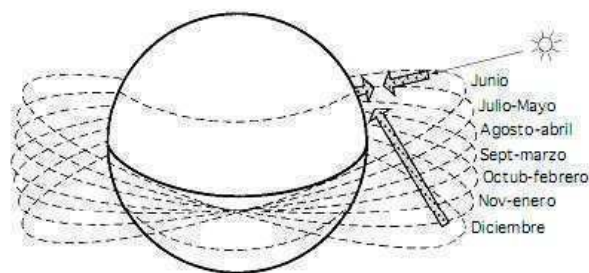


Figura 2. Trayectorias de un punto fijo en la corteza terrestre según diferentes épocas del año

Debido a estas variaciones y teniendo en cuenta que la potencia disponible que varía con el ángulo de incidencia, se observa que podría mejorarse el sistema desarrollando un colector solar que disponga de un sistema de seguimiento que acompañe la trayectoria del sol durante el día y así captar de forma más eficiente la radiación directa. Este dispositivo podría aumentar el rendimiento del sistema respecto a los paneles solares convencionales entre un 30% y un 40%. Para resolver cuestiones de autonomía de la instalación y disminución de pérdidas de calor, se diseñará un equipo compacto que no solo permita mantener la perpendicularidad de los rayos solares sobre la superficie de incidencia, sino que además acompañará al sol en su recorrido azimutal y cenital. Este equipo estará integrando en una sola unidad, el sistema convencional de calentamiento, lo que permitirá una disponibilidad de agua caliente aún en tiempo frío, sin sol o en las noches. El sistema de seguimiento solar, no es motivo del presente desarrollo. Dentro del grupo de investigadores de la universidad, existe un proyecto paralelo que está desarrollando este dispositivo [7].

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



2.2. Diseño de un sistema con concentrador.

Teniendo en cuenta las necesidades planteadas y los desarrollos ya realizados en la universidad [3], se establecieron algunos objetivos que debe cumplir el diseño. En primera instancia el sistema debe calentar agua apta para consumo sanitario, estimándose una temperatura de 40 °C satisfactoria para este uso. El sistema debe aprovechar la energía solar térmica y poseer la capacidad de almacenar dicha energía, lo que permite un uso continuo. Dado que será utilizado en forma autónoma debe contar con los dispositivos de seguridad necesarios y responder a demandas de agua caliente durante el día o la noche. El sistema estará preparado para utilizar otro tipo de energía (eléctrica o gas) cuando la energía solar térmica no sea suficiente para satisfacer la demanda, respondiendo entonces al concepto de diseño "híbrido". Estas pautas nos llevaron al diseño de un sistema que permita concentrar los rayos solares en un área pequeña, pero que permita mantener su posición relativa al sol en forma constante, aprovechando de esta manera mejor la radiación.

El sistema fue desarrollado utilizando un de un "receptor" parabólico (Figura 3) que concentra la energía solar térmica en un foco donde se encuentra un intercambiador de calor a través del cual circula agua sanitaria. La misma, es enviada por conductos aislados a un tanque, que llamaremos "termotanque" y luego es tomada e impulsada nuevamente para reiniciar el ciclo de calentamiento solar. Esto último se logra a través de una bomba de recirculación. Desde el exterior, el agua sanitaria fría ingresa al termotanque donde es calentada en primera instancia por energía solar de la manera indicada anteriormente, y luego atraviesa un calentador "convencional". Este último puede ser a gas o eléctrico, dependiendo de qué fuente se disponga.



Figura 3. Diseño de concentrador parabólico con calentador en foco

Esta configuración permite el uso racional y controlado de la energía convencional ya que parte del calor o toda, es aportada por el concentrador-intercambiador solar, logrando entonces una mayor eficiencia que otros métodos de calentamiento de agua. Es fundamental entonces, elaborar una estrategia de control adecuada, que permita activar los sistemas convencionales solo en el momento en que se inicia la demanda y se desactivan cuando esta culmina, evitando mantener masas de agua caliente sin responder a ninguna necesidad.

Entre el termotanque y el tipo de calentador "convencional" existe una conexión directa a través de una tubería aislada en la que se sitúa un detector de flujo que sirve para el control de la estrategia para mantener el agua a una temperatura constante. El termotanque posee un control de nivel que junto a una electroválvula de dos vías ubicada en el suministro de agua sanitaria, permite mantener el

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



volumen del fluido del termotanque dentro un rango determinado. El calentador eléctrico contará con una resistencia eléctrica, la cual aportará calor solo si la energía solar térmica acumulada no es suficiente para satisfacer las necesidades de agua a la temperatura preestablecida. El calentador a gas se activará con el mismo criterio. (Figura 4)

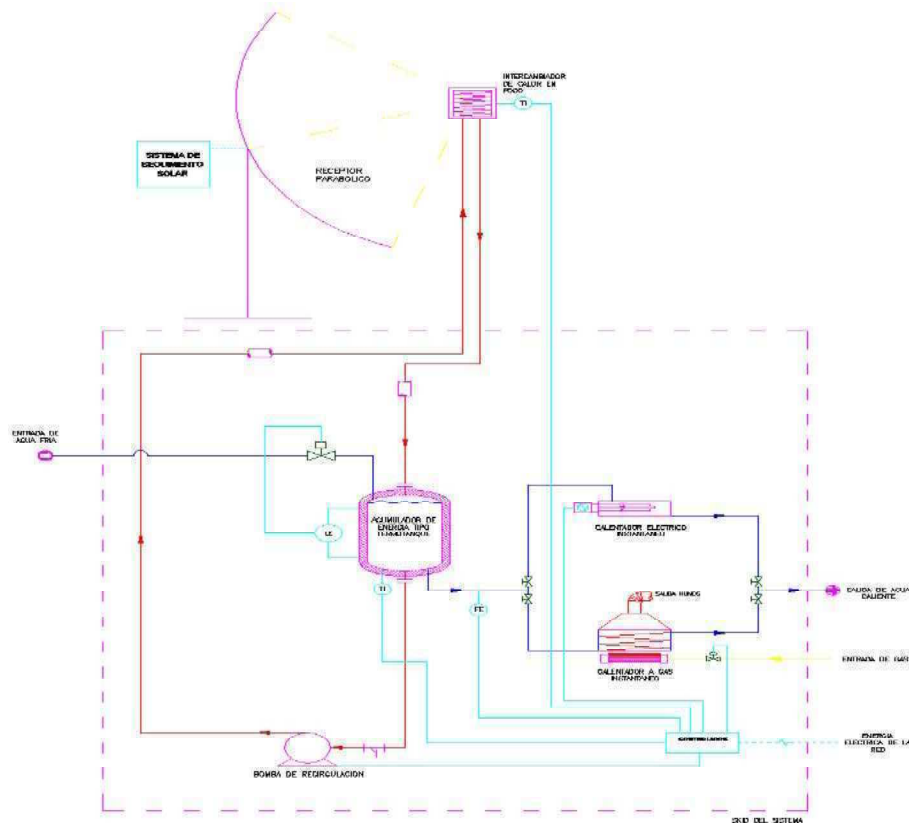


Figura 4. Esquema funcional del sistema.

El lazo que regula la potencia entregada a la resistencia eléctrica estará en función de dos variables: la temperatura de entrada del agua, la cual se tomará en el termotanque y del detector de flujo ya mencionado. Este lazo optimiza el consumo de energía eléctrica ya que la resistencia solo es activada durante la demanda de agua caliente. Por otra parte, la potencia que se entrega a dicha resistencia estará modulada en función de la temperatura del agua de entrada y del caudal del fluido en cuestión, pudiendo en algunos casos ser ésta potencia nula gracias al aprovechamiento de la energía termo solar.

El calentador a gas será un calefón convencional integrado al sistema. La cantidad de combustible quemado, y consecuentemente la energía aportada estará en función de la demanda de agua caliente y de la temperatura a la que se encuentra la misma acumulada en el termotanque. La regulación del gas se realizará a través de una válvula de control modulada por un controlador, al cual ingresan las señales de presencia de flujo y temperatura del agua acumulada, modulando de esta forma la cantidad de combustible.

Los otros lazos que se encuentran están relacionados con la desactivación parcial del proceso. Recordando que se cuenta con un sistema de seguimiento solar activo durante todo el día, se propone la desactivación del mismo en horarios establecidos para las diferentes épocas del año. Por otra parte, cuando el sensor de temperatura ubicado en el foco del primario registre un valor menor al cual no sería energéticamente rentable mantener en funcionamiento la bomba de recirculación, se indicará a la misma a través del controlador que detenga su funcionamiento. Este valor de

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



temperatura se obtendrá a través de un balance energético en el que se tendrá en cuenta la energía solar térmica captada y el consumo de la bomba de recirculación de agua sanitaria al foco. Se propone obtener los valores de temperatura para este balance de forma empírica, una vez construido el prototipo, ya que una diferencia en estimación de los mismos impactaría en la capacidad de aprovechamiento energético. Por último, a través de otro balance se estudiará la posibilidad que el volumen de agua contenido en el termotanque, tras la ausencia prolongada de la demanda, llegue a temperaturas mayores a 70° C en el interior del mismo. En esta situación será necesario retirar la fuente de calor. Esto último se llevará a cabo, nuevamente, ordenándole a la bomba de recirculación que detenga su funcionamiento, regulando así la energía térmica entregada a dicho tanque, proveniente de la fuente solar.

Respecto a la máxima capacidad de abastecimiento de agua sanitaria caliente (40° C) capaz de entregar este sistema, la misma estará supeditada por la energía que se puede captar y aprovechar con la antena disponible (Marca PRODELIN serie 1184 de 1,80 m diámetro máximo). Si bien se cuenta con el aporte de alguna energía externa, esta es solo para garantizar la máxima capacidad de abastecimiento de agua propuesto anteriormente. En proyectos futuros se podría escalar el sistema para responder a diferentes demandas o bien optar por la implementación de más de un equipo de los aquí diseñados. Se puede concluir entonces que el sistema descrito cumple con los objetivos del diseño establecidos. (Figura 5).

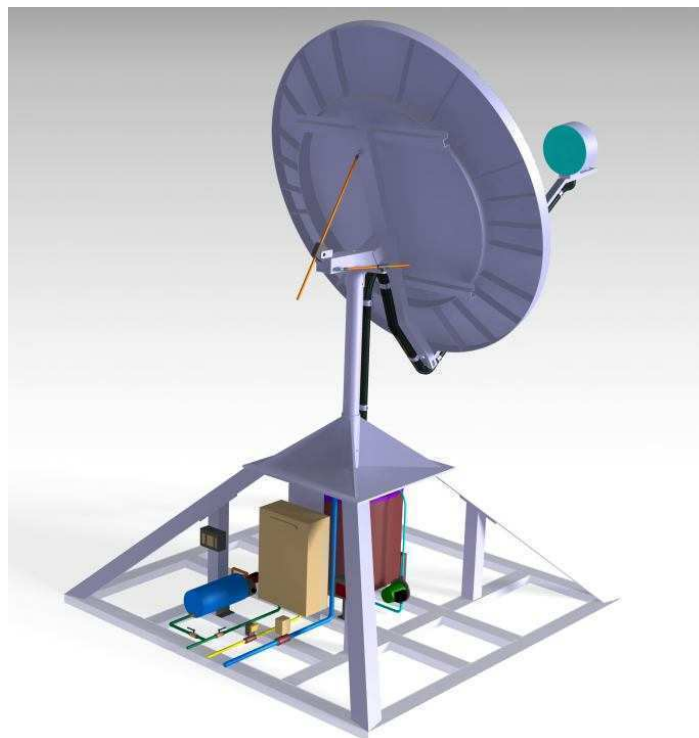


Figura 3. Vista del sistema compacto "híbrido" con sus componentes y concentrador solar

2.3. Cálculo teórico de componentes del sistema.

En base al concepto establecido, es necesario desarrollar el cálculo teórico en base a las condiciones termodinámicas de cada uno de los componentes, para determinar dimensiones, capacidades, funcionamiento y geometría definitiva del conjunto. Para la determinación de la geometría de los componentes, es necesario establecer sus características en cuanto a eficiencia e intercambio de calor. Para ello se realizó un balance de energía. La mayor parte de los procesos se realizan en forma continua, por lo que interesa referirse a la transferencia de calor por unidad de tiempo. Las ecuaciones que se describirán a continuación están asociadas a los balances de calor. Permiten calcular la cantidad de calor que debe ser transferida para lograr una determinada condición de



proceso sobre las corrientes que participan en el intercambio. Son ecuaciones que están asociadas a un planteo exclusivamente termodinámico del problema, y son totalmente independientes del diseño del equipo en el que se concentrará el proceso.

Llamaremos W al flujo másico (kg/s) de una corriente. El subíndice h indicará al fluido caliente y la c designará al fluido frío (del inglés hot -cold). También, el subíndice 1, indicará condiciones de entrada de al equipo, mientras que el 2 indicará condiciones de salida. Al referirnos a temperaturas, para economizar subíndices, se empleará la letra T para las temperaturas del fluido caliente, mientras que t designará la temperatura del fluido frío. Llamaremos Q a la cantidad de calor intercambiada por unidad de tiempo (J/s). Si una corriente caliente cede calor a un medio que lo recibe, sufrirá una disminución de su entalpía y será:

$$Q = W_h (i_{h1} - i_{h2}) \quad (1)$$

Donde i es la entalpía específica (J/kg). Si dicho fluido experimenta un enfriamiento sin cambio de fase, la diferencia de entalpía puede expresarse como:

$$i_{h1} - i_{h2} = c(T_1 - T_2) \quad (2)$$

Donde c indica calor específico (J/kg K). Se puede decir entonces que:

$$Q = W_h c_h (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Existen otras consideraciones que se aplican cuando en el proceso intervienen cambios de fase, pero no serán de nuestra aplicación. Para que pueda realizarse una transferencia de calor entre dos fluidos es necesario que exista una diferencia de temperatura entre ellos. Cuanto mayor sea esta diferencia de temperaturas, tanto mayor será la velocidad de transmisión de calor. Además ambos fluidos deben estar separados por una superficie a través de la cual pueda transferirse calor. A superficie se la llama área de transferencia A . Por ejemplo, si uno de los fluidos circula por el interior de un tubo, y el otro se encuentra en el exterior del mismo, el área de transferencia será el área lateral del tubo. Cuanto mayor sea el área de transferencia entre dos fluidos mayor será la cantidad de calor que puede transferirse por unidad de tiempo entre ellos. Por ello es válida la siguiente expresión:

$$Q = U . A . \Delta T \quad (4)$$

Donde la constante de proporcionalidad U recibe el nombre de coeficiente global de transmisión de calor, y ΔT es la diferencia de temperatura entre los dos fluidos. La ecuación anterior es una ecuación cinética de transferencia de calor. La misma permite calcular el área de equipo necesaria para lograr la transferencia de calor Q entre dos corrientes cuya diferencia de temperatura es ΔT . Esta área depende del coeficiente de transferencia U , el cual puede variarse modificando las características de diseño del aparato. El objetivo básico de diseño, será lograr el mayor valor posible del coeficiente U que sea compatible con las restricciones impuestas por el proceso. En todo problema de diseño de equipos de intercambio de calor participan los dos tipos de ecuaciones expuestas (3) y (4), es decir que siempre habrá que combinar una ecuación de balance con una ecuación cinética, que será en definitiva la que permita decidir si el área del equipo es suficiente para cumplir con el objetivo deseado. Debería plantearse las ecuaciones que permiten calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor U . El mismo se calcula en función de los coeficientes peculiares. En el presente trabajo se adoptará para el mismo un valor extraído de tabla, proveniente de estudios y ensayos del CENSOLAR del CONICET, que servirá para realizar las primeras estimaciones del proceso. Luego, una vez construido el prototipo, se podría obtener empíricamente este coeficiente a través de un análisis del rendimiento del sistema.

El balance de energía de un colector solar tipo paraboloide, como el que disponemos para este trabajo, se puede representar a través de la siguiente ecuación:



$$Q_{abs} = Q_u + Q_L + dU/dt \quad (5)$$

Donde:

Q_{abs} : es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector /intercambiador (W).

Q_u : el calor útil que finalmente se transfiere en fluido de trabajo (W)

Q_L : las pérdidas de calor hacia los alrededores por radiación, convección y conducción (W)

dU/dt : la rapidez de el cambio de energía interna almacenada en el colector (W), este valor es generalmente muy pequeño por lo que se despreciará en el cálculo.

Haciendo un desglose más detallado de los términos de la ecuación anterior, encontramos que cada uno de ellos puede ser representado por otra ecuación:

$$Q_{abs} = H_T \cdot A_c \cdot \alpha \cdot \beta \quad (6)$$

$$Q_u = m \cdot C_p \cdot dT / dt \quad (7)$$

$$Q_L = U_{LA} \cdot c \cdot (T_{pm} - T_a) \quad (8)$$

Siendo:

H_T : la energía solar incidente en el intercambiador (W/m²), este valor estará en función de la energía Solar disponible durante el día, el área del colector parabólico y el área del foco donde se concentra la energía termo solar para ser aprovechada en el proceso.

α : factor de concentración

A_c : el área efectiva del foco (m²).

β : el producto de la transmitancia del vidrio y la absortancia del tubo del intercambiador de calor situado en el foco, presenta la fracción de la radiación solar que es absorbida por el intercambiador de calor. Este valor es inherente a los materiales utilizados en el intercambiador de calor situado en el foco.

mC_p : la capacidad calorífica del fluido de trabajo (J/°C).

U_L : coeficiente de pérdidas (W/m²°C)

Sustituyendo en las ecuaciones (5),(6), (7), (8) y reordenando las mismas

$$Qu = Ac [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (9)$$

Donde $S = H_T \cdot \alpha \cdot \beta$, o sea, la energía disponible en el intercambiador por unidad de área.

Esta ecuación es fundamental en el análisis del funcionamiento del colector solar. El único problema es que el calor útil queda en función de la T_{pm} (Temperatura media de la placa de absorción, o en nuestro caso los tubos de absorción) que es difícil de calcular o medir, debido a que está en función del diseño del intercambiador y de variables que cambian continuamente con el tiempo como la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al entrar al colector. Para sortear esta dificultad se adoptarán valores que permitan hacer el cálculo, nuevamente, desde una posición conservadora.

2.3.1 Desarrollo de cálculo inicial. Determinación previa.

Para los cálculos preliminares se han tenido en cuenta las ecuaciones anteriores y los valores surgidos de tablas y mediciones. Se utilizará H : 1000 (W/m²), se considera la superficie de la antena parabólica colectora: 2,8 m², siendo entonces la energía total captada: 2800 W mientras que

S_f : superficie del foco en la que se concentra la energía captada por la antena: 0,07 m²

Se tomara α : factor de concentración en foco = 0,75, con este valor contemplamos las pérdidas debidas a la irregularidad de la superficie reflectante que se traducirá en la desviación de los haces solares, dejando los mismos de converger en el foco y perdiendo parte de la energía captada en la



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

antena. Con este valor también se contempla la difusión de los mismos rayos en la atmósfera que está interpuesta entre el colector parabólico y el foco concentrador y también el posible corrimiento del foco real respecto al foco ideal.

Ac: área efectiva del intercambiador de calor = $0,07 \text{ m}^2$. Si bien la geometría del mismo ofrece un área mayor a la indicada, se utiliza para los cálculos el área máxima limitada por la superficie de concentración del foco donde se encuentra el intercambiador. Si la geometría del intercambiador ofreciera un área menor a la mencionada, se tendría que utilizar dicha magnitud para cuantificar luego la energía aprovechada. Mientras que se tomará $\beta:0,8$ que surge de la absorción del cobre utilizado en el intercambiador de calor y la transmitancia del vidrio ubicado en la superficie receptora del foco donde se concentra la energía. Es necesario utilizar materiales que posean una conductividad térmica mayor a $125 \text{ W/m}^{\circ} \text{C}$ y una absorción mayor a $0,9$ y además, debe estar fabricada de acero, cobre o aluminio, y su espesor mínimo es $0,5 \text{ mm}$, $0,2 \text{ mm}$ y $0,4 \text{ mm}$ respectivamente según el material. Es así que tenemos, por relaciones ópticas y geométricas ideales que:

$$H_T = \frac{2800W}{0,07m^2} = 40000 \frac{W}{m^2}$$

Luego, aplicando los coeficientes mencionados anteriormente, la energía disponible en el intercambiador del foco por unidad de área será de 24000 W/m^2 . Teniendo en cuenta el factor de pérdidas mencionado en el apartado anterior y temperatura a la que se encontrarán los tubos de cobre del intercambiador, el calor útil transmitido al agua sanitaria del proceso es $Q_u = 1680W-19,6W$. Dentro de este resultado, el segundo término corresponde a las pérdidas en el foco. Se puede apreciar que las pérdidas debidas al tipo de intercambiador están en el orden del 1.16% , considerablemente bajo teniendo en cuenta que se aplicó un valor de Temperatura media de los tubos del intercambiador de 150°C , siendo este un valor conservador. Finalmente, podemos concluir que tendremos una energía aplicada al fluido de proceso de $1660W$. El valor de energía obtenido es comparable con calentadores de agua domésticos.

Si bien se pueden encontrar especificaciones de termotanques o calefones con más de 10000 W , esto se debe a que en esos casos se aplica mayor cantidad de energía en tiempos mas reducidos para lograr la diferencia de temperatura deseada. Esto último responde a los cambios bruscos de demanda y disminuye la energía total utilizada. En este caso, la potencia obtenida será aplicada constantemente durante las horas del día, o bien, mientras que existan condiciones de clima favorables. La energía obtenida será entonces la que se transmite al agua sanitaria para aumentar su temperatura y luego ser utilizada.

La temperatura deseada de salida, a fines de realizar los cálculos se fijó en 40°C , la cual es una medida estándar de consumo. La temperatura de entrada se tomará en 10°C , el cual es un valor representativo y conservador ya que en condiciones favorables la misma podría ser mayor. Por último, la temperatura máxima a la que se permitirá llegar el fluido dentro del tanque acumulador será de 70°C y este valor también limitará el funcionamiento del sistema.

El cálculo del tiempo necesario para que el volumen total de agua almacenada llegue desde la temperatura de entrada (10°C) a la temperatura deseada de salida (40°C). Para esto, se utiliza la ecuación (4) y la relación W y Joule, obteniéndose un tiempo de $3\text{hs } 9\text{min}$. Se concluye entonces que es posible calentar la reserva de agua propuesta (150 litros), necesaria para satisfacer las necesidades de una casa unifamiliar tipo, llevando el agua de 10°C hasta 40°C en menos una jornada solar. Este análisis es válido en un primera etapa para la zona central del país, que según el mapa de recurso solar, dispone de $4,19 \text{ hs/día}$ del recurso durante el verano y $3,352 \text{ hs/día}$ del mismo durante el invierno, ambos con un $H=1000 \text{ W/m}^2$ constante. [8].

2.3.2 Intercambiador de calor. Caldera.

Para el diseño del intercambiador de calor situado en el foco de la antena receptora tendrá las dimensiones exteriores que se obtuvieron de un análisis geométrico, teniendo en cuenta la incidencia de los rayos solares, según hoja de datos del fabricante de la antena receptora. Debido a que se trata de un concentrador parabólico, es posible que se lograr temperaturas mayores a 150°C en el foco, por lo que será necesario orientar el diseño a un dispositivo al vacío, con el objetivo de reducir pérdidas. No toda la energía captada se aprovecha para calentar el fluido deseado ya que una parte

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



se perderá irremediablemente en calentar el aire externo que esta en contacto con el colector (conducción y convección) y otra se perderá por radiación ya que el subir de temperatura el colector emitirá con más energía que el ambiente en el que se encuentra provocándose pérdidas en ese sentido. Dentro de intercambiador el tubo de absorción es el elemento encargado de absorber la energía disponible y transferirla al agua. Si diseño con cobre, cuya una conductividad térmica es mayor a $125 \text{ W/m}^2 \text{ C}$ y posee absorptancia mayor a 0,9 trabajando con 0,2 mm de espesor. El acabado que se dará al tubo es pintura negra mate, para obtener así una mejor absorptancia. La geometría propuesta aporta aproximadamente 0.15 m^2 de área de transferencia, la cual es generada por la forma helicoidal de un tubo modelado, con la existencia de soldaduras y accesorios solo en las conexiones de entrada y salida. Tendrá una cubierta de material transparente (vidrio) montada en frente del absorbedor, en la parte superior del colector, creando un espacio (20 a 25 mm), entre el tubo de absorción y ella. Se selecciona como material para la cubierta vidrio templado de 5 mm de espesor. El mismo, además de poseer buenas condiciones de reflexión y transmitancia, resiste mejor al impacto térmico y posee mayor resistencia al impacto mecánico y a la flexión. (Figura 4)

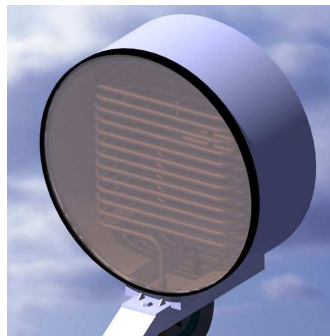


Figura 4. Intercambiador de calor.

Completando el diseño se realizó el dimensionamiento de la base del captador solar. Esta estructura (Figura 6) es uno de los aspectos más importantes del diseño propuesto. Esta estructura soportará la antena colectora, el sistema de seguimiento, el intercambiador de calor situado en el foco. Por otra parte, en el interior de la misma están contenidos todos los dispositivos que integran el sistema de aprovechamiento solar propuesto. Estos son; tanque acumulador de energía, calentadores instantáneos (1 unidad a Gas y 1 unidad Eléctrica), bomba de recirculación, controlador programable, instrumentación, válvulas necesarias y cañerías con sus respectivas aislaciones. (Figura 5)

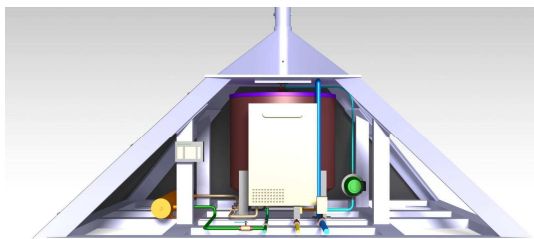


Figura 5. Estructura de la con elementos componentes.

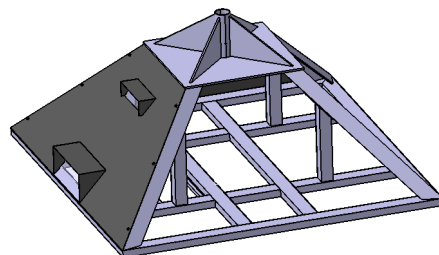


Figura 6. Estructura tubular

El diseño completo del sistema se puede observar el las Figuras 7 y 8, que incluye el calentador eléctrico y el termotanque a gas.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

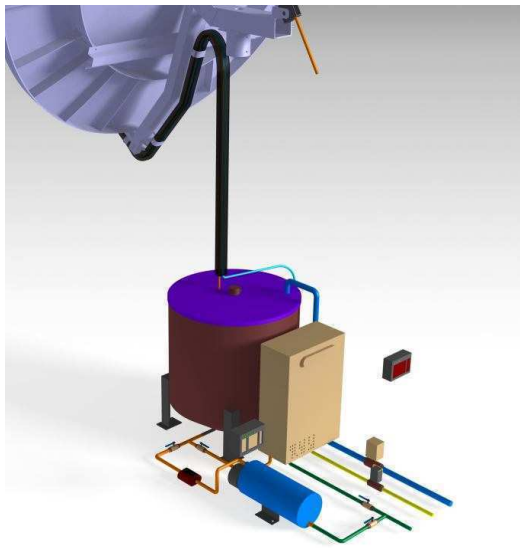


Figura 7. Componentes del sistema

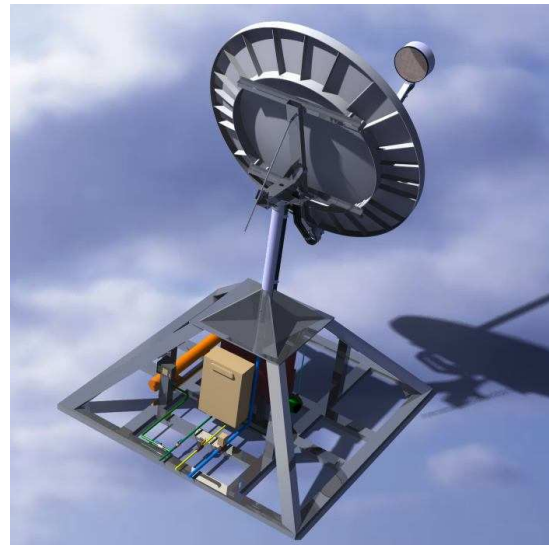


Figura 8. Estructura y componentes.

3. CONCLUSIONES.

En base al diseño propuesto, se ha comprobado que es posible construir un sistema compacto autónomo que permita calentar la reserva de agua propuesta (150 litros, aproximadamente 40l/persona/día), necesaria para satisfacer las necesidades de una casa unifamiliar tipo, llevando el agua de 10°C hasta 40°C en menos una jornada solar. Por ello este sistema es ideal para su utilización en aquellos lugares donde no existe una infraestructura previa para la obtención de agua caliente de uso sanitario. El sistema necesita un mantenimiento mínimo, el mismo que podría prestarse a un sistema convencional, por lo que lo hace utilizable sin necesidad de una capacitación previa. La instalación completa puede instalarse fácilmente "in situ", ya que en el caso de no poseer otra fuente de energía más que el sol, se puede simplificar la estructura quitando los componentes innecesarios. De esta manera solo sería necesario conectar la entrada de agua fría y la salida para el agua caliente. En caso de ser utilizado como sistema híbrido, sería necesaria además una conexión al suministro de gas y/o electricidad. Se está desarrollando en forma complementaria un estudio de factibilidad económica.

4. REFERENCIAS.

- [1] "Diseño y construcción de un calentador solar de agua operado por termosifón"(2006). Scientia et Technica, Año XII, N° 31, UTP. ISSN 0122-1701.
- [2] Placco, Cora; Saravia, Carlos.(2004). "Colectores solares para agua caliente". INENCO, UNAS-CONICET.
- [3] Zambrano, Daniel; Vitali, Osvaldo. (2010). "Desarrollo de motor Stirling con concentrador solar para uso en áreas aisladas". CIBIM2009, Las Palmas, Mallorca, España.
- [4] Fernández Diez, Pedro. Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. <http://libros.redsauce.net/Energiasalternativas/solar/PDFs/01Solar.pdf>.
- [5] Follari J. y A. Fasulo, 1998. Veinte años con los calefones solares. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5. 1998. ISSN 0328-932X
- [6] Sixto Guevara Vásquez , 2003. Teoría para el diseño de calentadores solares de Agua - - UNATSABAR – OPS/CEPIS - Lima,.
- [7] Zambrano, Daniel; Vitali, Armando; Garcia Ramirez, Oskar (2012). "Desarrollo de la estructura y un sistema de control para una antena parabólica de uso solar". III CAIM 2012.
- [8] Situación Energética Local: Balance y Perspectivas de una Problemática Compleja - Universidad Nacional de Cuyo - Agosto 2004



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

Desarrollo de la estructura y un sistema de control para una parábola de uso solar.

Zambrano, Daniel^(1,2), García Ramirez, Oskar⁽¹⁾, Vitali, Armando Osvaldo⁽¹⁾

*(1) Instituto de Industria (IDEI), Universidad Nacional de General Sarmiento.
J. M. Gutiérrez 1150. Los Polvorines. Prov. Bs. As. Argentina. dzambran@ungs.edu.ar*

*(2) Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas. Universidad Argentina de la Empresa. Lima 775.
CABA. Argentina. dzambrano@uade.edu.ar*

RESUMEN.

La energía solar es un recurso presente en la naturaleza. El aprovechamiento de este tipo de energía es de gran utilidad y, en el largo plazo resulta más económico que los métodos tradicionales ya sea quema de hidrocarburos, energía nuclear o hidráulica, teniendo en cuenta además, que cada una de estas trae consecuencias sobre el ambiente y el permanente riesgo para las distintas formas de vida. El presente trabajo se fundamenta en el desarrollo y la optimización de un sistema mecánico y su sistema de control, que permitan el seguimiento del movimiento solar, para la utilización de una parábola concentradora que puede ser utilizada para la generación de energía a través de un motor Stirling (Disco-Stirling) [1] ó para calentamiento de una sustancia líquida (agua) que pueda utilizarse para la transferencia de energía. Para ello se han considerado los parámetros de funcionamiento según la posición relativa del sol para nuestro hemisferio, y la incidencia de los rayos solares para las diferentes estaciones del año. Se realizó el análisis de la estructura de la pantalla parabólica [2], para el diseño de un sistema mecánico optimizado que permita el movimiento para lograr el seguimiento solar utilizando la menor cantidad de energía posible. Por otra parte se estudiaron técnicas de lazo abierto y cerrado para el control del sistema de enfoque y que permita su implementación con un costo reducido, tanto desde el punto de vista económico como en gasto de energía. En las diferentes etapas de este trabajo se realizaron experiencias físicas y mediciones que permitan determinar la cantidad de energía concentrada por la pantalla, que permita luego mediante un motor Stirling [3] su utilización. En forma paralela se desarrolló un intercambiador de calor que actúe como "caldera solar" aprovechando el concentrador. Fue necesario determinar las características del sistema de transmisión para su funcionamiento sincronizado.

Palabras Claves: energía solar, sistema de control.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los proyectos de aplicación de ingeniería observamos una gran cantidad de variables que deben ser escogidas según criterios de diseño que favorezcan una cantidad de factores, como fluidez, flexibilidad, originalidad, propiedades ocultas de los objetos, la satisfacción de necesidades, calidad, estética y costos, dando lugar en las aplicaciones industriales es cada día mayor, de allí la necesidad de ampliar su investigación y desarrollo para cubrir los requerimientos en las nuevas aplicaciones. Las exigencias impuestas por la industria, medicina o cualquier campo donde intervengan los recursos energéticos o nuevas fuentes de aplicación para la generación de energía eléctrica, han obligado a que se produzca un gran desarrollo de éstos.

Desde el punto de vista de la Ingeniería es indispensable conocer el comportamiento mecánico, electrónico, energético y de control de un sistema concentrador de energía de tipo Disco Stirling, esta aplicación debido a su alto consumo de al desgaste o pérdida de energía sometidos bajo el efecto de un medio ambiente deben ser considerados en alto estudio y así poder determinar su características energéticas como sistema y ser aprovechadas al máximo para el beneficio del ser humano

1.1. Objetivos.

El principal objetivo del presente trabajo fue diseñar un sistema mecánico y de control capaz de realizar el seguimiento solar, aplicado en la parábola concentradora de un sistema disco-Stirling, que asegure el mayor aprovechamiento energético. Para ello es necesario diseñar un sistema de transmisión mecánico que permita el movimiento del concentrador parabólico logrando de este modo el seguimiento solar pero teniendo en cuenta la optimización del consumo eléctrico. Fue necesario entonces el diseño y la realización de los planos de cada uno de los elementos que constituyen el sistema de transmisión mecánico, con las especificaciones necesarias para su fabricación. A partir de este diseño mecánico, teniendo en cuenta las funcionalidades exigidas debió evaluarse un sistema de control de lazo cerrado que sea capaz de ubicar la referencia geográfica del concentrador y corregir la posición de mayor absorción de energía. Para que este sistema sea autosuficiente debió diseñarse un ciclo de consumo y almacenamiento de energía capaz de abastecer la demanda de diseño según las especificaciones energéticas del sistema de parábola concentradora disco-Stirling. Este sistema posee elementos de acumulación (baterías) que permiten acumular la energía en los períodos donde no es necesario utilizarla. Además este sistema permite la puesta en marcha inicial del sistema funcionando el generador como motor para el inicio del ciclo Stirling y para el posicionamiento inicial de la parábola.

1.1.1 Análisis de antecedentes.

Para el desarrollo y planteo de este trabajo fueron tenidos en cuenta los antecedentes que se relacionan con el diseño y utilización de motores Stirling y en especial con la configuración disco-Stirling. Si bien en este desarrollo no nos centramos en el motor Stirling, para el análisis de la estructura y su funcionamiento se ha tenido en cuenta los trabajos ya realizados en la Universidad [1] donde se ha desarrollado el análisis termodinámico y el la concepción y construcción del motor. Para ello se ha tenido en cuenta los trabajos realizados por diversos investigadores que han trabajado con la configuración específica disco Stirling[4]. Como en todo desarrollo durante el mismo deben tenerse en cuenta las variables asociadas a los procesos de transferencia de calor y la posibilidad de transformación en energía asociado al sistema disco Stirling, pero sin perder en cuenta los costos [5]. Este proyecto nace de la necesidad de proveer energía a lugares aislados [1,5] y hace hincapié en propuestas similares [6] , que utilizan sistemas posicionadores con el fin de maximizar el rendimiento del sistema.

Como referencia para este desarrollo fueron tenidas en cuenta las consideraciones realizadas por el premio Nobel de física de 1984 [7] y sus implicancias para el desarrollo en especial de Sudamérica.

2. DESARROLLO

Para el desarrollo de un sistema disco-Stirling se partió de una antena parabólica donada por Telefónica de Argentina. La misma fue revestida con un film reflectante [3]. Por ello el sistema

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

mecánico actual constituye a un soporte estático de posicionamiento y orientación de tierra a satélites, tal como se muestra en la foto (Figura 1), fabricada con caños estructurales galvanizados, la base inferior está unida mediante pernos de ajuste, no proporcionando la rigidez necesaria para un sistema dinámico, que a su vez sostiene de la misma manera a un caño de soporte principal vertical de 1,20 m de altura con un diámetro de 100mm.



Figura 1 Estructura inicial del concentrador parabólico.

En la parte superior del caño vertical tenemos un sistema de sujeción a través de un perno que evita que la base superior del concentrador se mueva logrando la fijación manual del mismo (Figura 2), y otros 6 pernos ubicados a 120° , por pares que evitan el movimiento en el plano azimutal, en este tipo de fijación no pueden realizar movimiento libre en el plano debido a que existe una gran componente de fricción, además la estructura no está diseñada para moverse continuamente.



Figura 2 Estructura sujeción

El mecanismo que mueve el plano cenital está constituido por un tornillo de potencia colocado en forma de hipotenusa que une la pantalla del concentrador con el extremo horizontal (Figura 3). El objetivo de este diseño es lograr una precisión al establecer la orientación hacia un satélite en el momento de la instalación, posteriormente queda fija permanentemente mientras este en uso.



Figura 3. Estructura para posicionamiento cenital

De este modo el plano de la pantalla pivotea sobre el perno horizontal que se encuentra entre la base superior y la estructura que sujeta la pantalla, permitiendo un movimiento de 0 a 82 grados, no logrando ubicarse la pantalla paralelamente a la superficie base debido a la posición de la articulación inferior que sujeta la tuerca que de carrera al tornillo de potencia para su ajuste (Figura 4 y 5).



Figura 4. Estructura para movimiento cenital de la pantalla



Figura 5. Vista general de los mecanismos de movimiento de la pantalla



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Para poder utilizar esta estructura y conseguir un movimiento seguidor tanto del azimut como en el movimiento cenital, la estructura actual debe ser modificada. El soporte base, debe ser soldado, para lograr un comportamiento isoestático y dar mayor estabilidad al mecanismo y evitar vibraciones cuando este en movimiento.

No es necesario un análisis cuantitativo de la estructura debido a que esta es diseñada por un fabricante comercial y se asume que cumple con los requerimientos para el cual se diseñó, razón por la cual todas las modificaciones serán calculadas para asegurar su funcionamiento cinemático pero considerando que la misma es suficiente para las cargas estáticas.

1.1. Diseño del sistema de transmisión.

Para el desarrollo del sistema de transmisión para otorgarle los movimientos necesarios a la antena, se realizaron varios estudios. De allí surgieron distintas propuestas que fueron analizadas tanto desde le punto de vista funcional como estructural, teniendo en cuenta además su costo y el consumo energético, ya que estos movimientos deben ser realizados con motores cuya energía debe ser provista por el sistema generador Stirling. Es así que se propusieron las configuraciones que pueden observarse en las figuras 6 y 7.

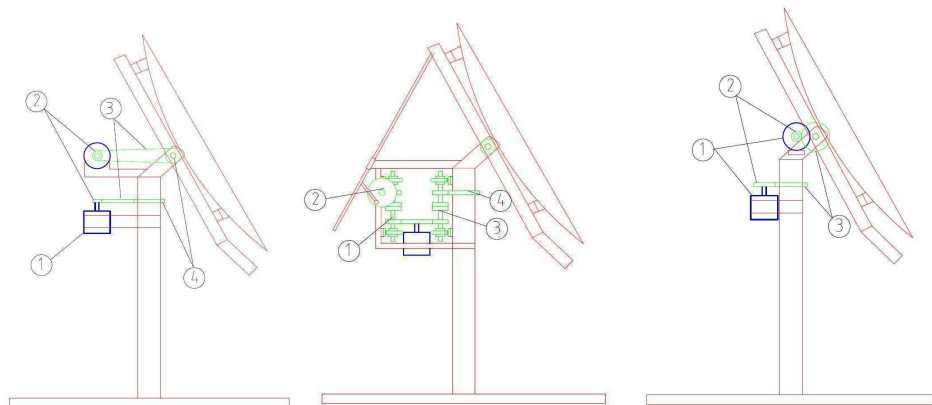


Figura 6. Configuración 1, configuración 2 y configuración 3

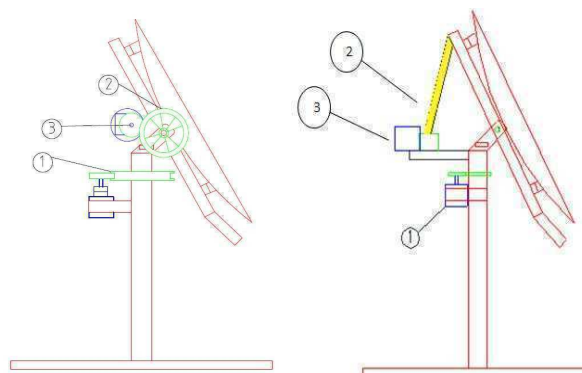


Figura 6. Configuración 4, configuración 5.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

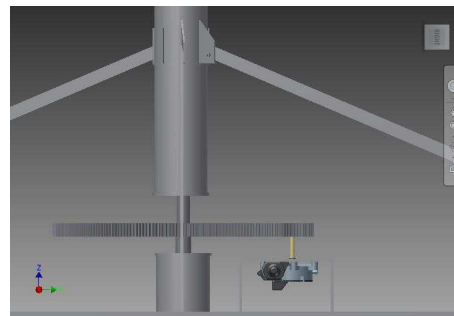
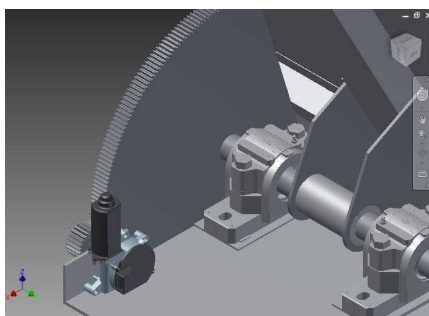
Para la evaluación de las configuraciones se determinaron ciertas características a ponderar. Teniendo en cuenta estos criterios se analizaron cada una de ellas procediéndose al descarte de la propuesta 2, por considerarse la misma excesivamente costosa y compleja. A modo de resumen pueden observarse los resultados en la Tabla 1. La mejor configuración resulta del mayor puntaje asignado.

Tabla 1. Matriz de Ponderación

		Configuraciones			
		IDEA 1	IDEA 3	IDEA 4	IDEA 5
Criterios	Bajo mantenimiento	300	500	400	200
	Menor cantidad de modificaciones de la estructura actual	600	800	400	1000
	Menor cantidad de elementos mecánicos	900	1200	600	1500
	Bajo Costo	1600	2000	1200	800
	Bajo consumo de potencia	2000	2500	1500	1000
	Sumatoria	5400	7000	4100	4500

Como puede observarse en la Tabla 1, la configuración más adecuada resulta ser la 3, donde se utiliza para la transmisión de los movimientos un sistema de engranajes. Esta solución es la que mejor cumple con los criterios anteriormente expuestos, además de cumplir con todas las restricciones, siendo esta la que menor probabilidad de consumo de potencia de todas las posibles soluciones, por sus pocos elementos y sencillez del sistema lo que influye directamente en el costo de fabricación. En cuanto a la cantidad de modificaciones de la estructura actual también representa la solución que menos modificaciones estructurales causara en el concentrador lo que a su vez disminuye todos los costos del sistema y aumenta la eficiencia del diseño.

Para el estudio del sistema de transmisión mecánico que permite al concentrador la posibilidad de cumplir con el movimiento azimutal y de cenital, fue necesario analizar cada una de las partes de la estructura y ver todas las opciones posibles para optimizar el diseño del sistema. Cada uno de los cálculos de los elementos mecánicos fue realizado con la ayuda de algunos programas de elementos finitos (Solid Work) y lograr una mayor precisión en los cálculos reduciendo en gran margen la cantidad de incertidumbre en el diseño (Figuras 7 y 8).



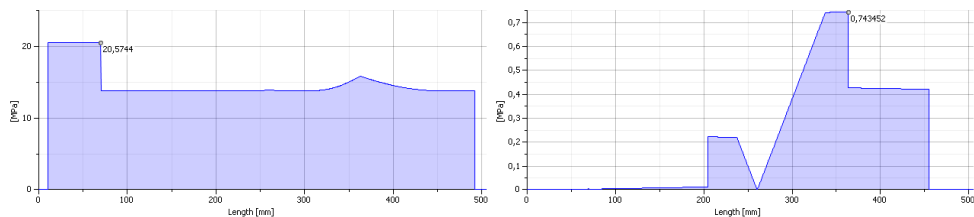
Figuras 7 y 8. Visualización 3D del sistema de transmisión de movimiento del concentrador parabólico.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Todos y cada uno de los resultados fueron llevados a las medidas comerciales superiores dependiendo del caso, generando un sobredimensionamiento de las medidas que traerá como consecuencia un diseño más robusto y con menor probabilidad de falla, asegurando el funcionamiento con las condiciones de diseño para las que será elaborado. Para el cálculo de del sistema de transmisión se consideró el uso de motores de limpiaparabrisas que giran a 45 rpm y las dimensiones básicas de nuestro sistema para el dimensionamiento básico, los cálculos de ejes, rodamientos, engranajes y potencia se realizaron mediante el uso de software para cálculos de diseño. Algunos resultados de estos cálculos pueden observarse en las figuras 9 y 10.



Figuras 9 y 10. Tensiones sobre elementos mecánicos para el sistema cinemático de movimiento.

Para la selección de rodamiento se tomó en cuenta las dimensiones de los ejes y posteriormente se comparó la capacidad de carga dinámica con las cargas obtenidas en los diagramas de fuerza en el eje. De esta selección surgieron los rodamientos radiales y axiales tipo SKF 6180S 2RS y axial SKF 51102.

Para el análisis de los motores donados por la compañía TRIO S.A, fueron tomadas en cuenta las curvas de los motores, sin embargo es necesario la realización de pruebas empíricas así como el diseño de los acoples necesarios para su funcionamiento y los soportes adecuados (Figura11).



Figura 11. Motores de CC.

1.2. Elección de un sistema de control para seguimiento solar.

Para el sistema de control se propuso establecer un lazo cerrado de posición tomando como variable la intensidad de luz que reciben un par de fotoresistores. Cuando se produce el movimiento y según un arreglo eléctrico previo es posible medir la intensidad diferencial producida por la posición de los rayos solares, estableciendo de esta manera una correlación entre el movimiento solar y la posición relativa de la superficie de la pantalla que permita orientar la misma para obtener la mayor absorción de energía. Para lograr este objetivo se realizaron cálculos, diseños preliminares y ensayos físicos. Dentro de estas evaluaciones se realizó la medición de fotoresistores aislados para poder determinar las variaciones de resistencias de los sensores fotoresistivos en función de las diferentes posiciones discretas de una fuente de iluminación artificial y el grado de selectividad o sensibilidad que ofrece el sistema para determinar la posición de la fuente luminosa en función de los valores e resistencia a cada fotoresistor.(Figura 12).



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

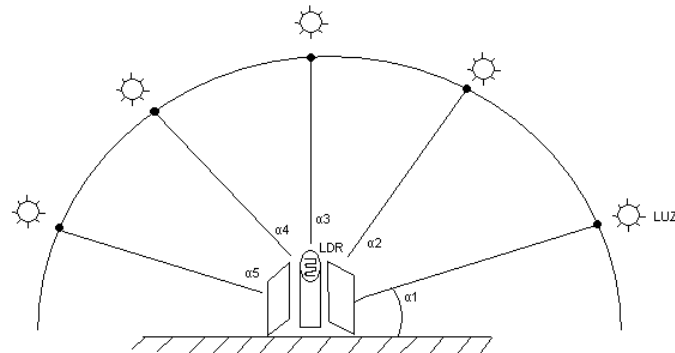


Figura 12. Incidencia de rayos sobre fotoresistores.

Durante las evaluaciones se observaron grandes dispersiones de los resultados, por tanto es necesario continuar con el desarrollo o proponer otras alternativas que puedan ser válidas para la determinación del posicionamiento diferencial de los rayos solares respecto de una superficie. Es necesario además hacer una adecuación de señal de estos fotoresistores para lograr mejorar estos resultados con el objetivo de mejorar la exactitud de las mediciones y poder utilizar este sistema para el enfoque de la pantalla. Los valores de las mediciones fueron cuasi aleatorios por lo no resulta apropiado para su uso sin algún acondicionamiento de señal. Se seguirá experimentando con este tipo de sensor y con fotodiodos pudiendo además utilizarse el sistema de tubo colimador y lentes para el filtrado del espectro de luz con el fin de evitar la dispersión en la medición para futuros procedimientos experimentales. El sistema de posicionamiento depende de estos sensores, y se ha pensando en un sistema de lazo cerrado como el de la figura 13. El sistema de control a lazo cerrado se realizará utilizando un ángulo de referencia de entrada con relación al ángulo de incidencia que tiene el sol sobre la superficie del concentrador, de este modo al realizar la lectura del ángulo de incidencia se podrá establecer la diferencia entre la posición real del sol respecto a la antena, con la posición actual, donde el resultado de esa diferencia da como resultado una señal que active los motores en el sentido de giro necesario para su ubicación.

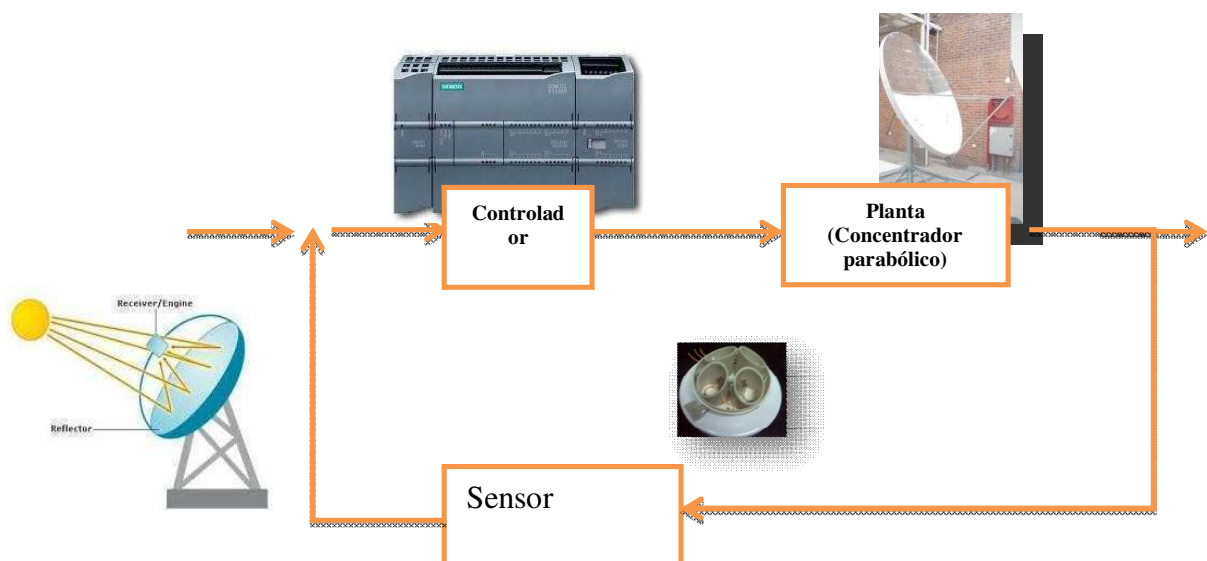


Figura 13. Sistema de control de lazo cerrado para pantalla parabólica

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Este sistema está siendo desarrollado. Ya se encuentra en etapa avanzada el programa para el PLC, y la construcción del mecanismo de movimiento de la pantalla. Por otra parte se están realizando las pruebas para la determinación del mejor sistema de sensor solar para poder cerrar el lazo de control.

3. CONCLUSIONES.

Del análisis de las estructuras, su posible configuración, así como la selección de las fuentes motoras, se concluye que es posible la realización del proyecto y en primera instancia el sistema sería autosuficiente, pues podría proporcionar la energía necesaria para el movimiento, teniendo en cuenta su configuración motor Stirling-generador-acumulador, quedando energía disponible, ya que el Stirling será capaz de producir 300W. El sistema de direccionamiento o posicionamiento a lazo cerrado mediante sensores fotorresistivos, aún se encuentra en fase de diseño y análisis ya que restan pruebas que permitan obtener un sistema confiable. El sistema de lazo abierto es el utilizado en primera instancia, para el posicionamiento del sistema, mediante la programación del PLC, con suficiente precisión. La configuración de la superficie captadora, la utilización de elementos estándar (motores, estructuras, conjuntos) permite su fácil instalación en lugares donde el sistema pueda mantenerse funcionando con escaso mantenimiento y en caso de reemplazo puedan encontrarse los repuestos fácilmente.

4. REFERENCIAS.

- [1] Zambrano, Daniel; Vitali, Osvaldo. (2010). "Desarrollo de motor Stirling con concentrador solar para uso en áreas aisladas". CIBIM2009, Las Palmas Mallorca, España.
- [2] Bornes, Wladimir, (2005) "Implementación de equipo concentrador solar parabólico tipo Scheffler", Universidad Técnica Federico Santa María.
- [3] Zambrano, Daniel; Pisani, Leandro; Vitali, Osvaldo. (2010) "Desarrollo, diseño y construcción de un motor Stirling solar". IICAIM, San Juan, Argentina.
- [4] Losada San José, Jorge (2009). Análisis de un Sistema de Disco Parabólico con Motor Stirling.
- [5] Zabalza, Gustavo. (2010). Curso Fundamentos de Energía Solar Térmica - Proyecto de Generación Energía con Disco Parabólico – Stirling.
- [6] Santos Castilla, Francisco Javier; Martínez Fernández, Antonio J. (2007). El poder de la Concentración: Generador Termovoltáico GT-SPS 1,1 kW .Colombia.
- [7] Bernardelli, Federico (2010). Energía Solar Termodinámica en América Latina: Los casos de Brasil, Chile y México.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Nacional de General Sarmiento, y especialmente a los integrantes del IDEI y al Laboratorio de Ingeniería de dicha universidad.



Escalado de modelos de Conversores de Energía Oceánica

Labriola, Carlos V. M., León, Horacio ¹, Abdelbasat, Abdelbaki ¹, Chacón, Hugo ¹, Peralta, Cecilia ¹

*Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de FER.
Buenos aires 1400 (8300) Neuquén.
carloslabriola54@yahoo.com.ar*

¹ *Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Caleta Olivia, Ruta 3 s/n Acc.
Norte (CP: 9011), Santa Cruz*

RESUMEN

En la Unidad Académica de Caleta Olivia de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UACO-UNPA), se está desarrollando el diseño y fabricación de modelos conversores de Energía Oceánica en Energía Eléctrica. En particular se están desarrollando una turbina eólica sumergida como convertidor de corrientes marinas mareomotrices y un tubo electromagnético basculante como convertidor undimotriz o de energía de las olas.

El primero está en la etapa de diseño en ingeniería de detalle, en la elección de materiales resistentes a los esfuerzos de las corrientes marinas. El segundo esta en su etapa de construcción y ensayo.

Para nuestro país estas tecnologías son novedosas y dichos modelos se ensayarán, teniendo en cuenta que los resultados y características obtenidas de los ensayos se utilizarán como conclusiones al comportamiento de prototipos a escalas mayores.

Para el escalado de los modelos se ha investigado las leyes de semejanza en fluidos entre el modelo y el prototipo de mayor envergadura. Se analiza la semejanza Geométrica, Dinámica y Cinemática haciendo uso de los números adimensionales característicos de estos casos:

- Caso de Turbinas Hidrocinéticas accionadas por Corrientes Marinas: se usan los números adimensionales de Newton, Reynolds y Froude [1].
- Caso de convertidores de energía de la Olas: se usan los números adimensionales de Newton, Reynolds, Froude y Strouhal [1].

Mediante este análisis se puede apreciar hasta qué tamaño/potencia pueden extenderse las conclusiones de los resultados de ensayo.

Para el modelado se establecen dos consignas [2], [3].

- Prototipo de mayor tamaño que permita mantener las mismas características con el modelo.
- Prototipo que se utilizará para una aplicación dada de menor escalado que el anterior.

Los modelos se ensayarán en Banco de Ensayos de Energía Oceánica de la UACO-UNPA.

Palabras Claves: Oceánica-Undimotriz-Modelo-Mareomotriz-Adimensional.



1. INTRODUCCIÓN.

El grupo del Laboratorio de Energía Renovable de la UACO-UNPA está desarrollando dos modelos de convertidores de energía oceánica en energía eléctrica. Los modelos se ensayarán en un banco de ensayos que se está construyendo paralelamente en el predio de la UNPA en Caleta Olivia, que consta de dos canales adecuados, uno para la producción de corrientes marinas de 10m de longitud y otro para la generación y extinción de olas de 20 m de longitud [5], [6].

Este trabajo se refiere al dimensionamiento de los modelos convertidores de energía a ensayar y al escalado de los mismos a prototipos a fabricarse a futuro para ensayo "in situ" en la costa de Santa Cruz. Estos trabajos de Investigación Aplicada corresponden al desarrollo del Proyecto PI: B29/125 iniciado en el 2011, [4].

Los modelos a ensayar son:

- Modelo de turbina tipo eólica sumergida o turbina hidrodinámica de eje horizontal: será de dos aspas de largo cada una de 20cm, o sea un rotor de diámetro de 40cm. Este rotor será acoplado a un generador de imanes permanentes de Nd-Fe-Bo, formando un generador hidrodinámico de corriente eléctrica.
- Modelo de tubo basculante electromagnético: consta de un tubo flotante de un metro, el cual posee un bobinado cilíndrico interior, dentro del cual bascula un móvil cilíndrico constituido por anillos Norte y Sur alternados de imanes de Nd-Fe-Bo. Al bascular de un extremo al otro del cilindro por efecto de la alternancia entre cresta y valle de la ola, se inducirán en el bobinado pulsos de tensión y corriente recogidos por circuito externo convenientemente.

2. TEORIA ASOCIADA AL DESARROLLO DE MODELOS Y SU ESCALADO.

2.1. Variables Involucradas.

Las variables independiente puestas en juego para un cuerpo el cual está parcialmente sumergido en un fluido viscoso incompresible [1], se aprecian en Tabla 1:

Tabla 1 Variables Independientes Apropriadas

VARIABLE	SIMBOLO	UNIDAD	DIMENSIONES FUNDAMENTALES
Fuerza impuesta	F	N	ML/T ²
Longitud	L	m	L
Densidad del fluido	ρ	Kg/m ³	M/L ³
Viscosidad del Fluido	μ	Pas	M/LT
Velocidad	V	m/s	L/T
Aceleración de la gravedad	g	M/s ²	L/T ²

A estas variables independientes apropiadas, podemos concentrarlas en las siguientes magnitudes y sus relaciones según en Tabla 2:

Tabla 2 Variables Independientes Apropriadas

VARIABLE	EXPRESIÓN	DIMENSIONES FUNDAMENTALES
Fuerza impuesta	Masa x aceleración	$(\rho \cdot L^3)(dV/dt) = (\rho \cdot L^3)(v \cdot dV/dL) \propto \rho \cdot V^2 \cdot L^2$
Viscosidad del Fluido	Esfuerzo Cortante x area	$(\mu \cdot dV/dL) \cdot L^2 \propto (\mu \cdot V \cdot L)$
Fuerza Gravitacional	Masa x aceleración de la gravedad	$(\rho \cdot L^3) g = (\rho \cdot g \cdot L^3)$

2.2. Números adimensionales a utilizar.

Según las variables físicas desarrolladas en la Tabla 2 podemos seleccionar los siguientes números adimensionales a utilizar en este análisis, según Tabla 3 [1].

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Tabla 3 *Números Adimensionales Seleccionados*

NÚMERO	RELACIÓN	EXPRESIÓN
Newton	N= Fuerza impuesta/ fuerza de inercia	$F/(\rho \cdot V^2 \cdot L^3)$
Reynolds	Re= Fuerza de Inercia /fuerza viscosa	$(\rho \cdot V \cdot L)/\mu$
Froude	Fr= Fuerza de inercia/fuerza gravitacional	$V/(g \cdot L)^{1/2}$
Strouhal	St= tiempo de flujo característico/periodo de oscilación	f.L/V ó L/V.T

Los tres primeros números son de aplicación el análisis dimensional del modelo conversor de corrientes marinas. El Nro. de Strouhal es de aplicación para el modelo conversor Undimotriz. Para este último modelo, las variables consecuentes se muestran de Tabla 4.

Tabla 4 *Variables consecuentes para dispositivo undimotriz*

VARIABLE	SIMBOLO
Amplitud	a
Longitud de Onda	L
Período	T
Velocidad de fase	c

2.3. Relaciones de Semejanza.

Las relaciones de semejanza a verificar se detallan en Tabla 5 [7].

Tabla 5 *Expresiones para las Relaciones de Semejanza*

SEMEJANZA	EXPRESIÓN
Geométrica	Lp/Lm
Cinemática	Vp/Vm
Dinámica	$(Vp/Vm)^2 = Lp/Lm$

3. DESARROLLO DEL MODELADO.

3.1. Semejanza entre el Mar y Canal.

Se ha tomado como lugar de ensayo in situ de prototipos a Puerto Deseado por sus buenas condiciones mareométricas. En Figura 1 se puede apreciar parte de los cuarterones del Servicio Hidrografía Naval (SHN) correspondiente a la zona de Puerto Deseado. Se puede observar que las profundidades en el canal principal van de 17 a 29m y las velocidades son de 5 a 6 nudos (2,5 a 3m/s). Se estima que en bajamar quedará la mitad de la profundidad disponible en la Ría de Deseado por lo tanto la profundidad será entre 13 y 15 m (promedio 14m). Como el dispositivo no se puede poner en el lugar de máxima profundidad y corriente marina ya que interferiría con la navegación, se estima (según línea punteada roja en Figura 1) [8] que las velocidades del agua de mar estarán entre 1,5 a 2m/s.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

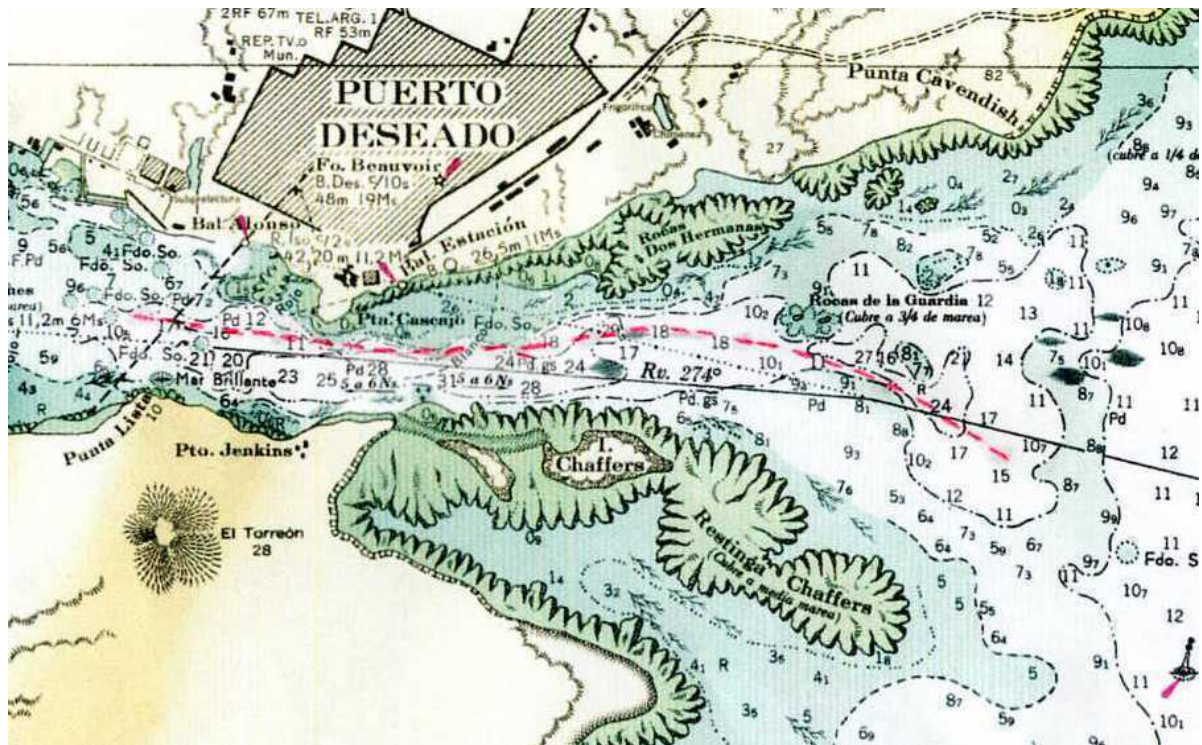


Figura 1 Sector de Puerto deseado de carta del SHN.

Podemos resumir los datos de partida y los caudales estimados para la zona de emplazamiento de prototipo según Tabla 7.

Tabla 6 Valores de Partida de emplazamiento de prototipo

CARACTERÍSTICA	VALOR
Ancho de flujo de fluido	30 m
Profundidad	14 m
Rango de Velocidades	1,5 a 2 m/s
Caudal	630 a 840 m ³ /s

El canal Hidrodinámico con su bomba de circulación, dispone de las siguientes características según Tabla 7:

Tabla 7 Características en canal de prueba de modelo

CARACTERÍSTICA	VALOR
Ancho de flujo de fluido	0,40 m
Profundidad (del chorro a v cte.)	0,40 m
Velocidad obtenida aplicando semejanza dinámica	0,25 a 0,34 m/s
Caudal obtenidos aplicando semejanza dinámica	0,03 a 0,04 m ³ /s

3.2. Semejanza entre Prototipo y Modelo Hidrodinámico.

Respecto de la tabla 6, en ella se han supuesto canales de prototipo y modelo rectangulares. En realidad en el canal hidrodinámico, se dispone de una sección circular de diámetro 0,40m a la salida de la bomba circuladora lo cual hace diferir un poco los valores de Tabla 6 de la velocidad obtenida.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Para este caso se han obtenido los siguientes resultados en base a semejanza dinámica según tablas 8 y 9:

Tabla 8 *Características en canal de prueba de modelo*

CARACTERÍSTICA		VALOR
Escala Lp/Lm según semejanza dinámica		22 a 25
Prototipo	Diámetro	8,9 a 10m
	Velocidad	1,5 a 2 m/s
	Caudal	132,7 a 265m ³ /s
Modelo	Diámetro	0,40m
	Velocidad	0,32 a 0,40 m/s
	Caudal	0,04 a 0,05 m ³ /s

3.3. Semejanza entre Prototipo y Modelo Basculante Undimotriz.

Por observación de las olas en la costa santacruceña y comparada con bibliografía, podemos tener los siguientes datos y valor de Strouhal en tabla 9:

Tabla 9 *Características de olas en el mar y en canal de olas*

CARACTERÍSTICA		VALOR	STROUHAL
Mar	Amplitud (promedio)	2m	0,2
	Frecuencia	0,017Hz	
	Velocidad	0,17 m/s	
Canal de Olas	Amplitud	1m	0,194
	Frecuencia	0,033 Hz	
	Velocidad	0,17m/s	

Para el caso del prototipo y Modelo, ponemos los datos y valores de Nro. de Strouhal en tabla 10:

Tabla 10 *Características de Prototipo y Modelo*

CARACTERÍSTICA		VALOR	STROUHAL
Prototipo	Longitud	2m	0,2
	Frecuencia	0,017Hz	
	Velocidad	0,17 m/s	
Modelo	Longitud	1m	0,194
	Frecuencia	0,033 Hz	
	Velocidad	0,17m/s	

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Nos hemos basado en la semejanza dinámica incompleta o restringida, por eso no se ha considerado el Nro. de Reynolds ni el de Newton. Se ha priorizado la semejanza dinámica dado que son los esfuerzos en el dispositivo los que son críticos. Prácticamente es muy difícil que coincidan para modelo y prototipo respectivamente, el número de Reynolds y el de Froude [1], en este tipo de aplicación. Luego en las comparaciones de ensayos del prototipo y modelo se harán las correspondientes correcciones si son necesarias.

Para el caso del dispositivo de las olas, solo se han considerado magnitudes mecánicas ya que se está realizando el modelo y se van a medir las velocidades de los imanes basculantes y la tensión obtenida en el inducido para establecer las semejanzas electromagnéticas. Se han tomado unas dimensiones en el modelo que son muy semejantes a las dimensiones de la ola generada.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

El modelo hidrocínético de 40cm de diámetro lo consideramos con las dimensiones más pequeñas posibles con la tecnología disponible y puede ser de hasta 60 cm de diámetro.

La potencia del prototipo hidrocínético va de 43kW a 1,5m/s a 131kW a 2m/s. El modelo correspondiente desarrollará una potencia de 0,8W a 1,6W. Estas potencias tan bajas se dan porque la velocidad del fluido es muy reducida. Para disponer de los valores hallados de velocidad del fluido en el canal hidrodinámico se dispone de una bomba tipo Kayak de circulación que proporciona un caudal hasta 0,075m³/s con 40kW de potencia.

Para variar la velocidad se acercará y alejará el modelo de la tobera de salida de la bomba para evitar sacar a la bomba de su punto óptimo de rendimiento ya que fuera de él se puede dar cavitación. En la salida de la bomba se dispondrá un nido de abeja para uniformar el fluido.

5.2. Recomendaciones.

Se están realizando ambos modelos para poder ensayarlos en cuanto se dispongan los canales y su equipamiento accesorio. Mientras tanto se ha conseguido un pontón para ensayar en la costa del mar en Caleta Paula, puerto de la ciudad de Caleta Olivia.

El modelo basculante de las olas necesita afinación de cálculos hasta llegar a obtener la potencia final eléctrica relevante en el prototipo.

6. REFERENCIAS.

- [1] Shaw, Ronald; (1982). *Wave Energy, a design challenge*. Reino Unido. 1ra. Edición. Ellis Horwood Ltd. John Wiley & Sons, Open University.
- [2] Çengel Cimbala, Yunus John (2006). *Mecánica de Fluido, fundamentos y aplicaciones. Capítulo 7: Análisis Dimensional y Modelado*. Pág. 269- 319, D.F.Mejico. 3ra. Edición, McGrau Hill.
- [3] Labriola, Carlos V.M. ;(1997). "La energía Eólica aplicada a Microemprendimientos: Escalado de turbina Darrieus-Troposkien". *XII Congreso de Ingeniería Eléctrica de Chile*. Temuco, Chile.
- [4] PI B29/125: Análisis de sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina.
- [5] León, H, Chacón, H., labriola, C., "Energía Oceánica, una alternativa energética para la Patagonia Atlántica Austral", *Congreso latinoamericano de Generación y Transporte de Eneqía Eléctrica*, mar del Plata , Noviembre 2011.
- [6] León, Horacio ¹,Abdelbasat, Abdelbaki ¹, Chacón, Hugo¹,Peralta Cecilia, Labriola, Carlos V. M. , "Banco de Ensayos para Convertidores de Energías Mareomotriz y Undimotriz", III CAIM, Buenos Aires, 2012
- [7] The Open University, "Dimensional Analysis and Similarity", Capítulo 7 del libro *Introduction to Thermofluid Mechanics*, The Open University, Walton Hall, The Dorset Press, Dorchester, reino Unido 1998.
- [8] Biancucci, M., Labriola, C. "Wind-Tidal Combined Generation System for Patagonia, Argentina", *World Renewable Energy Congress*, 2008, Trabajo presentado en Sesión 4, Glasgow, Escocia, Reino Unido, del 19 a 25 de julio del 2008.

Agradecimientos:

Se agradece especialmente al Decanato de la UACO y a la Dirección del Departamento de Ciencias Aplicadas de la UACO en el apoyo para la concreción de lo realizado en el proyecto y las obras por realizar.

También se agradece el trabajo de los alumnos Cecilia Peralta, Adriana Brizuela y Miguel Moreno en el replanteo de las instalaciones, cálculos y planos de instalaciones y modelos.



Forma alternativa de generación por gasificación por arco de plasma de residuos urbanos

Bussolini, Ignacio, Sosa, Maria Isabel⁽¹⁾

*GECCU, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata
Calle 1 y 47. B1900TAG La Plata
misosa@ing.unlp.edu.ar*

RESUMEN.

En este trabajo se presenta la propuesta de generación de electricidad [1] a través de la instalación de una planta térmica conectada al Mercado Eléctrico Mayorista Argentino, MEM, que utiliza como combustible residuos sólidos urbanos (RSU) Esto valoriza energéticamente los residuos sólidos urbanos mediante arco de plasma, tecnología nueva e innovadora.

En el conurbano bonaerense (GBA) viven aproximadamente 13 millones de habitantes, los cuales producen unos 5 millones de toneladas anuales de residuos. La mayoría de los mismos no se reciclan sino que tienen como destino final indefectiblemente el relleno sanitario.

La ley Nacional 26190 [2], sancionada en el año 2006 y reglamentada en el 2009, fomenta el uso de las energías renovables. Esta ley declara de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energías renovables y establece que en un plazo de 10 años el 8 % de la energía consumida en Argentina deberá provenir de fuentes de energías renovables. En este contexto, se vislumbra una oportunidad de inversión que considere estas dos situaciones: por un lado contribuir a resolver la problemática de la basura y por el otro lado suministrar energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables.

Se propone radicar la planta en el conurbano bonaerense con una capacidad nominal para tratar 2.122 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos, permitiendo generar y exportar a la red una potencia neta de 120 MW.

El proyecto es interesante básicamente desde dos puntos de vista. Por un lado, contempla la problemática ambiental y propone una solución concreta al tratamiento de residuos de las grandes urbes, valorizando energéticamente los residuos. Por otra parte, genera electricidad para suministrar a la red, particularmente interesante dada la situación crítica del sector energético argentino con marcadas crisis en los últimos años.

Palabras Claves: generación de energía, residuos, arco de plasma, gasificación



1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es producto del trabajo final del Ing. I. Bussolini presentado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (1) para optar por el grado de Ingeniero industrial. El objetivo del mismo determinar la factibilidad de la instalación de una planta generadora de electricidad conectada al Mercado Eléctrico Mayorista MEM argentino, utilizando la tecnología de gasificación de residuos sólidos urbanos (RSU) por medio de arco de plasma.

En el área metropolitana de la ciudad de Buenos Aires denominada Gran Buenos Aires (GBA) viven aproximadamente 13 millones de habitantes, que producen cerca de 5 millones de toneladas anuales de residuos, los cuales en su mayoría no se reciclan sino que tienen como destino final el relleno sanitario. Cabe señalar que el relleno sanitario, o sea enterrar la basura provoca efectos ecológicos en la zona en cuestión y tiene un costo que oscila entre 10 y 30 U\$D por tonelada de residuo depositada.

La ley Nacional 26190, sancionada en el año 2006 y reglamentada en el 2009, fomenta el uso de las energías renovables y declara de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energías renovables, estableciendo que en un plazo de 10 años el 8 % de la energía consumida en Argentina deberá provenir de fuentes de energías renovables.

Tomando como base esta ley se propone la instalación de una planta generadora/procesadora de residuos que ataca dos problemáticas: por un lado contribuye a resolver la problemática de la basura y por el otro lado suministra energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables. Para el presente análisis se considera la licitación de ENARSA de carácter nacional e internacional, N° EE 001/2009 (2) que establece los pliegos para suplir una generación de 120 MW a través de la generación de energías partiendo de residuos urbanos

El proyecto propone la instalación de una Planta de Gasificación y Vitrificación de Residuos Sólidos Urbanos por Arco de Plasma en el Gran Buenos Aires, la cual consta de una unidad de clasificación y pre-tratamiento de residuos, un proceso de valorización energética de residuos mediante la gasificación y vitrificación por antorchas de plasma y un módulo de generación eléctrica.

El proyecto es interesante básicamente desde dos puntos de vista. En primer lugar contempla la problemática ambiental y propone una alternativa concreta al tratamiento de residuos de las grandes urbes, valorizando energéticamente sus residuos. Por otra parte, genera electricidad para suministrar a la red, en la actualidad de gran interés dada la situación crítica del sector energético argentino con marcadas crisis en los últimos años.

1.1. Tecnología por arco de plasma.

La tecnología propuesta es innovadora y ha sido probada con éxito en varios países. Actualmente existen mas de cinco plantas instaladas y funcionando alrededor del mundo en Utashinai Japón (Hitachi), Morcenx Francia (Europlasma), Inglaterra (Advanced Plasma Power), entre otros lugares

El plasma es el cuarto estado de agregación de la materia, en el cual los gases ionizados a elevadas temperaturas que superan los 4000° C. A estas altísimas temperaturas, no se produce la combustión de las moléculas orgánicas, sino que las mismas se gasifican y disocian en su totalidad, formando un gas de síntesis apto para la generación de electricidad. La tecnología de plasma ha desarrollado en la década del 70 como consecuencia de investigaciones de la industria aeroespacial, especialmente la NASA.

En lo que respecta a los residuos urbanos RSU, los mismos consisten de sustancias orgánicas e inorgánicas. En esta tecnología (Figura 1) las primeras se gasifican y forman el gas de síntesis (o syngas), el cual, una vez depurado, es introducido en una unidad de ciclo combinado para generar electricidad. La energía generada abastecerá los requerimientos energéticos de la planta y los excedentes serian inyectados en la red. Las sustancias inorgánicas (vidrio, cascotes, polvos y arenas, metales pesados) se fusionan, transformándose en un slag, lava de tipo volcánico (basalto inerte y no lixiviable) que se recoge en el fondo de la cámara de reacción y se solidifica en el exterior. Este material inerte presenta aplicaciones comerciales como material de construcción, base para carreteras, ladrillos, baldosas y tejas

En la Figura 1 se presenta un esquema del diagrama del proceso de gasificación y vitrificación de RSU por arco de plasma para la obtención de energía y material vítreo. Después de la recepción de los RSU, estos son clasificados, separando aquellos residuos que se reciclan (papel, cartón, plásticos

y férricos), el resto, aproximadamente ingresa al reactor para su gasificación. La salida es el syngas y material vítreo. El gas de síntesis posteriormente es sometido a un proceso de limpieza para su ingreso en el sistema de ciclo combinado para generar electricidad.

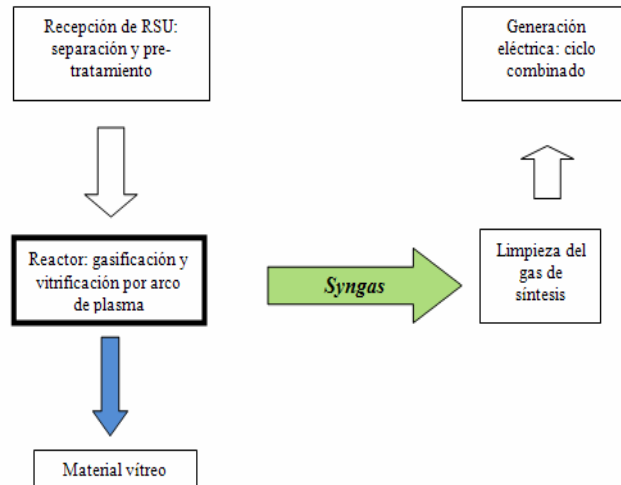


Figura 2 Esquema simplificado del proceso

1.1.1. Clasificación de residuos RSU.

No todos los RSU que se reciben en la planta pueden ser gasificados; un porcentaje considerable de ellos son separados y reciclados. En la siguiente tabla se indican ambos tipos

Tabla 1 Residuos RSU

TIPO	% PESO
Papeles y Cartones	14,54
Plásticos	10,50
Metales Ferrosos	0,90
Metales No Ferrosos	0,28
Subtotal RSU Reciclados	26,22
Desechos Alimenticios	43,23
Residuos de Poda y Jardín	7,69
Vidrio	5,50
Pañales Descartables y Apósitos	4,33
Materiales Textiles	3,95
Misceláneos Menores a 25,4 mm	3,17
Materiales de Construcción	1,80
Madera	1,60
Goma, cuero, corcho	1,01
Otros	1,50
Subtotal RSU Gasificados	73,78
Total RSU Tratados	100 %

En la Figura 2 se indica el esquema simplificado del proceso de separación y clasificación de RSU. El primer dispositivo de la línea que abastece a los reactores de RSU es un equipo que rasga las bolsas y facilita el vaciado de las mismas. El correcto funcionamiento y efectividad de este dispositivo es clave para que se produzca una adecuada clasificación y separación de los RSU que van a gasificarse de aquellos que no.

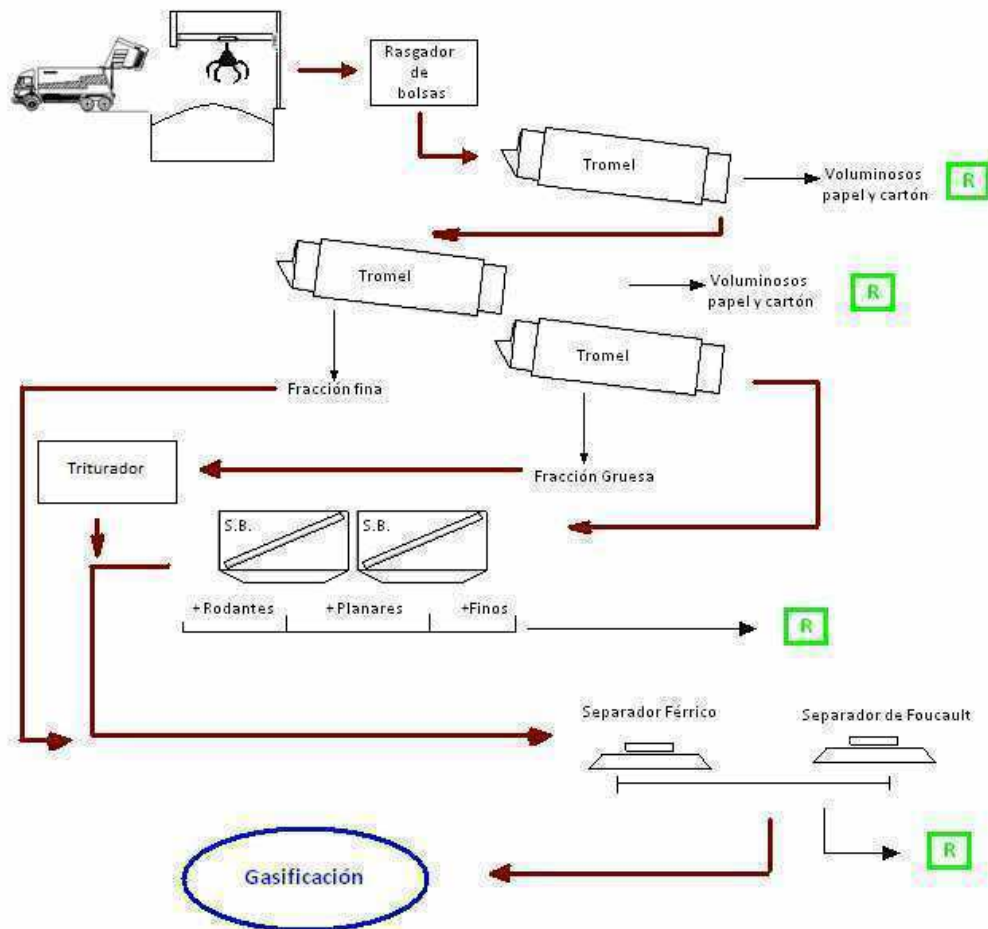


Figura 3 Diagrama simplificado del proceso de separación y clasificación de RSU
(Línea de clasificación)

Posteriormente las bolsas son rasgadas, los RSU son conducidos a una serie de tromeles (dispositivos cilíndricos horizontales, agujereados, giratorios) que separan la primera fracción reciclable: papeles y cartones. Por otra parte, clasifican a los residuos en dos grupos dependiendo del tamaño, una fracción fina y una fracción gruesa. Esto se realiza a través de mallas perforadas con agujeros de distintos diámetros. La fracción gruesa es enviada a molinos trituradores que reducen su grosor, siendo el resultado final, fracción fina. Esta última fracción se junta luego con aquellos residuos que si atravesaron los agujeros (fracción fina) y continúan directamente hacia los recuperadores de metales. Por su parte, los RSU recuperados en los tromeles para su reciclado

continúa en una serie de filtros vibrantes denominados separadores balísticos, cuya función es clasificarlos según su volumen (planar, cilíndrico, rodante, etc.). La evacuación de los elementos clasificados en esta primera separación es automática.

Finalmente, el flujo de RSU remanente (fracción fina) continúa hacia un separador férreo (electroimán) que separa los elementos metálicos de los RSU que van a gasificarse. Este dispositivo, por medio de una corriente eléctrica, genera un campo magnético que atrae y separa a los residuos férricos. Así mismo, a continuación del separador férreo, un separador por corriente de Foucault retira del flujo de RSU los metales no férricos tales como el aluminio.

Respecto al proceso de clasificación y separación de residuos, se instalarán tres líneas de clasificación paralelas de 35 ton/h cada una, totalizando una capacidad nominal de 105 ton/h. Si bien con dos líneas se alcanza y se supera la capacidad de planta (casi 60 ton/h), para garantizar la continuidad del proceso se decidió instalar tres líneas de clasificación, teniendo la opción de que trabajen las tres líneas en forma simultánea¹ o bien solo dos de ellas² y disponer una línea de back-up en caso de avería o paro por mantenimiento.

1.1.1. Gasificación y vitrificación por arco de plasma.

La tecnología de “antorcha de plasma”, consiste básicamente en someter a una corriente de gas a un potente arco eléctrico que descarga entre los dos electrodos del dispositivo generador del plasma (antorcha), alcanzando temperaturas de 5000° C en el corazón del arco.

A estas elevadas temperaturas el gas se encuentra en el estado de plasma, donde se hallan la estructura atómica y molecular primitiva del gas se ha quebrado, no existiendo enlaces y los núcleos atómicos envueltos en una nube de electrones.

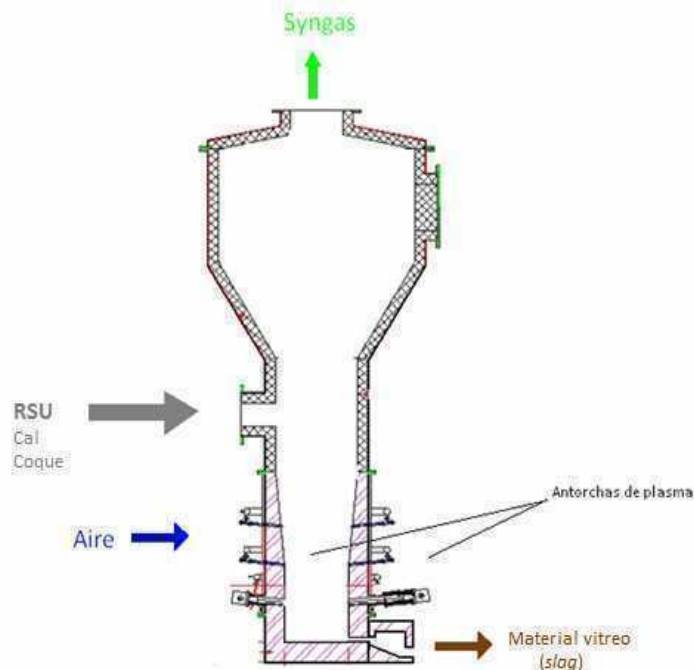


Figura 4 Esquema del reactor gasificador de plasma

El reactor gasificador de plasma (Figura 4) consiste de una vasija vertical con diferentes secciones cilíndricas y cónicas. El mismo está fabricado en acero al carbono y recubierto interiormente de material cerámico refractario, debiendo calcularse su espesor de forma de optimizar las

características del reactor en cuanto a mantenimiento de los mismos, pérdidas de calor y fundamentalmente para mantener el gradiente de temperaturas necesario en el interior. Dentro de la cámara del reactor se producen dos flujos en contracorriente. Por un lado, el plasma asciende y los residuos descienden, produciendo diferentes efectos.

Por la parte central ingresan los RSU a gasificar y los aditivos (coque y cal) para ajustar el porcentaje de carbono en el interior y regular la catálisis del proceso de gasificación. En la parte inferior se ubican las tres antorchas. El aire para generación del plasma se comprime y se introduce a través del interior de cada antorcha. El cuerpo de las antorchas, así como también el reactor, se refrigera por agua para protegerse de las altas temperaturas. Por la salida superior egresa el gas de síntesis Syngas y por la inferior el slag (material vítreo).

La Figura 5 indica los productos en forma porcentual, totalizando el syngas el 93%

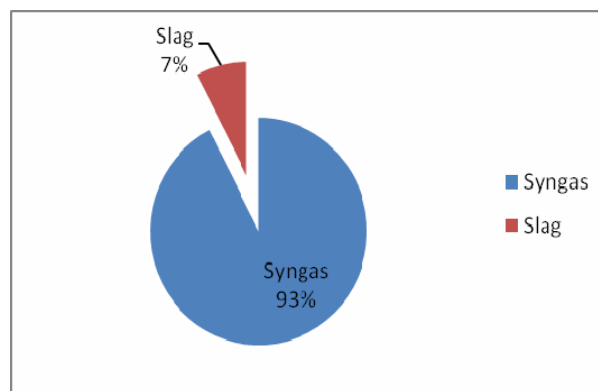


Figura 5 Productos del proceso en %

1.1.2. Gas de síntesis.

Las moléculas orgánicas contenidas en la corriente de residuos RSU se disocian térmicamente (*pirólisis*) por oxidación parcial en atmósfera reductora y controlada de los elementos simples resultantes. Estos constituyen lo que se denomina gas de síntesis (Syngas), el cual está compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), etileno (C₂H₄), dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂) y trazas de ácidos inorgánicos (clorhídrico y sulfhídrico), así como vapor de agua, como se indica en la Tabla 2..

Tabla 2 Composición del gas de síntesis (Syngas)

Componente	% en peso	% en volumen
H ₂	4,38	39,45
CO	66,90	43,04
CO ₂	15,17	6,21
N ₂	5,31	3,42
H ₂ S	0,09	0,05
H ₂ O	7,39	7,40
C ₂ H ₄	0,39	0,25
HCl	0,37	0,19
Total	100%	100%

No se detecta oxígeno libre dado que la cantidad de aire inyectado es inferior a la estequiométricamente necesaria para la oxidación total de los elementos. Los tres primeros componentes (CO , H_2 , y C_2H_4), tienen un potencial energético que permite su aprovechamiento. Los contaminantes ácidos son neutralizados, precipitados y separados de la corriente de gas de síntesis por medio del sistema de lavado y depuración del gas. Un elemento clave en el proceso de gasificación por plasma, es el uso del lecho fijo y consumible de coque. Este catalizador se gasifica a un ritmo más lento que el residuo a tratar, lo que permite la formación y estabilidad del lecho, que permite la distribución homogénea del calor y gas de las antorchas, evitando la formación de "camino preferenciales" dentro del reactor.

1.1.3. Slag.

Los compuestos inorgánicos no gasificables (vidrio, cascotes, polvos, arenas, metales pesados) se tratan a temperaturas superiores a los 3000°C , se disocian y fusionan, transformándose en una lava de tipo volcánico indicado en la Figura 6, que se vierte por gravedad a la parte inferior del reactor y se recoge en el fondo de la cámara de reacción. La masa fundida se solidifica en forma vítrea en una estructura cristalina similar al basalto, completamente inerte y no lixiviable, afuera del reactor y es transportada y almacenada para su posterior uso



Figura 6. Material vítreo

La composición química está principalmente formada por óxidos, dióxidos, sílice, alúmina y cal, indicados en forma aproximada en Tabla 3.

Tabla 3 Composición aproximada del slag

Componente	%	Componente	%
CaO	31	Na ₂ O	4
SiO ₂	25	MgO	3
Al ₂ O ₃	18	TiO ₂	2
Fe _x O _y	9	CuO	0,5
Cr ₂ O ₃	7	Otros	0,5

La producción de basalto depende de la composición de los residuos tratados, y oscilará entre 2 y 3 toneladas por hora. Este slag sale del reactor fundido a altas temperaturas, por lo que debe ser enfriado. El enfriamiento se puede realizar por agua o por aire, en función de la disponibilidad de agua. Para operaciones en continuo, como es el caso estudiado, lo adecuado parece ser enfriar el basalto en un recipiente con agua.

Cabe hacer una comparación con una instalación de incineración. En esta aproximadamente el 25% del residuo se transforma en escorias y en cenizas de carácter tóxico, siendo por lo tanto necesaria su

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



disposición final en rellenos sanitarios. En una instalación de gasificación y vitrificación por antorcha de plasma el desecho es un material de características vitro-cerámicas, en una proporción del 5 - 10% del material inicial en peso, muy compactas, inertes y con unas cualidades que lo hacen apto para su utilización como material de construcción.

2. Capacidad de la instalación.

La planta proyectada funcionará en forma continua y tendrá una capacidad para tratar 2.122 toneladas diarias de residuos brutos (1), de los cuales el 14% se gasifica. La planta contará con tres reactores plasma, trabajando en paralelo, con una capacidad de procesar en forma conjunta 65,25 ton/h de RSU (21,75 ton/h cada reactor gasificador).

Se considera un factor de utilización de la instalación del 85%, que contempla periodos de inactividad provocados por paradas programadas, arranques, acciones de mantenimiento preventivo y correctivo, imponderables. Tomando en cuenta este factor se estima que la planta gasificará unas 7.500 hs por año, lo cual se traduce en aproximadamente 650.000 toneladas anuales de RSU.

Si se considera que en el Gran Buenos Aires (GBA) sus habitantes producen cerca de 5 millones de toneladas anuales de residuos, esta planta trataría aproximadamente el 15% de los RSU generados. La capacidad de generación de la instalación se seleccionada en base al límite máximo de 120 MW impuesto por la licitación de carácter nacional e internacional ENARSA N° EE 001/2009, (2). En caso de analizar el tratamiento de una proporción mayor de RSU la energía generada no podría inyectarse en la red bajo la normativa actual.

2. Generación energética

Se propone un sistema de generación eléctrica por ciclo combinado, compuesto por un ciclo de gas, sistema de recuperación de calor con HRSG, y un ciclo de vapor TV. El vapor para el ciclo de vapor se genera en dos calderas de recuperación HRSG1 y HRSG2, que recuperan flujos calóricos por un lado de la salida de los humos en la turbina de gas TG y por otro del proceso en el reactor.

En la Figura 7 se presenta un esquema de la instalación.

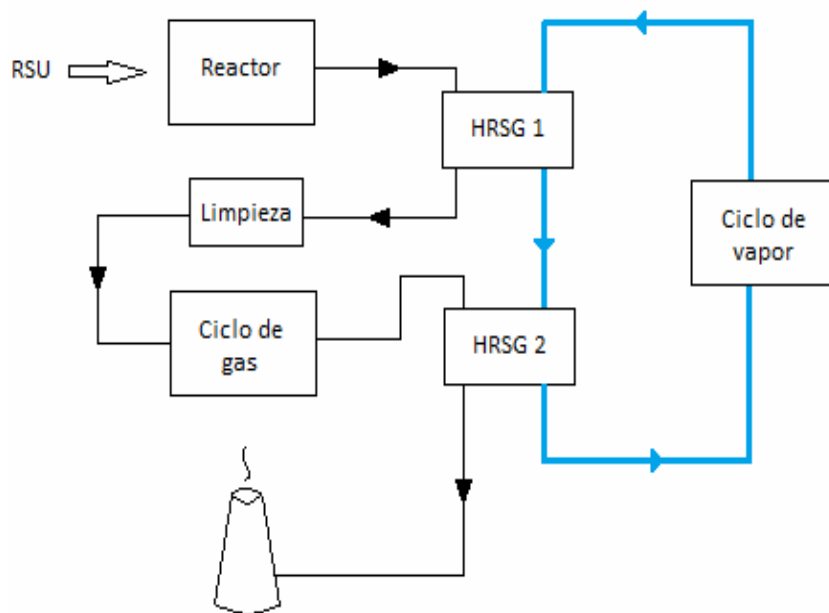


Figura 7 Esquema del sistema propuesto

2.1 Ciclo de gas

El ciclo de gas se alimenta del Syngas producido en el reactor antes mencionado, previamente se recupera calor mediante HRSG1 y se procede a la limpieza del gas. El Syngas entra en el ciclo de gas y los humos a la salida de la sección de turbina de gas TG se enfrían mediante el HRSG2. La salida de los humos va a chimenea.

Para dimensionar la TG se realizó un estudio termodinámico de la combustión del gas de síntesis (1). Para ello fue necesario conocer el caudal de gas saliente del reactor, el caudal de aire de la turbina y la variación de temperatura de los gases en TG, Tabla 4.

Tabla 4 Parámetros de dimensionamiento de TG

Caudal de Syngas ¹	\dot{m}_{Syg}	8,5	kg / seg
Caudal de Aire ²	\dot{m}_{ai}	116,5	kg / seg
Caudal total (humos) ⁴	\dot{m}	125	kg / seg
Temperatura de entrada	T_e	1260	K
Temperatura de salida	T_s	755	K

¹ Datos aproximados provistos por fabricantes de reactores.

² Mezcla compuesta por 93,2 % aire y 6,8 % por Syngas (combustible).

Datos característicos de un reactor gasificador típico.

³ Consumo de aire de TG General Electric modelo MS5001

Se propone la instalación de 3 unidades, o sea tres TG con una potencia neta de cada unidad de 27,26 MW con una relación de retroceso de 58% y un rendimiento térmico del 33%. La instalación genera en total una potencia de 81,78 MW.

2.2 Ciclo de vapor

El ciclo de vapor emplea el calor recuperado en el sistema para la generación de vapor en dos puntos: uno a la salida del reactor gasificador donde se produce el enfriamiento del flujo de Syngas desde los 1250° C hasta unos 300° C y otro con el enfriamiento de los gases (humos) a la salida de la TG en el ciclo de gas.

El proceso de recuperación de calor en estos dos puntos se da a través de dos calderas de recuperación HRSG. En primera instancia, el agua es calentada en HRSG1 por el flujo de Syngas a la salida del reactor. Posteriormente esta agua ya caliente es conducida hacia la segunda HRSG2 que se encuentra a continuación de la TG.

La composición química de los gases syngas se indica en la Tabla 5.

Tabla 5 SynGas circulante por caldera HRSG1

Humos	%	Humos	%
CO	66,90	H ₂	4,38
CO ₂	15,17	C ₂ H ₄	0,39
H ₂ O	7,39	HCl	0,37
N ₂	5,31	H ₂ S	0,09

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



El balance termodinámico indica que el calor recuperado en la HRSG1 es de aproximadamente 16,5 MW, considerando la composición química indicada en la Tabla 2. El calor recuperado de los humos en la HRSG2, a la salida de TG resulta de un valor de 49,6 MW, siendo las características de los humos los indicados en la Tabla 6.

Tabla 6 Datos de los humos por caldera HRSG2

Caudal de Syngas	8,5	kg / seg
Caudal de Aire	116,5	kg / seg
Temperatura de entrada	755	K
Temperatura de salida	370	K

Definidas las condiciones de las calderas HRSG1 y HRSG2, el caudal de vapor que circula por la TV en el ciclo de vapor resulta de 19,7 kg/s. Considerando que el rendimiento isentrópico de la TV y de la bomba asociada al este ciclo es del 90%, resulta una potencia neta de 18,48 MW y un rendimiento térmico del 31%.

2.3 Ciclo combinado

Considerando el volumen de residuos a tratar se consideró la instalación de tres líneas de proceso. Las características técnicas del ciclo combinado indican que el rendimiento térmico es del 46%. La potencia instalada de cada ciclo se indica en la Tabla 7 para cada una de las tres líneas.

Tabla 7 Ciclo combinado

Ciclo	Línea	Potencia instalada	
		MW	
gas	1	27,26	81,78
	2	27,26	
	3	27,26	
vapor	1	18,48	55,44
	2	18,48	
	3	18,48	
		TOTAL	137,22

La potencia neta a generar es de 137,22 MW. El mayor consumo energético de la planta se ubica en las antorchas rondando los 17 MW, lo cual conduce a una potencia neta de 120 MW. A continuación se resumen las características de la planta.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

Tabla 8 Capacidad instalada

Cantidad de reactores	3	unidades
Capacidad de gasificación	65,25	ton / hora
	1.566,0	ton / día
Capacidad nominal RSU	88,44	ton / hora
	2122,5	ton / día
Total nominal anual RSU	774.722,1	ton / año
Potencia Instalada	137,22	MW
Consumo interno	16,65	MW
Potencia disponible a red	120,57	MW

Si se consideran los RSU procesados en función de la entrada de materia prima se genera 1,37 MW y 0,09 ton de slag por cada tonelada de RSU, como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9 Relación de productos obtenidos respecto a RSU procesados

Potencia	1,3633	MW / ton RSU
<i>Slag</i>	0,0841	ton / ton RSU
Papeles y Cartones	0,1454	ton / ton RSU
Plásticos	0,105	ton / ton RSU
Metales Ferrosos	0,009	ton / ton RSU
Metales No Ferrosos	0,0028	ton / ton RSU

En la figura siguiente, Fig. 8, se indican los ingresos por venta, que surgen del análisis económico del proyecto, siendo la venta de energía el factor de mayor incidencia, alrededor del 79%.

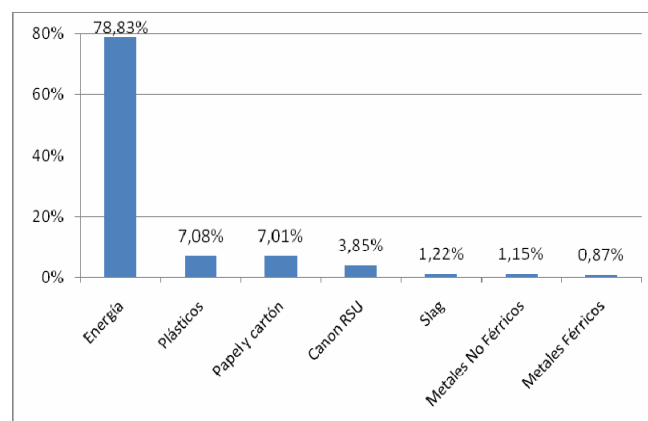


Figura 8 Ingresos por venta

En la Figura 9 se presenta la inversión en capital necesaria en US\$/kW empleando distintas tecnologías para las principales fuentes de energía, nuclear, solar, planta de carbón, turbina eólica, ciclo combinado considerando que opera con gas CC gas o con Syngas obtenido de RSU en CCGR.

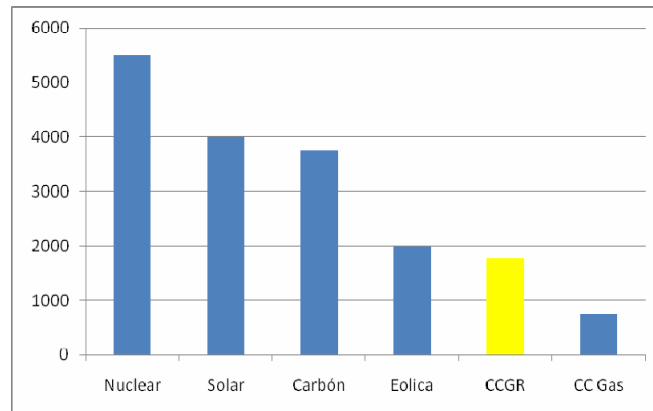


Figura 9 Inversión en capital en US\$/kW según tecnología

En lo que respecta a diferentes alternativas tecnológicas para generación de energía eléctrica, la gasificación por arco de plasma y posterior combustión del gas de síntesis en un ciclo combinado es una opción competitiva teniendo en cuenta su bajo nivel de capital invertido por unidad de potencia generada, su moderado nivel de impacto ambiental y su independencia de un recurso no renovables. Las plantas de ciclo combinado simples abastecidas con gas natural CC Gas son las más económicas, debido a que es una tecnología sencilla con grandes desarrollos en la últimas décadas y que emplea materiales tradicionales. En contraposición la instalación de plantas de energía nuclear son las más caras debido a la sofisticada tecnología que emplean, complejidad del proceso y materiales empleados.

3. CONCLUSIONES.

La instalación de una planta para generar energía eléctrica mediante la gasificación de residuos sólidos urbanos por arco de plasma es un proyecto de gran envergadura, que requiere una fuerte inversión y que tiene resultados a largo plazo. Se presenta esta tecnología por un lado como una forma de ayudar a resolver la problemática de la basura y por otra valorizando energéticamente los residuos urbanos.

El proyecto se apoya en la licitación pública nacional e internacional ENARSA nº EE 001/2009 que establece un máximo de 120 MW de energía producida a partir de residuos sólidos urbanos, valor considerado como tope máximo de la capacidad de planta.

En este sentido, se destaca una marcada volatilidad y dependencia del resultado económico a esta variable. El precio de venta de la energía propuesta es de 120 U\$/MWh.

El marco legal y normativo del proyecto es muy favorable, tanto desde el sector energético como desde el sector de la gestión de los residuos. Se considera clave para el desarrollo exitoso del proyecto el convenio que se establezca con el CEAMSE.

4. REFERENCIAS.

- [1] Bussolini Ignacio. (2011) Trabajo final de grado, Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata.
- [2] ENARSA Nº EE 001/2009, (2009) Licitación nacional e internacional, Buenos Aires.
- [3] Sosa Maria Isabel; Fushimi Alberto (2007) "La Utilización Racional de los Combustibles, una Responsabilidad no valorada debidamente en nuestro País", 6º Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de la Energía Eléctrica, A-102. Mar del Plata, Argentina, Noviembre.



Evaluación de la cosecha de microalgas con miras a la extracción de aceite para la producción de biodiesel, a partir del método de coagulación - floculación

Ávila, Adrian¹, Mendoza, Jorge¹, Gómez, Rafael¹, Verdeza, Arnaldo¹

¹Universidad Pontificia Bolivariana-Montería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo OPUREB.
Km 8 Vía Cereté Barrio Mocari, Montería-Córdoba-Colombia
aeavilag@gmail.com, jorgemmf@gmail.com.

RESUMEN.

Las microalgas como recurso renovable alternativo, han causado en la comunidad científica gran interés por su producción, ya que es una fuente potencial de biodiesel que no compite con cultivos alimenticios a diferencia de los biocombustibles actuales, y el rendimiento obtenido de hasta 15 veces más aceite por hectárea de los cultivos comúnmente utilizados [1]; además, es una fuente que pueden ser cultivadas en agua salada de baja calidad o en aguas residuales cargadas de nutrientes, lugares donde no hay cantidad o calidad de suelos para realizar los cultivos alimenticios convencionales. En este artículo se establecieron las condiciones óptimas de cosecha para cultivos de Microalgas a partir del método de coagulación-floculación, donde inicialmente, se evaluaron dos coagulantes (Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico) con el fin de establecer cuál de estos presentaba un mayor porcentaje de remoción. Esto se realizó con los equipos convencionales a escala laboratorio de tratamientos de aguas donde se utilizaron equipos como el JAR TEST. Una vez logrado la identificación del coagulante y mediante un diseño de experimento, se evaluaron las variables que intervienen en el proceso de cosecha por el método empleado, que ayudaron a determinar las condiciones óptimas para el proceso. Dentro de los resultados obtenidos, se encontró que el cloruro férrico proporcionó mejor porcentaje de remoción con respecto al sulfato de aluminio, donde originó la formación de flóculos pesados y compactos que ayudaron a su rápida sedimentación y a la obtención de valores de turbiedad bajos. También se observó que las variables significativas son las velocidades rápidas, velocidades lentas y la dosis del coagulante, en el cual la dosis óptima es de 9 ml y las velocidades rápidas y lentas se presentan a menores proporciones.

Palabras Clave: Biocombustibles, Microalgas, Coagulación-Floculación, Biodiesel.

1. INTRODUCCIÓN

Las microalgas como recurso renovable alternativo, han causado en la comunidad científica gran interés por su producción, ya que es una fuente potencial de biodiesel que no compite con cultivos alimenticios a diferencia de los biocombustibles actuales, y el rendimiento obtenido de hasta 15 veces más aceite por hectárea de los cultivos comúnmente utilizados [1]; además, es una fuente que pueden ser cultivadas en agua salada de baja calidad o en aguas residuales cargadas de nutrientes, lugares donde no hay cantidad o calidad de suelos para realizar los cultivos alimenticios convencionales. En Colombia, las investigaciones en caminadas a la producción de biodiesel a partir de las microalgas se enfocan en las especies *Chlorella*, *Botryococcus* y *Scenedesmus* para agua dulce [2], y a diferencia de países europeos, Colombia cuenta con la disponibilidad de mayor tiempo de la luz solar y estabilidad en el clima, lo que favorecería el inicio para el desarrollo de la nueva generación de biocombustibles en el país. Las microalgas son seres unicelulares que varían según su especie y forma. Se caracterizan por tener mayor eficiencia en cuanto a la utilización de la luz, la cual, es un factor vital para el proceso de fotosíntesis [3]. Normalmente o preferentemente las microalgas habitan en ambientes húmedos y superficiales donde estén expuestas a las radiaciones solares. Son fundamentales en la utilización como alimento para humanos y animales y en su actividad nutricional, necesitan de elementos inorgánicos, tales como nitrógeno, oxígeno, carbono, hidrógeno, fósforo y azufre, que permiten la formación de carbohidratos y proteínas. Durante las últimas décadas, los cultivos de microalgas están siendo utilizados para el tratamiento de aguas residuales, biofertilizantes y generación de aceites para la producción de Biocombustibles. Este último, contribuye a la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y a su vez, de las contaminaciones ambientales causadas por estos. Además, frente a las necesidades bioenergéticas, favorece la no utilización de materias primas que sean utilizadas para la alimentación humana, lo cual hace del cultivo de microalgas, la provisión de menos área de cultivo y permitir mayor eficiencia en la obtención de biomasa.

1.1. Proceso de crecimiento

Dentro del proceso de crecimiento básico en los cultivos de microalgas y teniendo en cuenta condiciones ideales de crecimiento, se puede observar experimentalmente que tanto la biomasa como la concentración, aumentan exponencialmente con respecto al tiempo. Esto representa que estando en condiciones ideales, las células tienen la misma probabilidad de multiplicarse y así, la tasa de crecimiento de formación de biomasa es proporcional a la misma biomasa. Para describir el comportamiento celular, se encuentran cinco fases, las cuales se definen por el número de células presentes a un tiempo determinado y por las condiciones generales del cultivo. En la figura 1 se puede apreciar como la concentración de sustrato desciende en la fase estacionaria, donde las células han encontrado el punto limitante de crecimiento por la falta de este [5].

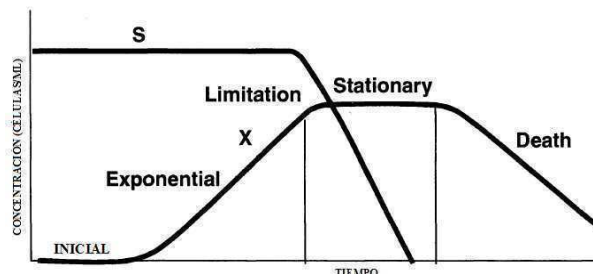


Figura 1: Comportamiento de crecimiento en cultivos de microalgas [6].

1.2. Condiciones de cultivo.

Las microalgas son organismos que pueden convertir la energía solar en biomasa con una alta eficiencia y tasa de multiplicación [3], por lo que en un principio, y al igual que las plantas, estas necesitan de cuatro componentes básicos para su crecimiento: Iluminación (Solar o Artificial), Dióxido de Carbono (CO_2), Agua y Agitación. Sin embargo, estos factores para que actúen de manera coordinada y eficiente en el crecimiento de las microalgas, es importante mantenerlas y controlarlas puesto que influyen a que el cultivo pueda ser contaminado fácilmente, contribuyendo a que el

crecimiento sea ineficiente y a la muerte prematura de las microalgas [4,7, 8]. Los factores principales son; **Medio de cultivo:** Proporciona los requerimientos mínimos de agua, sales, minerales (macro y micronutrientes), nitrógeno, pH adecuado y en algunos casos, compuestos orgánicos y factores de crecimiento (vitaminas y hormonas) de acuerdo al objetivo por el cual se cultiva la microalga. **Iluminación:** Es el parámetro que rige la tasa fotosintética y con ello el rendimiento del microorganismo. La eficiencia de utilización de la energía luminosa repercute en una mayor biomasa por unidad de área. **Temperatura:** Afecta directamente las reacciones de metabolismo en la microalga, Una variación de temperatura no solo se ve en el pH del medio, sino también en las tasa de reproducción por día y funciones metabólicas. **pH:** Depende del medio de cultivo, la concentración de carbono inorgánico y la temperatura. Se utiliza como parámetro indicativo de la concentración del carbono a temperaturas controladas, conocido el pH inicial del medio nutrido y evidencia el consumo de carbono del microorganismo.

1.2.1. Sistemas de cultivo.

Los sistemas utilizados para el acondicionamiento de la vida de organismos como las microalgas, son los llamados fotobiorreactores (Figura 2). Estos sistemas, además de las condiciones necesarias, también tienen como finalidad aumentar la producción o la calidad del cultivo. Los fotobiorreactores son sistemas de circuito cerrado, donde las microalgas crecen en el agua y son bombeadas a las diferentes etapas que se presentan en el sistema; teniendo como proceso principal la captación de la luz (Solar o Artificial) que permite desarrollar en dichos microorganismos el proceso de la fotosíntesis [9].

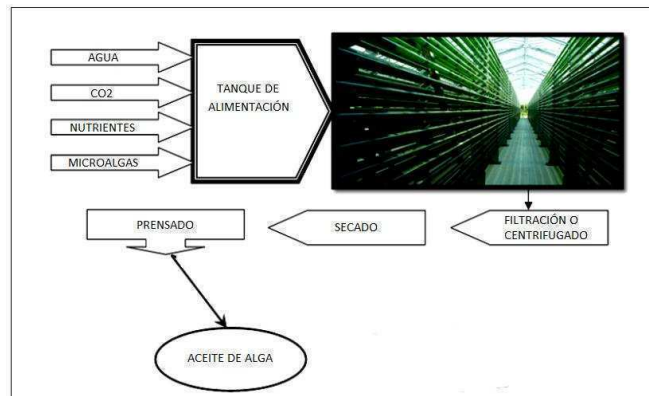


Figura 2: Diagrama de flujo de un fotobiorreactor.

1.2.2. Aspectos teóricos en el proceso de producción de microalgas.

Los aspectos fundamentales presentes en el cultivo de microalgas, involucra la selección de la cepa a cultivar, seguido de la cultivación, la extracción y el secado de la misma, tal como se puede apreciar en la figura 3. El producto final y como se ha mencionado anteriormente, puede utilizarse mediante un tratamiento adicional en biocombustible o bien sea, en productos farmacéuticos y alimenticios [10].

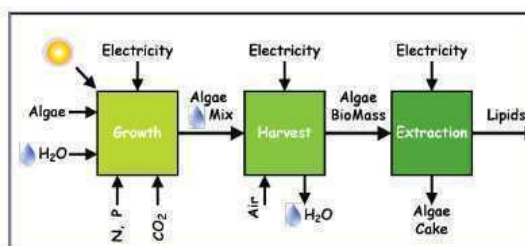


Figura 3: Proceso de Producción de microalgas [10].

Extracción: Luego del cultivo se realiza la etapa de extracción o separación de las microalgas del medio, consiste en separar el cultivo en una fase líquida y en una sólida mediante varios procesos, entre los cuales se encuentra la filtración, la coagulación química, la centrifugación, entre otros, y su

efectividad se ve reflejada en el porcentaje de recuperación y porcentaje de concentración de biomasa [10]. La centrifugación como uno de los métodos más utilizados, separa la biomasa de forma eficiente y sin necesidad de añadir compuestos químicos, además, acelera la velocidad de sedimentación de las microalgas [11]. Por su parte, el proceso de Coagulación – Floculación (figura 4) intervienen sustancias químicas que ayudan a unir las células, de tal forma que se formen coágulos para posteriormente su sedimentación.

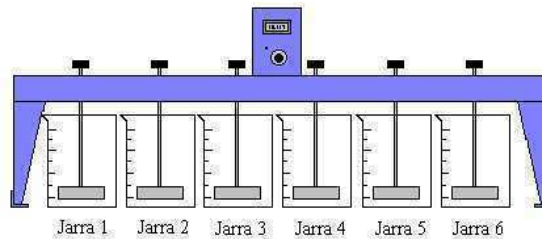


Figura 4: Sistema Jar Test para el proceso de coagulación-floculación.

1.3. Proceso de floculación.

El proceso de coagulación permite, mediante la alteración de algunas de las características del medio, la remoción de impurezas solubles o insolubles, el cual, entre estas últimas se encuentran las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Este proceso se lleva a cabo por la adición de sales de Aluminio y Hierro [12,13]. El tamaño de las partículas coloidales se encuentra por lo general entre los sólidos disueltos y la materia suspendida, presentan un diámetro entre 1 a 1.000 milimicrómetros, sin embargo, esta característica puede estar definida por su naturaleza. Mediante la repulsión electrostática y la hidratación se mantiene a los coloides en suspensión y son los principales responsables de la turbiedad del medio [13-15].

1.3.1. Proceso de Coagulación y floculación.

La coagulación se lleva a cabo generalmente por la adición de sustancias químicas y se ve acompañado del proceso de floculación, los cuales aglutinan las partículas en pequeñas masas llamadas flóculos aumentando así su peso específico produciendo finalmente la sedimentación de dichas partículas. De este proceso se pueden diferenciar dos fenómenos: **Químico:** El cual consiste en la reacción de coagulantes con el medio, que provoca la desestabilización eléctrica de algunas partículas. **Físico:** El cual consiste en el movimiento de las partículas dentro del medio para que entre sí hagan contacto y producir el aglutinamiento de estas. Este proceso se realiza en tanques donde se le adiciona una mezcla rápida para contribuir a que la solución se encuentre homogénea con respecto al medio y los coagulantes, y garantizar la formación de coágulos en el menor tiempo posible [16, 17]. El adicionamiento de coagulantes al medio, permite neutralizar las cargas, produciendo un colapso de la “nube de iones” que rodean los coloides de modo tal que se pueda producir su aglomeración. En este punto, influye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales, llamada fuerza de Van der Waals [17].

1.3.2. Mecánica de la Floculación.

Las sucesivas colisiones entre partículas coloidales son producidas por la adherencia de iones a la superficie de las mismas provocadas por la adición de coagulantes al medio [18]. Para producirse adherencia es necesario tener en cuenta la relación que hay entre el tamaño de las partículas, la concentración de las mismas, la agitación y la desestabilización de las partículas. El proceso de Floculación puede presentarse mediante dos métodos, los cuales son: **Floculación Pericinetica:** Es conocida como Floculación Browniana, debido a que las partículas del agua se mueven por el efecto de la energía térmica. **Floculación Ortocinetica:** En este proceso, las partículas colisionan debido al movimiento del agua y se puede presentar mediante agitación mecánica o hidráulica.

Floculantes: La remoción de las partículas en suspensión en un medio es necesaria de la utilización tanto de coagulantes y floculantes, sin embargo, se han presentado floculantes poliméricos que actúan tanto en el proceso de coagulación como el de floculación. Los floculantes por lo general son polímeros o polielectrólitos de pesos moleculares muy altos [19], y presentan la ventaja, que es

necesaria la utilización de bajas concentraciones para su dosificación [16,17]. Por lo anterior, al utilizarse dosis muy bajas, da un rango que varía desde 0,1 – 1,0 mg/L [19] como ayudantes de coagulación, mientras que al utilizarse como coagulantes y floculantes, su concentración puede variar de 1 – 5 mg/L [14]. Según la naturaleza de estas sustancias, los floculantes se pueden clasificar como siguen: En los floculantes **Minerales** se encuentran la sílice activada, la cual se debe preparar con anticipación ya que gelatiniza. Esta ayuda a aumentar considerablemente el tamaño de los flóculos a cierta dosis óptima, lo cual podría causar su deficiencia como floculante. Además, estos floculantes también son considerados como **Sintéticos**, los cuales son los más utilizados y se pueden clasificar según su carga en aniónicos, catiónicos y no iónicos [20]. Y floculantes **Naturales** o también llamados orgánicos, son los procedentes de sustancias animales y vegetales. Son de tipo iónico, en los cuales se utilizan dosis elevada para su empleo considerando que su costo es relativamente inferior al de los sintéticos. Dentro de este tipo de floculantes se encuentran los compuestos algínicos, derivados de la tuna y almidones [19].

1.3.3. Eficiencia en Remoción de turbiedad

Generalmente la determinación de la eficiencia en la remoción de la turbiedad, se presentan en las plantas de tratamiento de agua, estas exigen que al sedimentar se trabaje en torno a un determinado valor de turbiedad de salida, casi en forma independiente de las características del agua bruta [21]. En términos absolutos, la eficiencia se define como:

$$Eficiencia = \frac{T_b - T_s}{T_b} \quad (1)$$

Donde T_b es la turbiedad del agua bruta y T_s es la turbiedad del agua sedimentada. El parámetro T_b de la ecuación anterior, también puede describir la turbiedad inicial del medio y es importante que el porcentaje de eficiencia de remoción, deba ser variable en función del agua bruta, en el cual, se puedan comparar resultados y obtener conclusiones que permitan optimizar los procesos de clarificación.

2. METODOLOGÍA.

El objetivo de este proyecto busco identificar el coagulante y las condiciones de cosecha de microalgas existentes en un medio de cultivo, identificando la dosis óptima y la eficiencia a partir de la turbidez del medio, todo esto se realiza a partir del siguiente procedimiento: Para la prueba de coagulación – floculación se dispuso de un equipo JAR TEST (figura 5); FLOCULADOR E & Q LQAP – EM – 21; el cual consta de seis agitadores de paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 400 rpm), luces en la base del agitador que permitan observar los flóculos, y vasos de precipitado de 1000 ml de volumen. Además, para la toma de mediciones de pH y turbidez se dispuso de equipos como el pH 330 i WTW y el 2100PTurbidímetro Crea dl respectivamente.

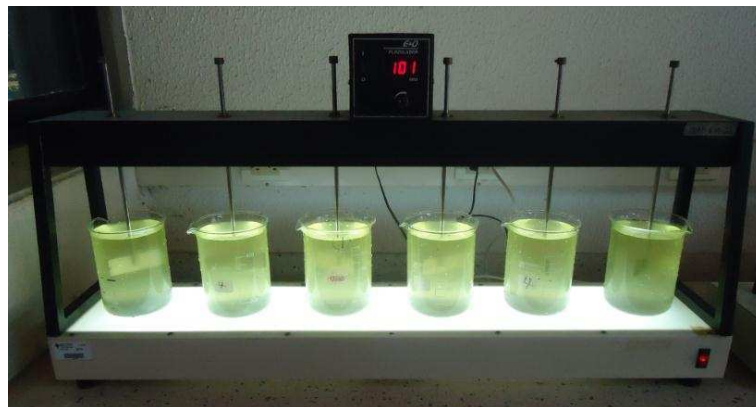


Figura 5: Equipo Floculador E & Q.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

Las pruebas de *identificación del coagulante* se realizaron bajo las condiciones descritas en la tabla 1 y 2 y utilizando los equipos antes mencionados.

Tabla 1: *Velocidades de agitación para las pruebas iniciales.*

MEZCLA	VELOCIDAD DE AGITACIÓN [rpm]	TIEMPO DE MEZCLA [Seg]
Rápida	115	15
Lenta	50	600

Tabla 2: *Condiciones de dosis para los coagulantes empleados.*

CONCENTRACIÓN%	Al ₂ (SO ₄) ₃ ml	Fe ₃ Clml
Jarra 1	0,5	
Jarra 2	2	
Jarra 3	5	
Jarra 4	10	
Jarra 5	15	
Jarra 6	30	

En esta primera práctica, las muestras de microalgas con densidad de 17.250.000 cel/ml, se distribuyeron en las jarras o vasos de precipitado, se tomaron las lecturas de pH y turbidez inicial y se dispusieron en la base del agitador a una velocidad inicial de 45 rpm. Seguido a esto, se adicionaron las diferentes dosis de Sulfato de Aluminio (Al₂(SO₄)₃) en las distintas jarras tomando en cuenta las condiciones de las tablas 1 y 2. Para las pruebas con el Cloruro Férrico, se siguió el procedimiento antes descrito y los resultados se tabularon para identificar la que mayor eficiencia de remoción presentó. Para la Prueba de **cosecha de microalgas**, las muestras se distribuyeron en las jarras o vasos de precipitado, se tomaron las lecturas de pH y turbidez inicial, seguido a esto, los vasos son puestos en la base del agitador para iniciar la mezcla rápida y posteriormente la mezcla lenta (Ver tabla 3).

Tabla 3: *Valores de velocidad y tiempo de agitación para la mezcla rápida y lenta en pruebas de Coagulación-Floculación.*

MEZCLA	VELOCIDAD DE AGITACIÓN [rpm]	TIEMPO DE MEZCLA [Seg]
Rápida	100 – 200	0 - 50
Lenta	45 -80	600-1200

De los dos coagulantes se empleó el cloruro Férrico (FeCl₃) a una concentración del 5% (50.000 mg/L) y se adiciono a los vasos de muestras 0,5 a 30 ml del coagulante. Las pruebas se realizaron mediante un diseño de experimento con un arreglo factorial al azar para las variables a evaluar. Las pruebas de coagulación-floculación se realizaron a cultivos de microalgas *Chorella Bulgaris*, en el cual se cultivaron en condiciones controladas de iluminación, pH, oxígeno disueltos y nutrientes, obteniendo así densidades de cultivos de 9.000.000 Cel/ml. La eficiencia de remoción se realizó al culminar las pruebas de coagulación-floculación, donde se dejó sedimentar los flocúlos entre los 10 y 20 minutos para luego realizar el análisis de remoción por medio de la eficiencia utilizando la ecuación 1.

3. RESULTADOS.

Una vez alcanzado los objetivos propuestos, se presentan los resultados de las pruebas experimentales de la evaluación del coagulante y los gráficos de eficiencia de remoción y turbidez a partir de las distintas dosis. Además, los resultados de las pruebas una vez evaluado el coagulante, que permitieron establecer el comportamiento de las diferentes variables que intervienen en el proceso. Las tablas 4 y 5 muestran los resultados de valores de turbiedad para los coagulantes utilizados, Sulfato de Aluminio y Cloruro Férrico respectivamente, acompañado de gráficos (figura 6) que ilustran el comportamiento de la turbiedad con respecto al volumen añadido del coagulante.

Tabla 4: Resultados Experimentales del Proceso Coagulación/Floculación utilizando Sulfato de Aluminio.

JARRA	DOSIS [ml]	T _f [NTU]
1	0,5	70,8
2	2	70,4
3	5	58,6
4	10	12,2
5	15	16
6	30	2,56

Tabla 5: Resultados Experimentales del Proceso Coagulación/Floculación utilizando Cloruro Férrico.

JARRA	DOSIS [ml]	T _f [NTU]
1	0,5	66
2	2	58
3	5	58
4	10	17
5	15	3
6	30	5

Las gráficas a y b de la figura 6, muestran el comportamiento de la turbiedad con respecto a la dosis del coagulante añadido, para estos casos el Sulfato de Aluminio y el Cloruro Férrico respectivamente, donde este último, al presentar valores de turbiedad más bajos permitió que se presentara mayor remoción de Microalgas, según lo observado en las muestras.

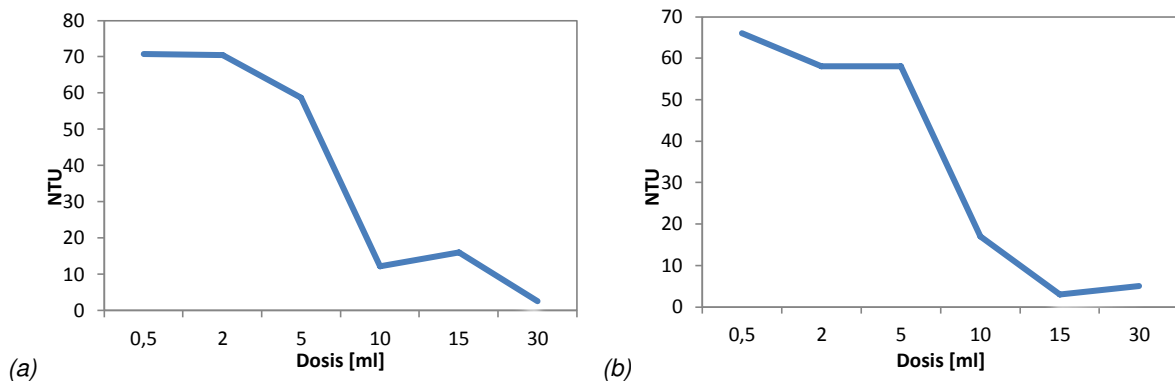


Figura 6: Curva Experimental para el Sulfato de Aluminio (a) y Cloruro Férrico con Turbiedad Inicial < 100 (b).

En las pruebas con el Cloruro Férrico, la turbiedad descendía a medida que la dosis del coagulante aumentaba, sin embargo, para la dosis mayor se presentó un aumento no muy significativo que probablemente haya sido causado por la concentración del coagulante en la muestra, queriendo decir, que el valor leído de la turbiedad, podría ser originado por el color amarillento del coagulante y no por la concentración de microalgas. En esta parte del proyecto se desarrolló un diseño experimental completamente aleatorio, en el cual se busca realizar comparaciones homogéneas de las variables que intervienen en el proceso, con el fin de identificar los cambios producidos por estas y simultáneamente, detectar las que mayor influencia presentan en él. Esto, se realiza mediante el análisis de varianza (ANOVA por sus siglas en inglés) por regresión lineal, que ayuda a determinar los valores más significativos de las variables para que la respuesta tenga mejor variabilidad, del análisis de varianza (Tabla 6) realizado por el programa DesingExpert®, versión 8.0, para la variable turbiedad final con un nivel de confianza del 95%, se obtuvo un valor $p < 0.05$ en el caso de la velocidad rápida, velocidad lenta y dosis, lo que significa que existe influencia significativa de estos tres factores sobre este parámetro.

Tabla 6: *Análisis de varianza del modelo de regresión experimental.*

Origen	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad df	Cuadrado Medio	Valor f	P-Valor Prob>F
Model	1583,46	5	316,6915	7,2466	< 0.0001
A-Vr	720,73	1	720,7270	16,4918	0.0002
B-VI	378,66	1	378,6590	8,6645	0.0052
C-tr	8,20	1	8,1954	0,1875	0.6671
D-tl	0,18	1	0,1849	0,0042	0.9484
E-D	475,69	1	475,6911	10,8849	0.0019
Residual	1922,89	44	43,7021		
Total:	3506,35	49			

La figura 7 representa la normalidad de los residuos de los datos experimentales y se muestra que no existe una desviación marca de los errores con respecto a la línea normal, es decir, que desde -1 hasta 1.5 hay un comportamiento aproximadamente excelente, debido a que los residuos están alineados con la recta normal; en cambio, en -2 y 2 hay cierta desviación de los errores. Por lo que se asevera que los errores son mínimos y los datos en el proceso son confiables.

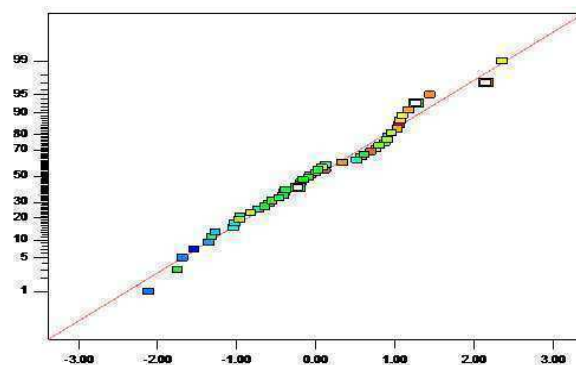


Figura 7: *Normalidad de residuos de los datos experimentales*

La figura 8 muestra los residuales contra los valores ajustados, en ella se observa que no hay ninguna estructura inusual que induzca a concluir la correlación de estos errores con un factor externo del experimento y la 9 muestra la secuencia de los residuales en la recolección de datos en el tiempo, se puede observar claramente que el error no marca ningún patrón funcional en el orden de las corridas, por lo que se afirma que los residuales no tienen dependencia alguna.

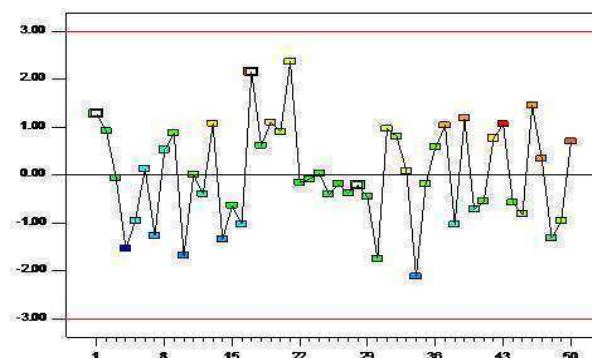


Figura 8: *Independencia de residuales en el tiempo de experimentación.*



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
INGENIERÍA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

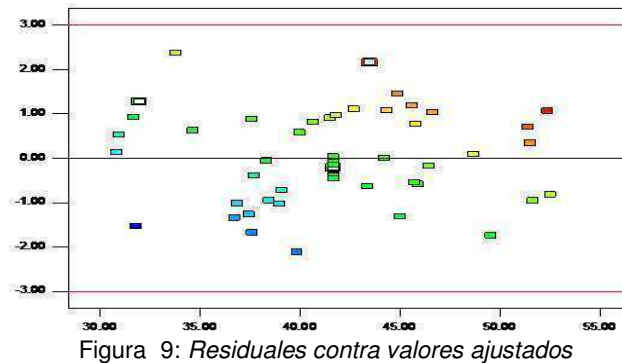


Figura 9: Residuales contra valores ajustados

De lo anterior se muestra que las conclusiones a partir de un análisis de varianza son confiables, ya que los errores del modelo experimental cumplen con los supuestos, sobre la confiabilidad de los resultados y la identificación de los valores significativos para el proceso. La figura 10 muestra los efectos de los factores sobre la respuesta del sistema en variable codificada. El efecto más marcado sobre la turbiedad es A (velocidad rápida) seguido del efecto de B (velocidad lenta) y el efecto de E (dosis) y con menor nivel de derivación encontramos el factor C (tiempo rápido) y el factor D (tiempo lento).

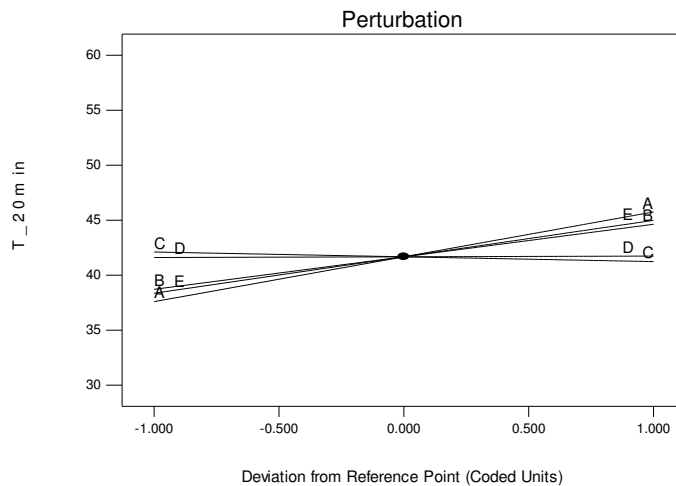


Figura 10: Gráfico de efectos de los factores en la respuesta de la turbiedad.

Para este diseño de experimento, existen tres variables (Velocidad rápida, Velocidad lenta y la dosis del coagulante) que relacionadas intervienen en la variable de respuesta (Turbiedad), por su parte los factores t_r y t_l (tiempo rápido y lento respectivamente) no son valores significativos que perturben la respuesta, por lo cual surge el interés de modelar y explorar esta relación, la cual puede ser caracterizable por un modelo de regresión ajustable a el conjunto de datos muestrales. Dando como resultado la siguiente ecuación de regresión para el ajuste de datos para el factor turbiedad:

$$T_{20min} = -20.12615 + 0.19404 * Vr + 0.40185 * Vl - 0.041383 * tr + 5.17952E - 004 * tl + 3437 * D \quad (2)$$

Ajustada a la superficie de respuesta mostrada en la figura 11, muestra la variabilidad de la turbidez en el proceso de cosecha de microalgas con respecto a la velocidad rápida y lenta. Para evaluar la eficiencia de remoción se utilizó la ecuación 2, el cual los resultados del Cloruro Férrico y del Sulfato de aluminio se muestran en la figura 12.



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
INGENIERÍA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

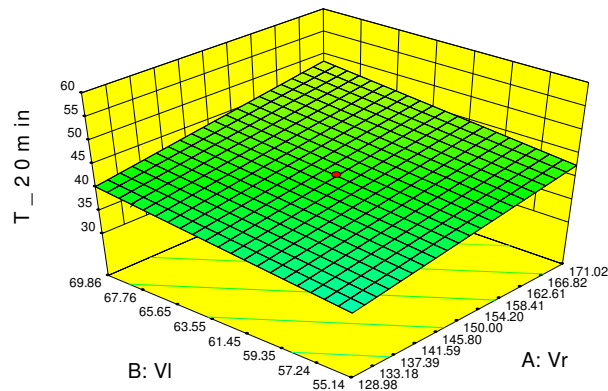


Figura 11: Superficie de respuesta de la Turbiedad con factores de Velocidad rápida y Velocidad Lenta.

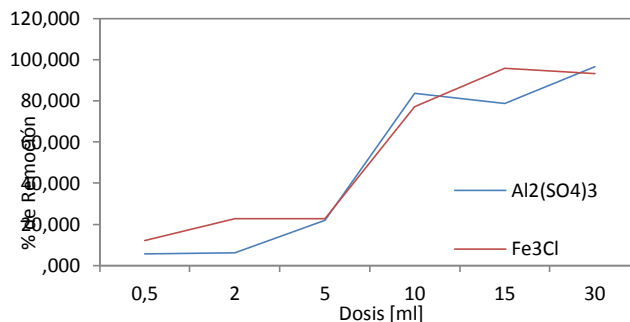


Figura 12: % de Remoción con respecto al volumen añadido del coagulante.

De la prueba experimental se observó que el Cloruro Férrico proporcionó mejor porcentaje de remoción con respecto al otro coagulante, donde origino flóculos pesados con una mayor velocidad de sedimentación y que además tenía la ventaja de trabajar con un amplio rango de valores de pH. Por lo anterior, se seleccionó el Cloruro Férrico para determinar las condiciones óptimas en el proceso de coagulación de microalgas a escala laboratorio. Las pruebas realizadas con el Cloruro Férrico para la determinación de las condiciones óptimas de cosecha, muestra los siguientes resultados de porcentaje de remoción con respecto a cada experimento realizado.

4. CONCLUSIONES.

Del estudio realizado se puede llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

A partir del estudio y experimentación con los dos tipos de coagulante que se utilizaron para la cosecha de microalgas, se obtuvo mejor resultado con el Cloruro Férrico (FeCl₃) debido a que presento mayor porcentaje de remoción, logrando la formación de floculo pesados y compactos que ayudaron a su rápida sedimentación y la obtención de valores de turbiedad bajos. Esto en gran parte se originó a la rápida desestabilización de las partículas coloidales.

Al comparar los resultados experimentales de turbiedad, se observó que los valores óptimos para el proceso de cosecha se encuentran en un valor de dosis de 9 ml, en el cual para valores de turbiedad bajos, la velocidad rápida y lenta se presenta a menores proporciones.

Para la cosecha de microalgas a partir del método de coagulación-floculación, los equipos utilizados deben de estar en óptimas condiciones. Al momento de adicionar el coagulante, es de vital importancia que en este proceso se realice de manera sincronizada, de lo contrario, no va a existir una buena homogenización en la mezcla, que es la que permite la mayor aglomeración de flóculos y a su vez, la que proporcionará mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.



5. REFERENCIAS.

- [1] Wendel Broere, (2008). Extrayendo Energía de las algas, Shell World.
- [2] Patiño Guzmán Carlos, Microalgas otra opción para producir biocombustibles, Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia. <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-429.htm>.
- [3] Bitaubé Pérez E, Caro Pina, Pérez Rodríguez L. (2008). Kinetic Model for Growth of Phaeodactylum Tricornutum in Intensive culture Photobioreactor. Faculty of Sciences. Río San Pedro, Cádiz.
- [4] Rodríguez Alex. Triana Francia. (2006). Evaluación del pH en el cultivo de Spirulina spp. (Arthrospira) bajo condiciones de laboratorio. Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C.
- [5] Dunn I. J. Heinzle E. Ingham J. Prenosil J. E. (2003). Biological Reaction Engineering, Second Edition. Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA. Germany. p: 77 – 80.
- [6] González Reyes, Mireya Annabel. (2000). Alternativas en el Cultivo de Microalgas. Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.
- [7] Molina E. Fernández J. Ación F.G. Chisti Y. (2001) Tubular photobioreactor design for algal cultures. Journal of Biotechnology. 92, p: 113 – 131.
- [8] Molina Grima E., Ación Fernández F.G., García Camacho F., Yusuf Chisti. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. Journal of Biotechnology 70, Elsevier, p: 231 - 247.
- [9] Hagen Thomas. (2009). Temperature Influence and Heat Management Requirements of Microalgae Cultivation in Photobioreactors, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis.
- [10] Lenore O., Harvesting A. (2009). Microalgae for Biofuel: Processes and Mechanisms, Faculty of the Graduate School, University of Texas at Austin.
- [11] Gómez Olga. (2010). Separación de la Biomasa y Extracción del Aceite, Equipo de Biorrefinería y renovables, Fundación LEIA y Centro de Desarrollo Tecnológico, CIEMAT.
- [12] Mora V., Cedeño J. (2006). Determinación Fisicoquímica y Bacteriológica del Agua en las Etapas de Tratamiento en Planta de Potabilización, Escuela de ciencias de la Salud, Universidad de Oriente. Venezuela, 10, pp: 41 – 45.
- [13] Andía Cárdenas Yolanda. (2000). Tratamiento de Agua: Coagulación y Floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico (SEDAPAL). Lima – Perú. (<http://www.scribd.com/doc/38045977/coagulacion-floculacion>).
- [14] Lidia de Vargas. (2007). Tratamiento de Agua para Consumo humano, Manual I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Cap.: 4, p: 153 – 213.
- [15] Werner Stumm. (1992). Ciencia Abierta; Coagulación y floculación de contaminantes del agua - Universidad de Chile. <http://cabierta.uchile.cl/revista/15/educacion/edu4/index.html>.
- [16] Restrepo O. Hernán. (2009). Evaluación del Proceso de Coagulación – Floculación de una Planta de Tratamiento de Agua Potable. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- [17] Aliaga S. (2010). Aplicación del Proceso Fenton y Coagulación – Floculación para la Regeneración de Aguas Depuradas, Tesis de Especialización, Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, España.
- [18] De Vargas L. (2007). Tratamiento de Agua para Consumo humano, Manual I. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Cap.: 6, p: 265 – 303.
- [19] Delgadillo C. M., Ramallo R. J. (2003). Proceso de Coagulación – Floculación en el agua. Universidad mayor de san simón, Facultad de ciencias y tecnología.
- [20] Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. Acueductos y Alcantarillado. [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continuacion1.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continuacion1.htm).
- [21] Ríos Danilo. (1997). Utilización del Parámetro “Eficiencia” en Remoción de Turbiedad en Sedimentadores. Uruguay, Montevideo.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



- [22] Knuckey Richard, Brown Malcolm, Robert René, Frampton Dion. (2006). Production of Micro algal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds, Department of Primary Industries and Fisheries, Australia.
- [23] Pérez E., Caro Pina I., Pérez Rodríguez L. Kinetic. (2008). Model for Growth of PhaeodactylumTricornutum in Intensive culture Photobioreactor. Faculty of Sciences. Río San Pedro, Cádiz.
- [24] Hu-Ping Luo, Muthanna H. Al-Dahhan. (2003). Analyzing and Modeling of Photobioreactors by Combining First Principles of Physiology and Hydrodynamics.of Chemical Engineering, Washington University.
- [25] Barraza C., Collao V., Espinoza C., Moya F., Thun G., Torres M. (2009). Producción de Biodiesel a partir de Microalgas, introducción a Ingeniería Bioquímica, facultad de ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- [26] Shelef G., Sukenik A., Green M. (1984). Microalgae Harversting and Processing: A Literature Review, Technion Research and Development Foundation Ltd. Haifa, Israel.
- [27] Vega Antonio, Tello Cristian, Lemus Roberto, Simulación Matemática del Proceso de Secado de la Gracilaria Chilena (GracilariaChilensis), Departamento de Ingeniería en Alimentos, Universidad de la Serena – Chile.
- [28] Campos J., Di B. Luis. (2007). Uso de Polímeros Naturales en el Tratamiento de Agua para Abastecimiento, Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua (CINARA), Universidad de Sao Paulo.
- [29] Monteagudo J. M., Durán A. (2000). Diseño de Procesos en Ingeniería Ambiental, Guión de Prácticas, Grupo de Ingeniería Química, Universidad de Castilla – La Mancha, Tema 2: Coagulación – Floculación, pp.: 12 – 24.
- [30] Eliach J., Bourges G., Duré L., Medina M., Lara M. (2004). Incidencia de la Agitación en el Crecimiento Microalgal en Biorreactores. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional del Rosario.
- [31] Flores C., Peña J., Flores L., Cañizares R. (2003). Asociación Interciencia, Diseño conceptual de Fotobiorreactores. 28, pp: 450 – 456.
- [32] Pulz O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. Appl Microbiol Biotechnol. 57, pp.287-93.
- [33] Yusuf Chisti. (2007). Biodiesel from microalgae, Institute of Technology and Engineering. Massey University, Palmerston North. New Zealand.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería por el apoyo económico y la asesoría en el desarrollo de esta investigación.



Evaluación de la cinética de secado del mango Tommy Atkins (*Mangifera Indica*)

Mendoza Jorge¹, Gómez Rafael¹, Ávila Adrian¹, Verdeza Arnaldo¹

¹ *Universidad Pontificia Bolivariana-Montería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo OPUREB.
Colombia – Córdoba, Montería Km 8 Vía Cereté.
jorgemmf@gmail.com, aeavilag@gmail.com*

RESUMEN.

El mango es una fruta de la zona intertropical, de pulpa carnosa y semiácida, cuyo nombre científico es *Mangifera Indica*; ésta es una especie perteneciente a la familia de las anacardiáceas, de origen asiático, principalmente de la India, comprende numerosas variedades, muchas de ellas obtenidas por injerto. Esto muestra la importancia de su comercialización, ya que es una fruta de gran consumo en la población, también es importante por su contenido de vitaminas, que lo hacen muy saludable para el metabolismo de sus consumidores. Otro de los puntos importantes del proyecto, es el proceso de deshidratación del mango, en el cual se pretende establecer la cinética y las condiciones óptimas de secado, a las que debe estar sometido este producto, con el fin de que no se vean afectadas sus propiedades para su posterior preservación y comercialización. Aspectos como los parámetros de cinética de secado, modelación de curvas cinéticas, ajustes a modelos matemáticos, temperaturas y humedad, serán analizadas para el diseño y desarrollo óptimo del proceso de secado.

En la fase experimental se utilizó un secador convectivo diseñado por la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, también fue necesario usar un molde de precisión con el cual fueron obtenidas laminas redondas de mango con un diámetro circular de (2.5") y espesor aproximado de 6 mm. Se tomaron como variables independientes: temperatura en los niveles (40, 55, y 70) °C, velocidades de aire en los niveles (1, 2 y 3) m/s realizando nueve unidades experimentales. Las variables dependientes fueron: el contenido de humedad final, tiempo de secado y humedad de equilibrio. Los datos se ajustaron a los modelos matemáticos de Newton, Page y Wang and Singh Thomson, analizados mediante el coeficiente de determinación (R²), error medio estimado (SE) y desvío medio relativo (P%). El modelo de Page, es el que mejor describe el proceso de secado. Las pruebas experimentales de humedad de equilibrio se efectuaron mediante lectura directa a tres temperaturas (20, 30 y 40) °C, utilizando un equipo medidor de actividad acuosa proporcionado por el Programa de Ingeniería de Alimentos, adscrito a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba; sede Berastegui. Los datos obtenidos fueron ajustados a los modelos matemáticos de Anderson y de Boer (GAB), Oswin, Smith, Halsey, y Peleg; se concluyó que este último fue el que mejor representó el comportamiento de las curvas de humedad de equilibrio

Palabras Clave: Cinética, Secado, Mango, Modelos Matemáticos.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



1. INTRODUCCIÓN

La el mango es reconocido en la actualidad como uno de los frutos tropicales más finos, ha estado bajo cultivo desde tiempos prehistóricos. En la actualidad, se encuentran cultivadas áreas importantes en la India, Indonesia, Florida, Hawái, México, Sudáfrica, Queen Island, Egipto, Israel, Brasil, Cuba, Filipinas y otros numerosos países. Probablemente la India tiene más plantaciones comerciales que el total del resto del mundo. Sin embargo, la importancia económica real del mango estriba en el tremendo consumo local que se realiza en cada villa y ciudad de las tierras bajas de los trópicos, ya que se trata de una de las plantas más fructíferas de los países tropicales. Esta especie se cultiva en todos los países de Latinoamérica, siendo México el principal país exportador del mundo [1]. Como cosecha de exportación, el mango se encuentra muy por debajo en la lista de las frutas, siendo sobrepasada en mucho por los plátanos, cítricos, aguacates, dátiles, higos, piñas y posiblemente otros; pero ocupa el segundo lugar, sólo superado por los plátanos, en términos de uso doméstico. Este producto es consumido en gran parte en estado fresco, pero también puede ser utilizado para preparar mermeladas y confituras. Actualmente se está empleando bastante en la industria farmacéutica [1]. El mango es un producto frutícola apto para el proceso de deshidratación, esta es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para la conservación de alimentos [2]. La mejor deshidratación para el mango, es la que se realiza mediante la circulación de aire caliente, debido a que esta fruta presenta una razonable resistencia a las alteraciones por el calor, dentro de ciertos límites de temperatura. Además, es el método de secado más utilizado en la industria de conservación de alimentos. Preservar alimentos, como la pulpa de algunas frutas, para su posterior comercialización, ha hecho que se realicen estudios con el fin de determinar el tiempo y las condiciones de secado, estableciendo ciertas variables como lo son la temperatura y la velocidad del aire. Esto permite que el producto tenga un mayor valor agregado en el mercado, tanto el ámbito nacional como internacional, lo que favorece que se presente un crecimiento en su cultivo, utilización y distribución. El establecimiento de modelos de secado permite no sólo predecir el mejor proceso, también ofrece herramientas para predecir las condiciones de almacenamiento y empaque. Además, ayudan a establecer el contenido final de humedad de los productos agrícolas y los requisitos energéticos del proceso de secado. La mayoría de los modelos de secado se basan en las condiciones de equilibrio entre el material adsorbente y el agua adsorbida. Para ello, se requiere definir las isotermas de desorción que dependen de su capacidad de retener la humedad, variable que se determina por medio de la actividad del agua. Las isotermas de desorción describen el comportamiento de la actividad del agua a una temperatura definida y a diferentes contenidos de humedad en condiciones de equilibrio [3]. Aunque existen modelos matemáticos que describen las isotermas de desorción de alimentos, no hay ninguna ecuación que proporcione resultados satisfactorios en todos los rangos de la actividad de agua para todos los tipos de alimentos, debido a que el agua se asocia con la matriz del alimento por diferentes mecanismos en distintas regiones de actividad del agua [4]. De esta manera, se encuentran modelos como GAB, BET, OSWIN, Smith, Halsey, BET modificada, Henderson, Ferfontain y Peleg, que ofrecen buenos resultados en ciertos tipos de alimentos en condiciones específicas. En este caso el mango es una fruta de la zona intertropical, de pulpa carnososa y semiácida, cuyo nombre científico es *Mangifera indica*; ésta es una especie perteneciente a la familia de las anacardiáceas, de origen asiático, principalmente de la India, comprende numerosas variedades, muchas de ellas obtenidas por injerto. Esto muestra la importancia de su comercialización, ya que es una fruta de gran consumo en la población, también es importante por su contenido de vitaminas, que lo hacen muy saludable para el metabolismo de sus consumidores. Por lo cual establecer la cinética y las condiciones óptimas de secado y de humedad de equilibrio de la pulpa de mango (*Mangifera indica*), con fines de preservación y comercialización.



2. METODOLOGÍA.

En la fase experimental se utilizó un secador convectivo diseñado por la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana, la variedad de mango seleccionada es la Tommy Atkins, cortado en rodajas circulares con un diámetro de 30.0mm y espesor aproximado de 6.0mm para lo cual fue necesario usar un molde y así garantizar homogeneidad de las muestras. Se tomaron como variables independientes: temperatura y velocidad del aire. Las variables dependientes fueron: el contenido de humedad final, tiempo de secado y humedad de equilibrio. Los datos se ajustaron a los modelos matemáticos de Newton, Page y Wang and Singh Thomson. Las pruebas de humedad de equilibrio se efectuaron mediante lectura directa a tres temperaturas, utilizando un equipo medidor de actividad acuosa proporcionado por el Programa de Ingeniería de Alimentos, adscrito a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Córdoba; sede Berastegui. Los datos obtenidos fueron ajustados a los modelos matemáticos de Anderson y de Boer (GAB), Oswin, Smith, Halsey, y Peleg.

2.1 Diseño de experimentos y análisis estadístico.

Se estipularon tres temperaturas de bulbo seco de 40, 55 y 70 °C, respectivamente; y cuatro velocidades de aire caliente de 1, 2 y 3 m/s que se utilizarían en la experimentación. Como resultado la realización de 9 pruebas de secado, también se define el tiempo mínimo de duración por prueba, con un tiempo de 600 minutos para cada una, esto basándose en los resultados de una prueba piloto como se nota en la tabla 1.

Tabla 1: Determinación de pruebas de secado a las velocidades y temperaturas escogidas.

Vel/ Temp	40°C	55°C	70°C
1 m/s	Prueba 2	Prueba 5	Prueba 6
2 m/s	Prueba 9	Prueba 7	Prueba 4
3 m/s	Prueba 8	Prueba 3	Prueba 1

Se busca caracterizar la cinética del secado realizando un análisis estadístico, el cual tuvo como objetivo, determinar la incidencia de cada una de las variables controlables en el proceso y obtener una superficie de respuesta.

2.2 Modelación y ajuste de curvas de secado y humedad de equilibrio.

Los modelos de secado de un sólido consideran, generalmente, como mecanismo principal, la difusión basada en la segunda Ley de Fick, que, para un sistema unidimensional y homogéneo, está dada por la ecuación que relaciona la humedad del sólido X (b.s) con el tiempo en una posición Z (1).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial Z^2} \quad (1)$$

Considerando una placa plana infinita de espesor total l, con una distribución inicial uniforme de humedad, X₀, y en ausencia de cualquier resistencia externa (esto es, la humedad de la superficie esta en equilibrio con el aire de secado, X_e), entonces se asume, para simplificar, que la temperatura y el espesor de las muestras son constantes durante el secado. Para este caso, la solución de la ecuación 2 está dada por:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_f \pi^2 t}{4l^2}\right) \quad (2)$$

En esta ecuación, MR es la razón de humedad, X es la humedad en base seca (kg agua/kg s.s.) a cada tiempo, X_e es la humedad de equilibrio (kg agua/kg s.s.), t es el tiempo en hora, l es el semiespesor de la lámina (m) y D_f es el coeficiente de difusión expresado en m²·s⁻¹. Este último se puede calcular a partir de la representación gráfica del Ln (MR) en función del tiempo (h), línea recta de cuya pendiente se obtiene el coeficiente difusional para cada temperatura de trabajo.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Para la aplicación de la segunda Ley de Fick, se calculó el contenido de humedad de equilibrio y los valores de humedad libre para cada tiempo. Una vez calculados estos valores, se aplicó la ecuación 2 con la cual se obtuvieron los valores de razón de humedad (MR) y posteriormente se grafica MR vs t (h). Con el fin de determinar el modelo que mejor se ajusta al comportamiento de la cinética de secado de la pulpa de mango Tommy Atkins, se evalúan tres modelos matemáticos, como los muestran las ecuaciones 3, 4 y 5:

- Newton;

$$MR = \text{Exp}(-kt) \quad (3)$$

- Page;

$$MR = \text{Exp}(-kt^n) \quad (4)$$

- Wang and Singh Thomson

$$MR = 1 + at + bt^2, \quad t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2 \quad (5)$$

Dónde:

MR; es la razón de la humedad

t: es el tiempo de secado en horas, k: es la constante de secado h^{-1}

a, b; son los coeficientes de ajuste.

La realización de las pruebas de humedad de equilibrio se toman muestras que no exceden 1g de masa, de forma redondeada con un diámetro promedio de 1.5 cm. y un espesor aproximado a 0.1 mm. Las pruebas se realizaron en un medidor de actividad acuosa (a_w), LABMASTER. a_w , versión V01.06, el cual trabaja con 5 sales certificadas las cuales tienen un contenido de humedad determinado. SalT (97, 90, 75, 33, 11) a diferentes temperaturas (20, 30 y 40 °C). En el experimento, se ajustó el equipo a las condiciones necesarias para la determinación del a_w , con monitoreo cada 10 segundos hasta que alcanzaba el equilibrio. Se registró el valor del a_w y la masa de la muestra, en una balanza analítica, para continuar con la SalT siguiente. Posteriormente, se graficaron los datos a_w vs fracción de humedad en base húmeda (X_{bh}). Las curvas de humedad de equilibrio fueron ajustadas a los modelos matemáticos empleados en las ecuaciones 6, 7, 8, 9 y 10:

- Anderson y Boer (GAB);

$$X_e = \frac{X_m CKA_w}{(1 - KA_w)(1 - KA_w + CKA_w)} \quad (6)$$

- Oswin;

$$X_e = A \left(\frac{A_w}{1 - A_w} \right)^B \quad (7)$$

- Smith;

$$X_e = Mb - Ma \ln[(1 - A_w)] \quad (8)$$

- Halsey;

$$X_e = - \left(\frac{-A}{\ln A_w} \right) \quad (9)$$

- Peleg;

$$X_e = K_1 A_w^{n_1} + K_2 A_w^{n_2} \quad (10)$$

Dónde:

X_e , es el contenido de humedad de equilibrio.

a_w , es la actividad acuosa.

M , es la molaridad.

X_m , es el contenido de humedad de equilibrio de la mono camada.

C , constante de BET relacionada con el calor desorción de la camada molecular.

A, B, M_a, M_b y K, K_1, K_2 , son parámetros de ajuste y n_1, n_2 , son parámetros de la ecuación.

La selección de los modelos se hizo con base en la bibliografía y bases de datos revisadas, para el análisis estadístico y la elección del modelo mejor ajustado de la cinética de secado y humedad de equilibrio, se analizan mediante el coeficiente de determinación (R^2), error medio estimado (SE) y desvío medio relativo (P%).

3. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos de la variable de respuesta tiempo, muestra el grado de influencia que tiene cada variable manipulada, se puede notar como disminuye a medida que se aumenta la temperatura y aumenta la velocidad de aire, tabla 2.

Tabla 2. Tiempo de estabilización del peso de la muestra.

Temperatura [°C]	Velocidad [m/s]	Tiempo [min]
40	1	390
40	2	360
40	3	330
55	1	240
55	2	330
55	3	180
70	1	180
70	2	90
70	3	90

Expresado gráficamente se observa que la variable con mayor nivel de significancia en el tiempo de secado es la temperatura (Ver figura 1).

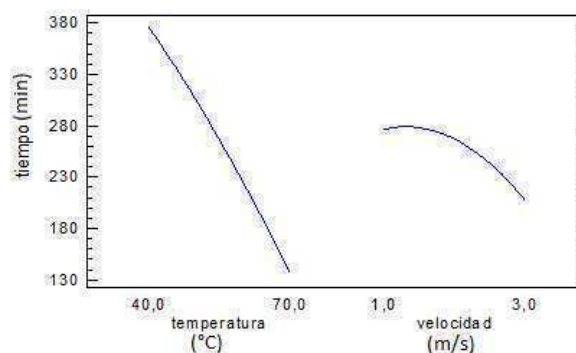


Figura.1. Efectos de Temperatura y velocidad en el tiempo de secado.

En la optimización de este proceso se asocia la variable tiempo a un nivel de deseabilidad, este procedimiento ayuda a determinar la combinación de los factores experimentales que, simultáneamente, optimizan varias respuestas.

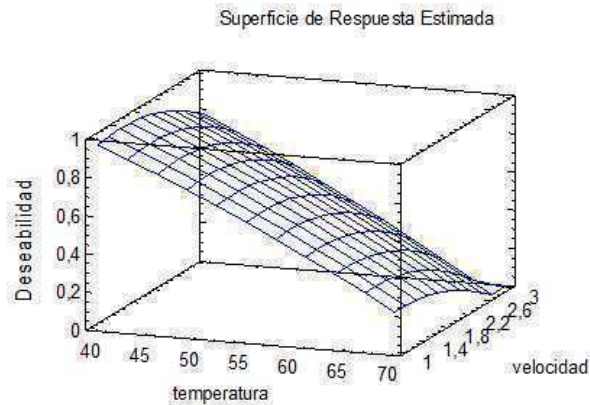


Figura 2. Superficie de respuesta para variable tiempo.

La respuesta recibe influencia de diversas variables donde el objetivo es optimizar esta respuesta seleccionada. En el caso de la superficie de respuesta, el experimentador puede caracterizar la forma de la superficie y localizar el punto óptimo (Ver figura 2). Con este análisis se busca la optimización de la variable de respuesta (tiempo), la cual se logra su minimización, cuyo valor óptimo es: 88.3 min bajo las condiciones expuestas en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de optimización de respuestas.

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Temperatura (°C)	40	70	70
Velocidad (m/s)	1	3	3

Como es de notar, este resultado concuerda con el obtenido en la superficie de respuesta, en el cual, con un juego de velocidades y temperaturas altas, se reduce considerablemente el tiempo de operación del proceso.

La modelación y ajuste de las curvas de secado del mango Tommy Atkins comienza con las construcción de las gráficas MR vs t, (Ver figuras 3, 4 y 5), donde se puede observar fácilmente la influencias de la temperatura en cada rango de velocidad. En las gráficas mostradas, en el eje x muestra el tiempo del proceso de secado en horas, mientras que en el eje y se muestra contenido de humedad que se obtuvo en esta prueba; la línea no continua describe la curva que se obtuvo en la prueba experimental, mientras que la línea continua muestra la curva descrita por el modelo matemático.

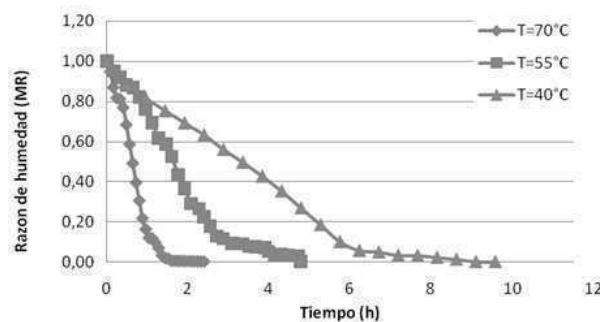


Figura 3. Curvas MR vs T a 3m/s.

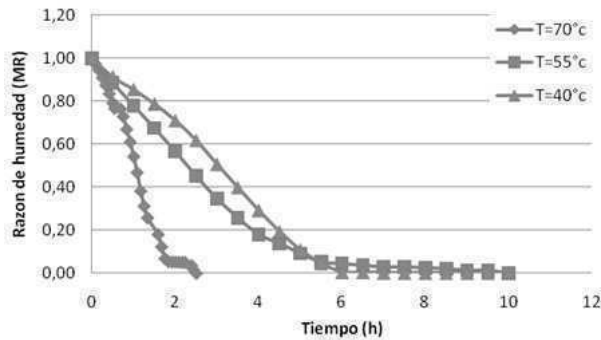


Figura 4. Curvas MR vs t a 2m/s.

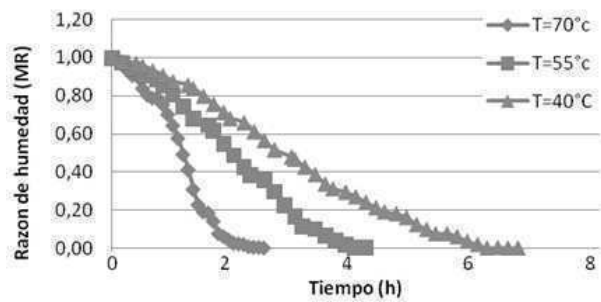


Figura 5. Curvas MR vs t a 1m/s.

A continuación se muestran los resultados de la modelación y el ajuste de algunas de las curvas obtenidas para las pruebas ajustadas, teniendo en cuenta los modelos más ajustados en los diferentes niveles del experimento, se observa en el ajuste de cada modelo que la función logarítmica no cubre todos los cambios dependientes en las curvas, al igual que la función polinómica, correspondientes a los modelos de Newton y Wang and Singh Thomson, (Ver figuras 6 y 7).

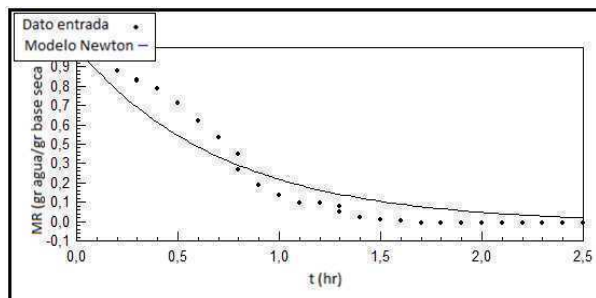


Figura 6. Gráfica prueba 1, análisis y ajuste de curva por el modelo de Newton.

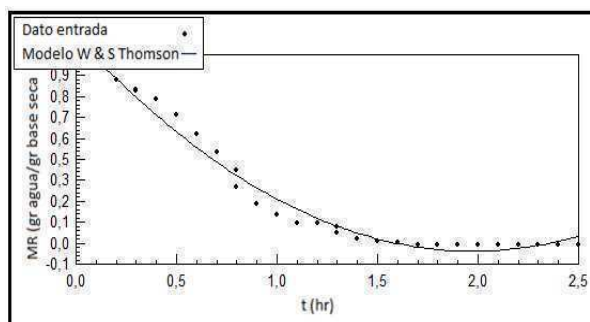


Figura 7. Gráfica prueba 1, análisis y ajuste de curva por el modelo de W & S Thomson.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Caso diferente pasa con el ajuste del modelo de Page, cuya función exponencial cubre los cambio de pendiente (ver figura 8), siendo el mejor ajustado al comportamiento de secado, tabla 4.

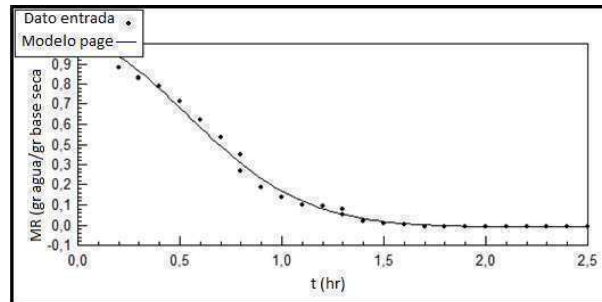


Figura.8. Gráfica prueba 1, análisis y ajuste de curva por el modelo de Page

Tabla 4. Análisis estadístico de ajuste de modelos

Rango	Modelo	Error Std	Residual Sum	Residual Avg.	RSS	R2	Ra2
1	Page	0,028	-0,130	-0,004	0,023	0,994	0,993
2	W & S Thomson	0,050	0,000	0,000	0,070	0,981	0,979
3	Newton	0,098	-0,259	-0,008	0,290	0,920	0,917

Tabla 5. Análisis de ajuste de curva para prueba 1 de humedad de equilibrio

Rank	Model	StdError r	Residua l Sum	Residual Avg.	RSS	R2	Ra2
1	Peleg model	0,026	-0,004	-0,001	0,001	0,994	0,977
2	GAB model	0,036	0,010	0,002	0,003	0,979	0,958
3	Smith model	0,034	0,000	0,000	0,003	0,972	0,962
4	Oswin model	0,036	-0,006	-0,001	0,004	0,967	0,956
5	Halsey model	0,040	0,023	0,005	0,006	0,947	0,934

En la figura 9 se presentan las isotermas de desorción y adsorción para el mango Tommy Atkins a las temperaturas de 20, 30 y 40°C. Conforme a éstas, se puede constatar que los contenidos de humedad de equilibrio incrementan con el aumento de la humedad relativa (SAL-T 97, 90, 75, 33 y 11), resultado este que concuerda con lo que sucede en la mayoría de los productos alimenticios.

En las gráficas mostradas, el eje x muestra la actividad acuosa (a_w) del proceso, mientras que en el eje y se muestra la humedad libre (H_{bh})

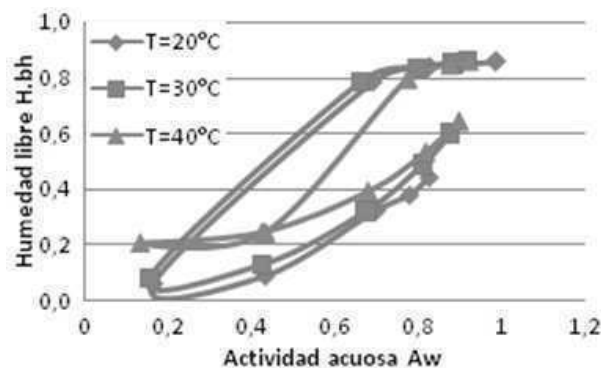


Figura 6. Curvas de humedad de equilibrio.

De acuerdo a los resultados generales del análisis estadístico de ajuste de las curvas (tabla 5), se puede decir que el modelo matemático de Peleg tiene un muy buen ajuste a la curva de adsorción obtenida experimentalmente, ya que para el coeficiente de determinación (R^2) se obtuvieron valores



mayores que 0.95, lo que equivale al porcentaje de varianza explicada por encima del 95%; esto implica que el modelo matemático de Peleg es mucho más confiable que los otros modelos descritos para el ajuste de las curvas de humedad de equilibrio para el mango Tommy Atkins. Los valores del error estándar de la estimación fueron menores a uno o al 10%, en el caso del 100% de las pruebas, lo que indica que la diferencia entre los valores dados y obtenidos no es muy considerable; esto afirma el criterio de confiabilidad de este modelo.

4. CONCLUSIONES.

Al estudiar la cinética de secado del mango Tommy Atkins, podemos concluir que es un producto altamente higroscópico, ya que la pérdida de humedad en el producto es más rápida al inicio del proceso de secado y muestra un cambio de pendiente muy particular. De igual modo, el mango puede ser sometido a altas temperaturas de secado sin que esto cambie sus propiedades organolépticas.

El modelo de Page, fue el más ajustado a los datos de secado bajo las condiciones estudiadas. En lo concerniente al estudio de humedad de equilibrio realizado al mango Tommy Atkins, se concluye que la humedad relativa tuvo gran influencia en el contenido de humedad de equilibrio, ya que éste aumenta con el incremento de la humedad relativa. También es conveniente tener en cuenta las isotermas de desorción y adsorción presentadas en esta investigación, para el diseño de sistemas de almacenamiento de este producto. El modelo matemático de Peleg es el que mejor describe el comportamiento de las curvas de adsorción, por lo cual se reafirma el comportamiento reflejado en las curvas de secado.

5. REFERENCIAS.

- [1] http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tropicales/mango.htm. consultado en 2009
- [2] Nijhuis H., Topping E., Luyten H., René F., Jones P., Funebo T. et al. vegetables, Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and. *Drying Technology*, (1996) 14(6), pp 1429-1457.
- [3] Aquiles, Ocampo. Modelo Cinético del Secado de la Pulpa de Mango. *Revista EIA*, (2006) N° 5 pp. 119-128.
- [4] CORZO, O. y FUENTES, A. Moisture Sorption isotherms and modeling for pre-cooked flours of Pigeon pea (*Cajanus cajan* L millsp) and lima bean (*Canavalia ensiformis*), *Journal of food Engineering*, 2004. 65 : 443-448.
- [5] ROMERO, L. y KIECKBUSH, T. 2003 Influência de Condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate. *Brazilian Journal of food Technology*, 6 (1): 69-76. Influência de Condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate. *Brazilian Journal of food Technology*, 2003, 6 (1): 69-76.
- [6] http://www.minagricultura.gov.co/archivos/tr_estudio_diagnostico_para_el_acceso_de_mango_fresco_colombiano_a_mercados_internacionales. consultado en 2009.
- [7] MorToN, Julia. Fruit of warm climates. Creative resources winterville, N.C. 1987.
- [8] HoIDSworTH, S. D. Concentration and drying of food. Elsevier, london, pp. 293-303. 1986.
- [9] Telis-Romero, J., y otros. Enthalpyentropy compensation based on isotherms of mango. *Cienc. Tecnol. Aliment.* V25, No. 2, Campinas, Brasil. 2005.
- [10] <http://frutas.consumer.es/documentos/tropicales/mango/intro.php>. consultado en 2009.
- [11] Treybal, Robert E. Operaciones de Transferencia de Masa. s.l. : 2nd ed, Mc Graw Hill, Mexico, 1988, p. 723-758, 2nd ed, Mc Graw Hill, Mexico, 1988, p. 723-758.
- [12] Amerita Latina y el Caribe Oficina Regional de la FAO. Secado de Granos y Secadoras. Santiago, Chile 1996. [Online] Avalaible from internet: <http://sleekfreak.ath.cx:81/3wdev/VLIBRARY/X0028S/X0028S00.HTM#CONTENTS> y 2008., consultada en agosto.
- [13] Mujumdar A., Devahastin S., *Fundamentals Principles of Drying*. In: Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying. Exergex Corporation, Quebec, Canada, 2000, pp 1 – 22.
- [14] R, Betancourt. Transferencia Molecular de Calor, Masa y/o Cantidad de Movimiento, Universidad Nacional De Colombia, Manizales, pp 71 – 178.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

- [15] CORREA, Pierre y DA SILVA, Paulo, y ALMEIDA, Luiz. Estudo das propriedades físicas e de transporte na secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada. *Ciência y tecnología de los alimentos*, 2004, Vol.24 (3). Campina – Brasil.
- [16] Montes E., Torres R., Andrade D., Pérez O., Marimon J. y Meza I. Modelado de la Cinética de Secado de Ñame (*Dioscorea rotundata*) en Capa Delgada, *Ingeniería e Investigación*, (2008) 28, Nº 002, pp 45 – 52.
- [17] Türk I., Pehlivan D. Modelling of Drying Kinetics of Single Apricot, *Journal of Food Engineering*, (2003) 58, pp 23–32.
- [18] Vega A., Tello C., y Lemus R. Mathematical Simulation of Drying Process of Chilean Gracilaria (*Gracilariachilensis*), *Revista Chilena de Ingeniería*, Vol. 15, No. 1, pp. 55–64, 2007.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería por el apoyo económico y la asesoría en el desarrollo de esta investigación.



Diseño, construcción y evaluación de un motor stirling de baja temperatura

Dietz, Rodrigo (1º Autor)¹, Blanco, Mariana¹, Ferré Néstor¹, Navntoft, Christian², Garreta, Fabián², Altieri, Daniel¹, De Cabo, Juan Carlos¹, Ramallo, Milena¹,

1 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Dto. Ingeniería Mecánica

2 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Dto. Ingeniería Civil

Mozart 2300, C.A.B.A. (1407). E-mail: rdg_dietz@hotmail.com - utnsolar@gmail.com

RESUMEN.

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y evaluación de un motor Stirling de baja diferencia de temperatura. El motor Stirling es también conocido como motor de "combustión externa". Su funcionamiento se basa en la expansión y contracción de un fluido de trabajo por efecto del aumento y disminución de la temperatura del mismo. Esta expansión y contracción se traduce en una fuerza sobre el pistón de potencia y esta en energía mecánica en el eje motor. Los motores Stirling surgen como la alternativa más limpia y segura que los motores convencionales, dado que su funcionamiento no requiere el uso de combustibles fósiles. Solo es necesario una fuente fría y una fuente caliente para llevar a cabo el ciclo. Existe bibliografía extensa sobre el tema (Senft J. R. 1993; West D. C., 1986) y toda ella hace énfasis en que el diseño de estos motores debe elaborarse a partir de un diseño existente con funcionamiento comprobado. Esta premisa está basada en la compleja modelización que requiere el diseño del motor y los obstáculos a superar en su etapa de construcción. De esta manera, el presente trabajo fue basado en los prototipos de motor Stirling diseñados y construidos por Senft J.R (1996) y otros autores. El mismo puede funcionar con diferencias de temperaturas menores a 60°C, siendo particularmente interesante su acople con la generación de calor a partir de energía solar. El presente trabajo resume los resultados encontrados en la etapa de diseño del dispositivo, así como también los obstáculos superados durante su construcción. En la etapa de evaluación se comprueba la falta de funcionalidad del motor, no obstante se individualizan las fallas encontradas en la etapa de diseño y construcción y finalmente se plantean posibles soluciones para cada una de las fallas encontradas.

Este trabajo forma parte del proyecto de investigación y desarrollo (PID) CIVIMEC aprobado por resolución 2768/10, financiado por la UTN y desarrollado en conjunto entre los departamentos de Ing. Civil e Ing. Mecánica de la FRBA. El objetivo del mismo es el desarrollo de un generador eléctrico a partir del uso conjunto de la energía solar y un motor stirling.

Palabras Claves: stirling, LTD, diseño, construcción, ensayo.

1. INTRODUCCIÓN

La energía es actualmente un tema de enorme importancia en un contexto de disminución progresiva del principal recurso para obtenerla, el petróleo. Esto a su vez tiende a generar un aumento progresivo en el precio del barril de crudo, a instar a una mejora en la eficiencia en la producción de energía así como a propiciar el desarrollo y la innovación respecto de nuevas alternativas de generación de energía. En la figura 1 se observa la distribución porcentual de la generación de energía eléctrica respecto de las diferentes fuentes de energía. Este continuo aumento del precio del petróleo favorece la búsqueda de alternativas de generación de energía y por otro lado reduce la brecha de U\$/kWh entre la generación de energía por combustibles tradicionales y otras tecnologías.

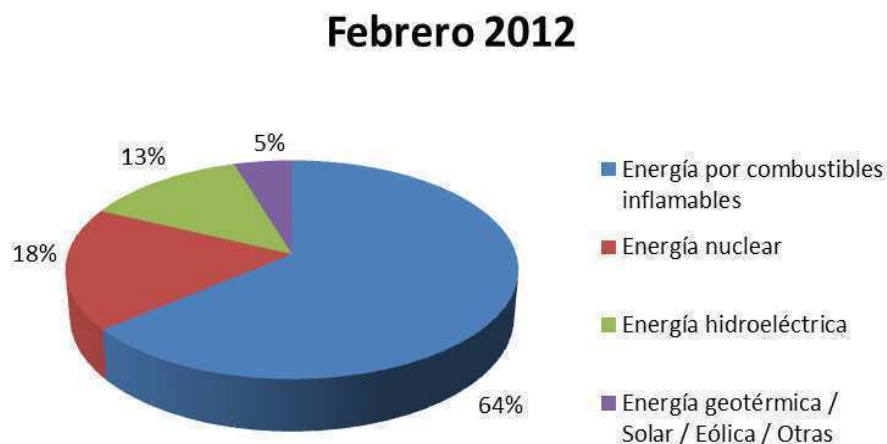


Figura 1 *Matriz energética mundial (febrero 2012). Generación total: 877,6 TWh.*
Fuente: International Energy Agency (OECD).

La preocupación de los países por el calentamiento global genera un marco propicio para la búsqueda de nuevas alternativas de generación de energía de forma más eficiente o a través de recursos renovables, teniendo como dato relevante que del total de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, la producción de energía aporta el 60% [1].

A nivel nacional, el 6 de diciembre de 2006 se aprobó la Ley 26.190 de "Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinadas a la producción de energía eléctrica". Más tarde, el 20 de mayo de 2009 se aprobó su decreto reglamentario 562/2009. Esta Ley constituye el marco necesario para la generación de energía eléctrica en base a energías renovables y establece distintos mecanismos de fomento como créditos o exenciones impositivas.

En base al contexto planteado en los párrafos precedentes y por la fuerte convicción de la necesidad de la investigación y desarrollo sobre tecnologías de generación de energía limpias y desarrollables en el país, fue que se encaró el proyecto de investigación "Aprovechamiento solar térmico para aplicaciones no convencional de media y alta concentración", aprobado por resolución 2768/10, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires.

El proyecto de investigación arriba nombrado está dirigido al estudio y desarrollo de soluciones a fin de obtener un conjunto de generación de energía eléctrica en base a un motor stirling con su fuente de calor proveniente de la energía solar. El presente trabajo es parte del desarrollo llevado a cabo en dicho proyecto.

2. HISTORIA

El uso de motores de aire caliente se remonta aproximadamente al 50 AC con Heros de Alejandría en Egipto, quien fue el primero en utilizar el fenómeno físico de la expansión del aire para abrir automáticamente las puertas del templo. Aunque no fue hasta la revolución industrial del siglo XVIII que se tuvo un mayor conocimiento acerca del funcionamiento teórico de los motores de aire caliente.

A principios del siglo XIX, Robert Stirling, un clérigo escocés, patentó en 1816 el motor que iba a llevar su nombre (Ver Figura 2), con ayuda de su hermano, el ingeniero James Stirling. Este motor desarrollado por los hermanos Stirling fue fruto del esfuerzo por obtener una opción más económica y segura que la entonces famosa máquina de vapor. Aunque las potencias que alcanzaba el motor Stirling no estaban en los mismos niveles que las de la máquina de vapor, el primero tuvo un campo de aplicación en lugares donde hubiera un gran riesgo de explosión y el requerimiento de potencia fuera relativamente bajo, como por ejemplo en ventiladores y bombeo de agua.

Hasta el siglo XX fueron desarrollados una gran cantidad de diseños alternativos de motores Stirling, mejorando sucesivamente su rendimiento y potencia. A principios de siglo, hizo su aparición el motor de combustión interna, el cual cobró una importancia tal que durante los próximos 40 años no se registraron grandes avances en el campo de los motores Stirling.

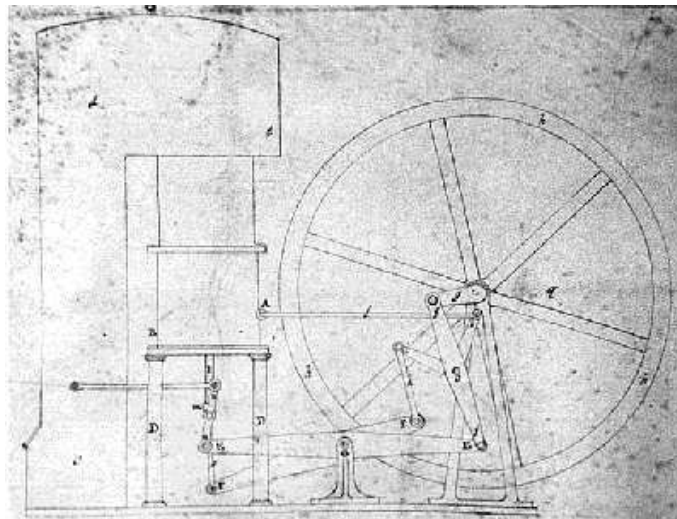


Figura 2. Dibujo original del primer motor Stirling, patentado por Robert Stirling en 1816 [2].

Promediando el siglo XX, el aporte de los nuevos materiales como así también los avances teóricos que permitieron entender mejor y más profundamente el funcionamiento del motor Stirling motivó a la investigación en esa rama. La mayoría de los desarrollos fueron orientados hacia los motores de alta potencia (y consecuentemente alta diferencia de temperatura), debido a que el objetivo era establecer una alternativa al motor de combustión interna. Sin embargo, estos motores presentaban un mayor desgaste que los convencionales, dada su mayor complejidad constructiva. De esta manera, gran parte de los diseños posteriores de motores Stirling fueron orientados hacia el aprovechamiento de menores temperaturas de trabajo sin perjuicio de la eficiencia de funcionamiento. Este desarrollo permitió ampliar la tecnología disponible para la construcción de motores Stirling y consecuentemente disminuir los costos de fabricación de los mismos.

En los años '80, Ivo Kolín [5] presentó el primer tipo de motor Stirling de baja diferencia de temperatura. El mismo se conoce como Low Temperature Differential (LTD), que traducido del inglés significa "Baja Diferencia de Temperatura". La diferencia de temperatura se refiere a la diferencia entre el foco frío y el foco caliente de cualquier proceso termodinámico que involucra la generación de trabajo mecánico. A partir de ese momento se siguió mejorando y bajando la diferencia de temperaturas en los motores LTD hasta que en 1990 James Senft [3] consiguió desarrollar un motor

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

stirling LTD que trabaja con una diferencia de temperaturas de 0,5 °C y que puede verse en la figura 4.

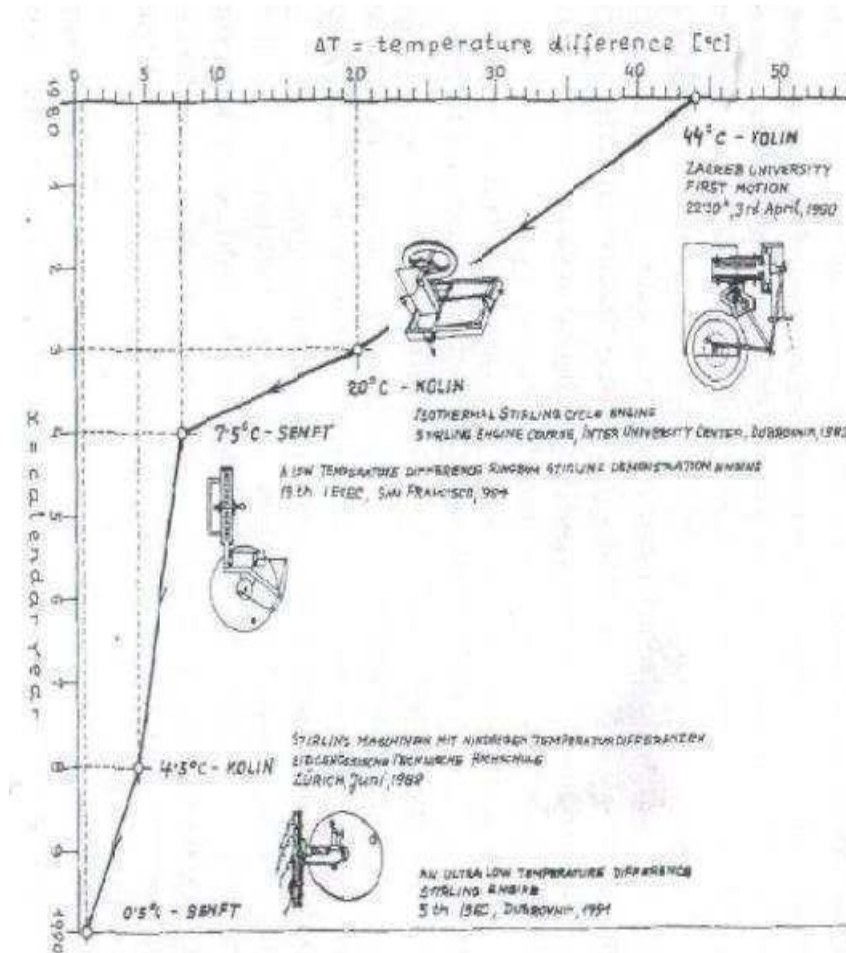


Figura 3. Sucesiva disminución de la diferencia de temperaturas en motores stirling LTD [3].



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

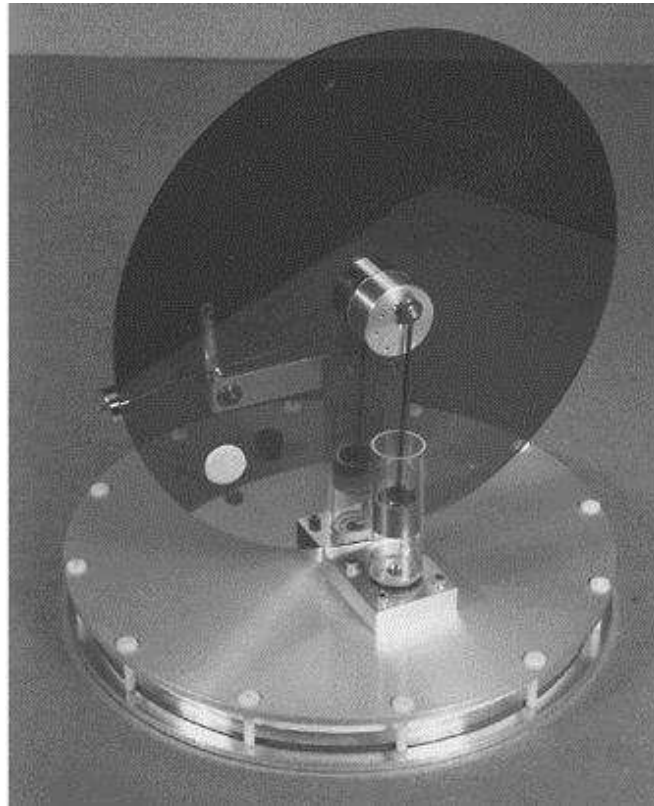


Figura 4. Motor stirling LTD P-19 de 1 °C de diferencia de temperaturas. Autor: J. Senft [3].

La mayor ventaja de este último tipo de motores es que puede ser construido enteramente con materiales plásticos. Al requerir de temperaturas menores a 100°C, no es necesario utilizar aceros especiales o materiales con alto grado de resistencia. Consecuentemente, el costo de construcción del mismo es sustancialmente menor. Por otro lado, las temperaturas de funcionamiento pueden obtenerse fácilmente a partir del aprovechamiento térmico de la radiación solar. Este tipo de motores puede acoplarse fácilmente con tecnología solar térmica sin concentración como los colectores solares, abriendo así un abanico de posibles aplicaciones del mismo.

3. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del motor Stirling está basado las expansiones y contracciones de un fluido de trabajo debido a la diferencia de temperatura entre un foco caliente y uno frío. Este fluido se encuentra encerrado herméticamente en el interior y el mismo puede ser aire, hidrógeno, helio, u otro gas inerte, no explosivo. La expansión del fluido genera un aumento de presión, el cual impulsa el pistón de potencia entregando energía mecánica al eje motor. La contracción generada por el enfriamiento del fluido y la consiguiente caída de presión, retrae el pistón de potencia entregando nuevamente energía mecánica al eje motor. (en el ciclo real la contracción del volumen será ayudada por el volante de inercia). Puede entenderse como un motor de combustión externa ya que el aporte de calor se realiza desde el exterior del motor, y no desde el interior del mismo como en la combustión interna.

El ciclo termodinámico stirling ideal se muestra en los diagramas PV (Presión-Volumen) y TS (Temperatura-Entropía) de la figura 5, correspondiendo estos ciclos a condiciones de período estacionario de funcionamiento (queda excluido el período transitorio de arranque - parada).

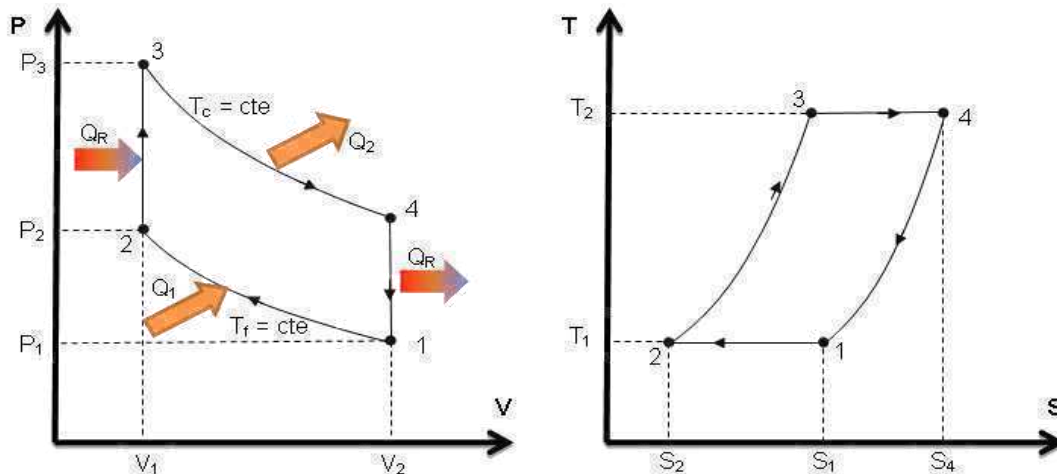


Figura 5. Diagramas P-V y T-S del ciclo Stirling ideal.

Los procesos que se observan en la figura 5 se describen a continuación:

Proceso 1-2, compresión a temperatura constante:

Después que el desplazador ha forzado el flujo del fluido de trabajo hacia la parte fría del cilindro de desplazamiento, este se mantiene en esa posición y el fluido es enfriado. Esto genera una reducción de la presión en el recinto por una disminución de la energía interna del fluido, por esta razón sumada a la ayuda de la inercia acumulada en el volante de inercia, el pistón de potencia recorre su carrera de compresión desde el punto 1 al punto 2 (o desde su punto muerto superior hasta su punto muerto inferior).

Proceso 2-3, calentamiento a volumen constante:

El desplazador es movido una carrera, desplazando el fluido desde la parte fría hacia la caliente mientras el pistón de potencia se mantiene estacionario en su punto muerto inferior esperando el aumento de presión resultante de la expansión del fluido de trabajo. El desplazador empuja el fluido de trabajo hacia la parte caliente a través del regenerador el cual funciona como un acumulador de calor, entonces luego de circular por el regenerador, el fluido aumenta su temperatura y por lo tanto su presión del punto 2 al 3 a volumen constante. El regenerador transfiere su calor al fluido de trabajo.

Proceso 3-4, expansión isotérmica:

Después que el desplazador haya puesto el fluido de trabajo en la parte caliente con el correspondiente aumento de presión y temperatura producto del calor transferido por el regenerador, el fluido es calentado por transferencia de calor con la fuente caliente y a causa de esto aumenta su energía interna empujando el pistón de potencia desde el punto muerto inferior hasta su punto muerto superior. El fluido será expandido a temperatura constante. El movimiento del pistón de potencia genera una fuerza sobre el eje motor generando energía mecánica. Parte de esta es acumulada por el volante de inercia.

Proceso 4-1, enfriamiento a volumen constante:

Después que el pistón de potencia haya llegado al punto muerto superior y que haya transferido su energía al eje motor, este se mantiene estacionario listo para su carrera descendente. El desplazador se mueve transfiriendo el fluido de trabajo desde la parte caliente hacia la fría, forzándolo a circular a través del regenerador. Esto genera una caída en su temperatura y presión a volumen constante, ayudando a bajar la energía del fluido dentro del recinto. El calor es transferido desde el fluido hacia el regenerador.



4. DISEÑO DE UN MOTOR STIRLING LTD

El diseño del prototipo de este trabajo se basó en la interpretación de los trabajos de Senft [3], [6].

La elección de un motor LTD radica en que los materiales para su construcción no requieren características especiales, pueden ser mecanizados sin técnicas complejas y son de un costo accesible. Dado que el motor trabaja por debajo de los 100°C, la mayoría de los materiales son derivados de plásticos de ingeniería, que a pesar de poseer una dureza superior a los plásticos convencionales, no requieren una mano de obra especializada para su mecanizado y es posible trabajar los mismos con la maquinaria disponible en el grupo de investigación.

Para llevar a cabo el prototipo, se determinaron relaciones entre gran cantidad de variables internas (de diseño) y externas (de las condiciones de transferencia de calor en las fuentes fría y caliente). En una primera instancia de diseño se observó que el análisis para el dimensionado y medición de parámetros de salida se obtiene, para una primera aproximación, mediante analogía dimensional de los trabajos de Senft [3] y [6], Martini [4], Raggi [7], Kongtragool [8] y [9].

Por estas razones se decidió adoptar un diseño en base a modelos conocidos a partir de distintos motores LTD, analizando de cada diseño, la forma más conveniente de realización, teniendo en cuenta los requerimientos del mecanizado de las piezas.

La construcción de un motor partiendo de experiencias exitosas es un buen punto de partida a fin de analizar su comportamiento y escalar el motor buscando mayores potencias.

El modelo que fue diseñado es un motor LTD que los diferentes autores mencionados promueven como demostrativo del potencial de transformación de calor en trabajo mecánico a partir de una diferencia de temperaturas fácilmente alcanzable en muchos ámbitos de la vida cotidiana. El mismo puede verse en las figuras 6 y 7.

Algunas consideraciones para optar por el diseño definido fueron las siguientes:

- El desplazador debe tener poco peso y una carrera corta.
- El desplazador debe ser de un material aislante y/o de gran espesor.
- El área de transferencia entre las fuentes, tanto fría como caliente, y el fluido interior debe ser máxima.
- Los rozamientos entre las partes móviles deben ser mínimos. Aún la viscosidad del aceite resulta inaceptable.

A continuación se dará una breve descripción de las piezas principales del motor:

Placas fría y caliente: Se diseñaron a partir de chapas de aluminio por su buena conducción térmica. La placa fría tiene un espesor de 1/8" y la placa caliente de 1/16" , a fin de favorecer la velocidad de calentamiento por el menor espesor.

Cilindro del desplazador: Se diseñó a partir de un segmento cilíndrico de acrílico, esto por un lado mejora el nivel de aislamiento térmico entre el fluido de trabajo y el medio y entre las placas, y por otro lado permite ver el interior del recinto de desplazamiento y el movimiento del desplazador en cada ciclo. El cilindro del desplazador y las placas están unidos por medio de bulones de acero inoxidable, para limitar la transferencia de calor entre las placas a través de estos a la vez que no generan par galvánico con el aluminio y poseen gran resistencia. Entre el desplazador y las placas fría y caliente se utilizaron O-Ring's para asegurar la hermeticidad en la unión.

Desplazador: Fue diseñado de poliestireno expandido de alta densidad (POLYFAN®) por su característica de aislante térmico además de su bajo peso.

Cilindro de potencia: Fue diseñado de vidrio con borosilicato (PYREX®). Este material tiene una excelente terminación superficial, es altamente rígido y además al ser transparente se puede ver el recorrido del pistón de potencia.



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Pistón de potencia: Fue diseñado de resina acetal (DELRIN®). Este material posee una gran maquinabilidad y buena resistencia. Además se lo considera un polímero autolubricado, lo cual es fundamental para bajar el nivel de rozamiento en el conjunto.

Volante de inercia: Fue diseñado a partir de una placa de aluminio de espesor 1/8".

Eje motor: Fue diseñado de acero inoxidable. La vinculación entre el eje motor y las partes fijas se realizó por medio de dos rodamientos SKF 623 2Z.

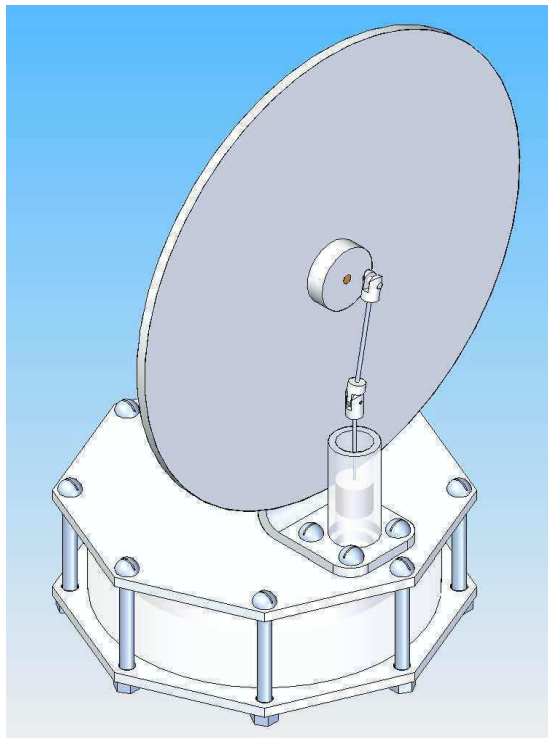


Figura 6. Representación en 3D del diseño adoptado.



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

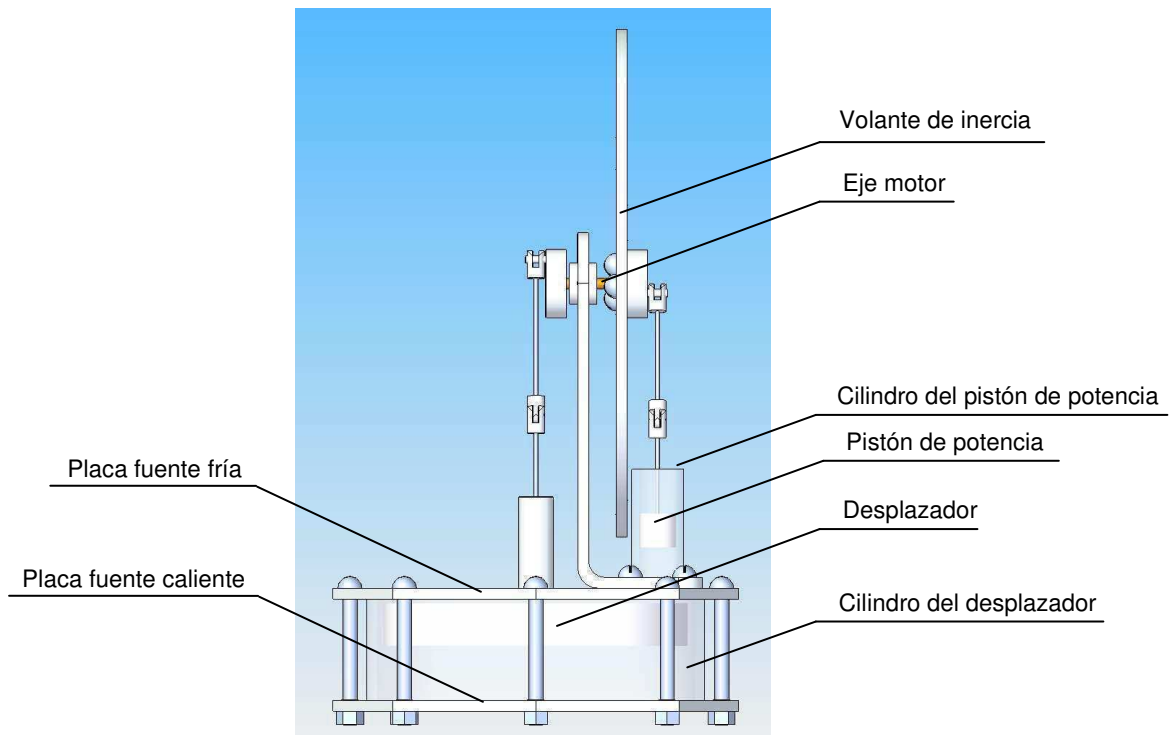


Figura 7. Representación en 3D del diseño adoptado nombrando sus partes principales.

5. CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR STIRLING LTD

Para obtener las dimensiones finales del prototipo se llevó a cabo un primer mecanizado de las piezas necesarias para luego ser ensambladas. En la figura 8 pueden verse las dimensiones adoptadas para las piezas más importantes del prototipo.

Se contó con un torno paralelo, taladro de banco y demás herramientas. Los materiales fueron los señalados en el punto 4 de diseño, exceptuando el eje motor que en un primer momento se utilizó un eje de bronce pero se tuvo que optar por acero inoxidable luego de comprobar la necesidad de un material más rígido.

En la figura 8, se muestran los planos realizados, previo a la mecanización de las diferentes piezas.

En las figuras 9 a 16 se pueden observar registros fotográficos del proceso de construcción del prototipo.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

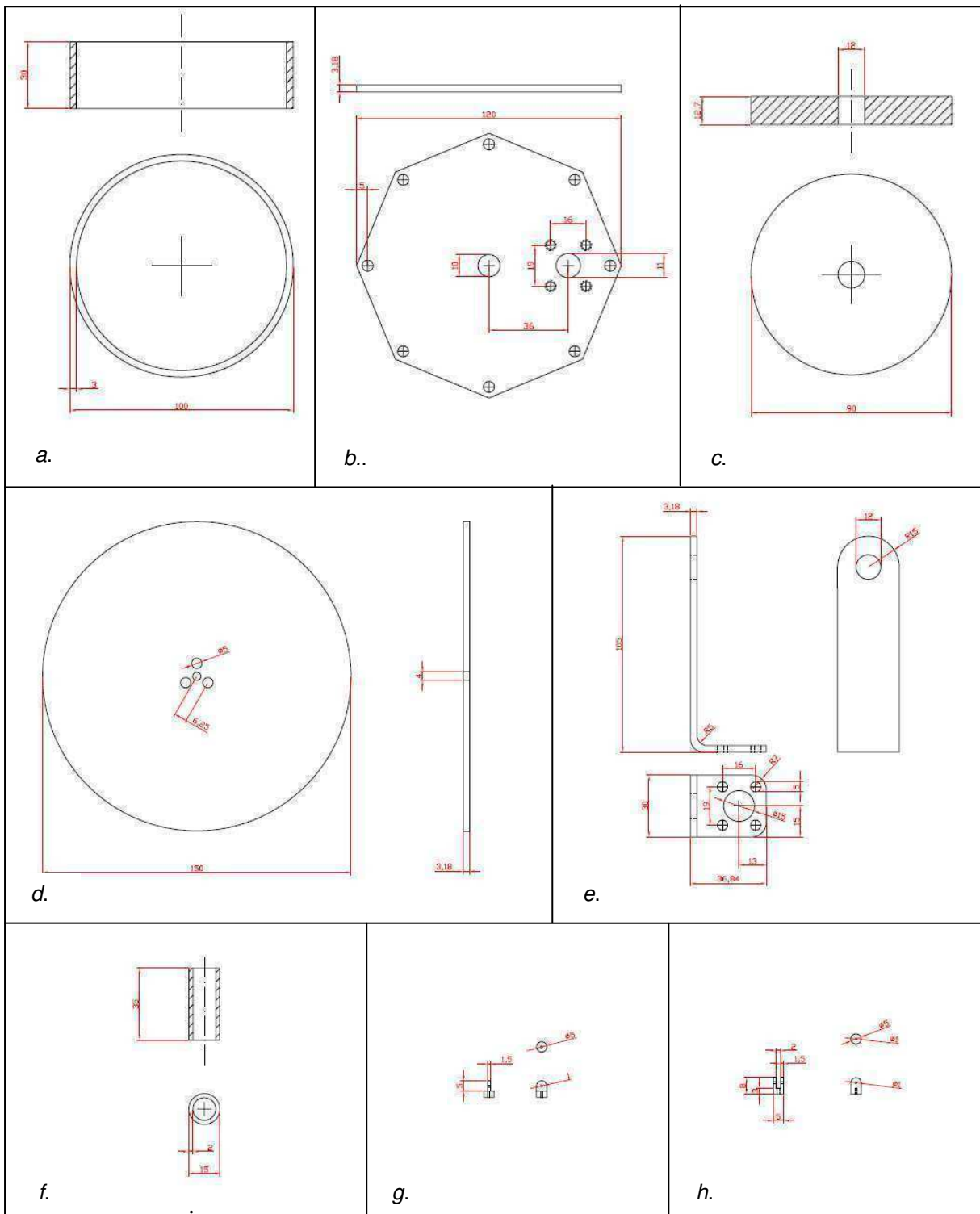


Figura 8. Dimensiones de las piezas principales del motor stirling LTD. **a.** Cilindro del desplazador; **b.** Placa caliente (placa fría análoga sin agujeros internos); **c.** Desplazador; **d.** Volante de inercia; **e.** L de fijación; **f.** Cilindro de potencia; **g.** Articulación 1; **h.** Articulación 2.



Figura 9. Subconjunto 1.



Figura 10. Subconjunto 2.1.

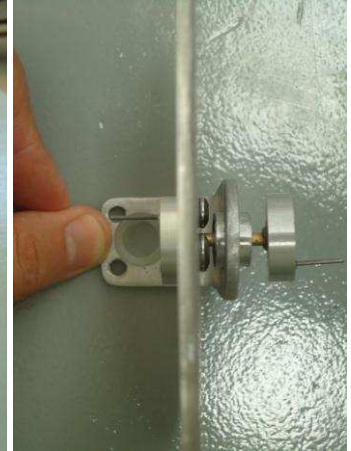


Figura 11. Subconjunto 2.2.



Figura 12. Torneado.



Figura 13. Articulación.



Figura 14. Piezas.



Figura 15. Cilindrado del pistón.



Figura 16. Agujereado de 1mm.

6. DATOS EXPERIMENTALES

Luego de finalizada la construcción de cada pieza y su ensamblaje, se procedió a hacer la primera prueba de funcionamiento sin resultado positivo.

Según la bibliografía consultada es necesaria una primera impulsión manual para generar la inercia necesaria en el eje motor para mover el desplazador en los primeros cuartos de ciclo para los cuales

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



la expansión del fluido todavía no es suficiente para sostenerse en el tiempo pero el motor no logró mantener el impulso.

Se probó generar el calentamiento con pistola de calor regulable y luego con agua a temperatura cercana al punto de ebullición sin resultados positivos.

7. DISCUSIÓN

Al analizar el motor ensamblado y viendo interactuar sus piezas móviles se pudo observar algunas fallas que pudieron llevar al resultado negativo en la primera prueba. Teniendo en cuenta esto, también se plantean posibles soluciones a cada falla encontrada a fin de contar en el próximamente con un segundo prototipo mejorado.

Hermeticidad del fluido de trabajo: Tal vez la falla más sensible al funcionamiento del motor. Si bien no se pudo comprobar inequívocamente la pérdida de presión por algún punto de los sellos estáticos (entre las placas caliente y fría y el cilindro del desplazador) o dinámicos (entre el cilindro del pistón de potencia y este), se comprobó la dificultad en el mecanizado del agujero de diámetro de 1mm del buje a través del cual pasa el eje del desplazador. El desplazamiento del mismo no se dio con absoluta fluidez por lo que fue necesario añadir aceite lubricante, esto por un lado mejoró la fluidez pero por otro lado aumentó la viscosidad traduciéndose en mayor resistencia a vencer por el pistón de potencia. La solución propuesta es cambiar el buje por un conjunto prediseñado buje-eje con juego conocido de 0,02mm.

Cilindricidad del cilindro de potencia: Con el pistón de potencia mecanizado y presentado en el cilindro se comprobó la falta de cilindridad del mismo, es decir, la sección no era perfectamente cilíndrica. El pistón no presentó una carrera fluida y se observó diferente nivel de rozamiento según la posición de este. La solución propuesta es el cambio del cilindro de vidrio PYREX® por otro de acrílico, de superficie interna más homogénea.

Concentricidad en el mecanizado: Luego del montaje, se pusieron en evidencia pequeñas excentricidades en algunas piezas que al momento del movimiento del conjunto se magnifican. La solución propuesta, es rehacer las piezas defectuosas cambiando el diseño a fin de asegurar la Concentricidad, como es el caso del buje donde se montan los rodamientos.

Balance del volante de inercia: Se notó la falta de balance del volante de inercia, ya que al vincular del desplazador y del pistón de potencia al subconjunto móvil del eje motor con el volante de inercia, este subconjunto giraba hasta alcanzar una cierta posición. La solución propuesta es adjuntar un contrapeso equivalente al peso del desplazador y eje de desplazador sobre el volante de inercia del lado opuesto.

Cantidad de masa de fluido: Si bien la cantidad de fluido de trabajo está dentro de los parámetros observados en los distintos motores analizados, La cantidad de fluido de trabajo es proporcional a la velocidad de calentamiento y enfriamiento (para iguales condiciones de intercambio calórico). Por esta razón, una posible mejora es el aumento de volumen del desplazador a fin de reducir el volumen de fluido de trabajo en el recinto interior.

8. CONCLUSIÓN

Se analizó una extensa compilación bibliográfica a fin conocer el estado del arte respecto de los motores stirling y poder obtener e interpretar datos relevantes para el diseño de un modelo de motor stirling con posibilidad de ser escalable.



En base a las interpretaciones de la bibliografía referenciada se diseñó un motor stirling de baja diferencia de temperaturas (LTD por sus siglas en inglés). La elección de este diseño está relacionada con diferentes variables. La primera de ellas radica en que este tipo de motores no requiere materiales especiales como aceros templados, ni procesos de mecanizado demasiado complejos. El mismo puede fabricarse integralmente en materiales plásticos, previendo siempre que la temperatura de funcionamiento no supere los 100°C. Por otro lado, estas temperaturas son fácilmente alcanzables por cualquier sistema de aprovechamiento solar térmico, puntualmente por colectores solares. De esta manera, la segunda variable que motivó la elección de este diseño fue la posibilidad de acoplamiento al aprovechamiento térmico de la radiación solar.

Se construyó un prototipo de motor stirling LTD en base a las especificaciones de diseño, comprobando el no funcionamiento de la unidad a temperaturas menores a 100°C. El uso de temperaturas mayores para los procesos de prueba hubiese resultado en la destrucción completa del prototipo dado que la gran parte de sus materiales no resisten dichas condiciones. De esta manera, tampoco fue posible comprobar si la falta de funcionalidad fue debida a que la diferencia de temperatura entre la fuente fría y la fuente caliente no era suficiente.

No obstante, se observaron y descubrieron varias fallas en la construcción del prototipo y se propusieron soluciones para cada una de ellas, siendo las más importantes de ellas, la falta de hermeticidad completa, el mecanizado deficiente de algunas piezas, la falta de balance del volante de inercia, y una baja masa de fluido de trabajo.

Las mejoras propuestas serán implementadas en el próximo prototipo. Una vez obtenido el prototipo funcional, el mismo será comparado con otros trabajos existentes en la bibliografía consultada.

9. REFERENCIAS

- [1] Departamento de información pública. (Junio de 2012), *“Desde Río hasta Río+20: Progresos y dificultades después de la Cumbre para la Tierra de 1992”*, Naciones Unidas, Río de Janeiro, Brasil.
- [2] Stirling, Robert. (1816). *“Improvements for diminishing the consumption of fuel and in particular, an engine capable of being applied to the moving of machinery on a principle entirely new.”*, British Patent No 4081.
- [3] Senft, James. (2008). *An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines, Ed.8va*. Moriya Press. River Falls, Wisconsin, E.E.U.U.
- [4] Martini, William. (1978). *Stirling engine design manual*. University of Washington. Richland, Washington Ed. 1ra. U.S. Department of Energy. Washington D.C., E.E.U.U
- [5] Kolin, Ivo, (1986) *“Recent development of a flat plate Stirling engine”*, 21st. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Paper No 869113, American Chemical Society, San Diego, August, E.E.U.U.
- [6] Senft, James. (2010). *An Introduction to Stirling Engines, Ed.8va*. Moriya Press. River Falls, Wisconsin, E.E.U.U.
- [7] Raggi, Luca; Katsuta, Masafumi; Sekiya, Hiroshi. (1997). *“Design of a 1kW class gamma type stirling engine”*, International Energy Convention of Engineering Conference. Honolulu, Hawaii.
- [8] Kongtragool, Banacha; Wongwises, Somchai. (2003). *“A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines”*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 7. Golden, Colorado, E.E.U.U.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

- [9] Kongtragool, Bancha; Wongwises, Somchai. (2007). *“Performance of low-temperature differential Stirling engines”*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 32. Golden, Colorado, E.E.U.U.



Banco de Ensayos para Conversores de Energías Mareomotriz y Undimotriz

Labriola, Carlos V. M. , León, Horacio ¹, Abdelbasat, Abdelbaki ¹, Chacón, Hugo ¹, Peralta Cecilia, ¹

*Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Centro de Estudios de FER.
Buenos aires 1400 (8300) Neuquén, Argentina.
carloslabriola54@yahoo.com.ar*

¹ *Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Caleta Olivia, Ruta 3 s/n Acc. Norte (CP: 9011), Santa Cruz., Argentina.*

RESUMEN.

En la Unidad Académica de Caleta Olivia de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Santa Cruz, Argentina, se está instalando un Banco de Ensayos para Energía Undimotriz [1] y Mareomotriz [2]. El diseño e instalación de equipamiento se ha realizado a partir de dos piletos de H²O existentes de 9mx10m aproximadamente.

Para el caso de la parte de ensayos de Corrientes Mareomotrices se dispone de una bomba de circulación de doble efecto tipo Kayac, de hasta 40HP para producir corrientes de fluido de hasta 2,5m/s. La zona de ensayo es hasta un diámetro de 1m y velocidad variable acercando o alejando el modelo a la salida del flujo de agua. Esta salida dispondrá de un sistema tipo nido de abeja para homologar el flujo del fluido.

Para ensayar dispositivos conversores de energía de las olas, se propone alargar en otros 10m con profundidad decreciente. De esta manera la parte existente es para generación de olas y lo anexado es para disipar la ola y que no rebote distorsionando la generación de las mismas. La amplitud máxima de ola será de 1,5m, similar a las de las costas Atlánticas y de los lagos naturales y artificiales patagónicos. El generador de olas tendrá además un variador de frecuencia para variar el período de las olas.

Se preparan paralelamente un modelo de tubo basculante para Energía Undimotriz y otro modelo de tipo turbina eólica sumergida o hidrocínética para Energía de las Corrientes Marinas. Los modelos ensayados en este banco se escalarán [1] [3] para definir los tamaños de los prototipos a ensayar in situ.

Palabras Claves: Banco-Ensayos-Oceánica-Undimotriz-Patagonia.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



1. INTRODUCCIÓN.

Desde el 2010, en la Unidad Académica Caleta Olivia (UACO) de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA), provincia de Santa Cruz, Argentina, se está trabajando en el desarrollo de dos bancos de ensayos para Energía Oceánica:

- Banco de ensayo para dispositivos conversores de Energía de las Corrientes Marinas: Consta de un canal en el cual el flujo de agua es movido por una bomba de doble efecto para simular las corrientes marinas con un rango de velocidades desde 0,5 a 2,5m/s, coincidente con las existentes en la Costa Atlántica Austral de Argentina. Este canal permite el análisis hidrodinámico de modelos de turbinas sumergidas, en particular las hidrocinéticas para conversión energía de las corrientes marinas en energía eléctrica.
- Banco de Ensayo para dispositivos conversores de Energía Undimotriz: Consta de un generador de olas con de velocidad variable en rango de frecuencia de las olas australes. Este sistema permitirá el análisis de modelos flotantes o semi-sumergidos que conviertan la energía de las olas en energía eléctrica.

Para ambos bancos de ensayo, se cuenta con una estructura de H⁹A⁹ tipo estanque rectangular, remanente de instalación de YPF. Posee dos partes, a una de las cuales, se le adiciona la turbina de circulación para conformar el Banco de Corrientes Marinas, y a la otra parte se le adicionan 10m mas de largo para la extinción de las olas generadas evitando el rebote en el extremo. En Figura 1 se ve un corte longitudinal de dicha estructura.

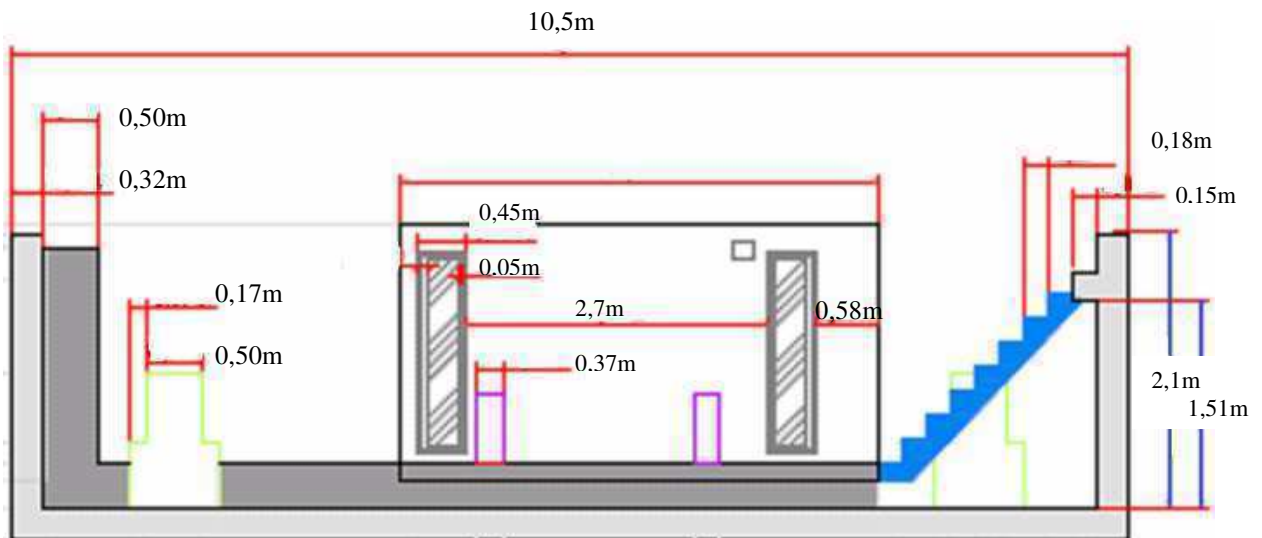


Figura 1: Esquema de corte longitudinal de estructura disponible para bancos de Ensayo [4].

Hay que realizar una adecuación de la estructura de H⁹A⁹, que es la eliminación de unos soportes del mismo material que hay en ambos lados de la casilla de observación. Además está el alargue de 10m para el Banco Undimotriz para la extinción de las olas con profundidad decreciente. Estas obras se comienzan en septiembre del 2012 integradas al presupuesto de expansión edilicia de la UACO.

En Figura 2 se muestra un corte transversal del banco con fotomontaje de la ubicación de los modelos a ensayar.

Las instalaciones adicionales a lo construido y las adecuaciones descriptas son:

- Techado del banco
- Taller de mantenimiento contiguo
- Oficinas de desarrollo e investigación de modelos Oceánicos

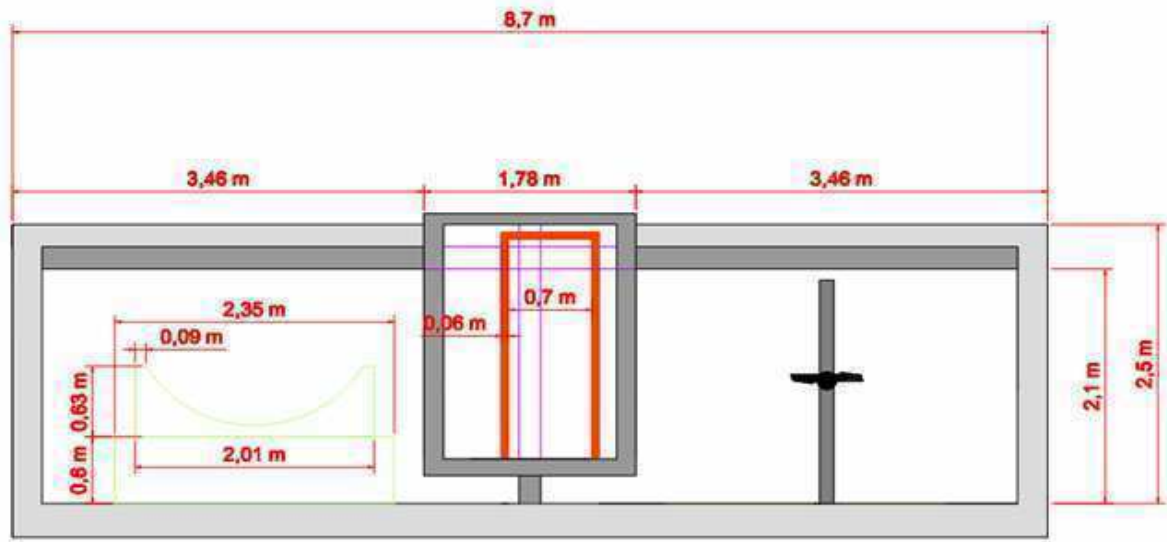


Figura 2 Esquema de Corte transversal de los piletones de HºAº [4].

También estas instalaciones se complementan con proyectos en realización como ser:

- Proyecto de Investigación PI B29-125 de la UACO-UNPA: vigencia 2011-2013 que se dedica al estudio del recurso oceánico en la costa Atlántica Austral y al desarrollo de modelos y mas adelante prototipos conversores de energía oceánica en eléctrica. El banco de ensayos de energía oceánica es parte de este proyecto [5].
- Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica Orientados (PICTO 2010), desarrollado conjuntamente con la FIUNCO y la FIUNLP, [6] para mapa eólico de región patagónica austral de Argentina e instalación de prototipos de turbinas eólicas una de eje horizontal con control Ställ y otra de eje vertical Darrieus-troposkien con frenado aerodinámico. La información sobre los vientos de este proyecto es indicativa de la frecuencia de ocurrencia de las olas y de valores de sus parámetros. Una torre de medición de vientos a distintas alturas para obtener el perfil de viento del lugar es parte de este proyecto a instalarse cerca del banco de ensayos oceánico, junto con mástiles para ensayo de las turbinas eólicas.

2. REINGENIERÍA DE LOS BANCOS DE ENSAYOS.

Se ha adelantado en la introducción algunas tareas de adecuación del estanque existente para convertirlo en los bancos de ensayos. Se detalla a continuación las instalaciones electromecánicas y sus accesorios a realizar para la conversión definitiva en dichos bancos. Algunas partes se han adaptado en base a dispositivos y accesorios disponibles o donados, otras hay que construirlas especialmente como el caso del generador de olas.

2.1. Detalles del Banco de Corrientes Marinas.

Se ha variado la idea original de ubicación de la bomba circuladora, habiendo completado la información de la misma. Se la ubicará en el extremo hacia el Este del canal de corrientes marinas debajo del nivel de fluido (-1m) para su autocebado. Antes iba sobre la casilla de observación entre los dos canales.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica III CAIM 2012



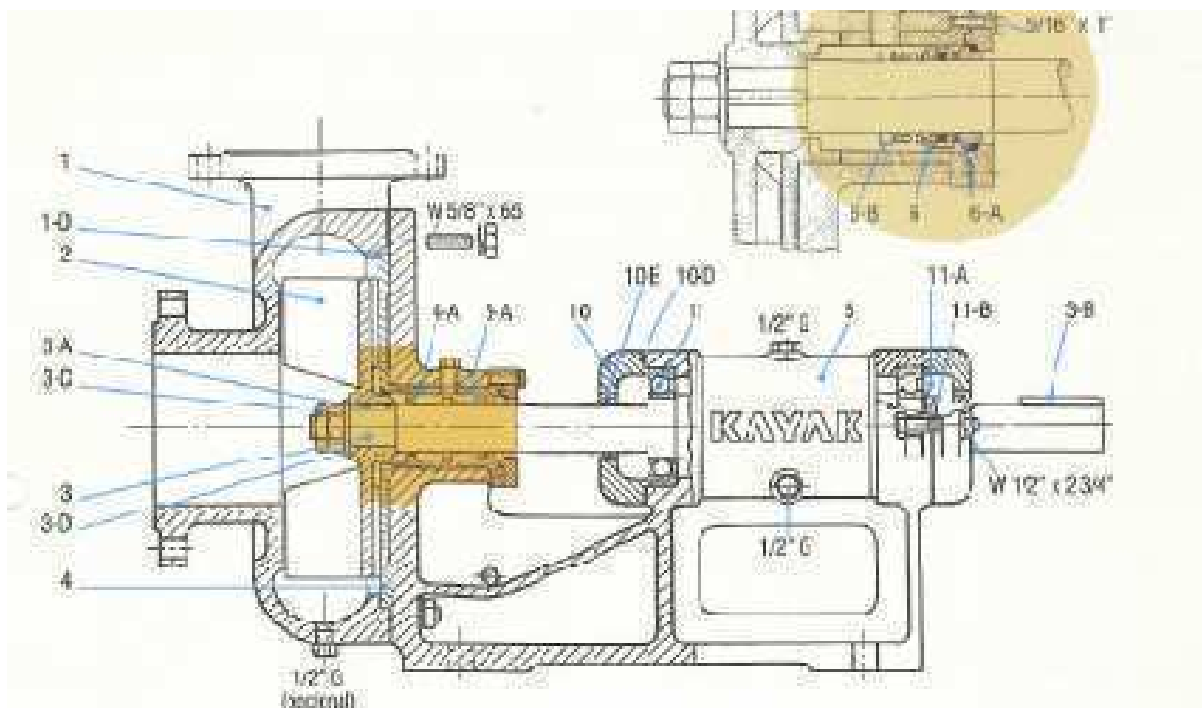
FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

La bomba es del tipo KAYAK como se muestra en la Figura 3. Los accesorios de cañería se disponen de instalaciones ociosas en el predio de la UACO que quedaron del edificio original de la Unidad Académica que era la ex planta de tratamiento de agua de YPF.

La variación de velocidad no se hará mediante regulación de velocidad de la bomba, para no sacarla de su punto óptimo de rendimiento y succión. Se hará acercando o alejando el modelo sobre guías en el canal a ensayar de la tobera de la bomba en el canal.

La propulsión de la bomba se hará inicialmente con un motor de combustión interna a la velocidad nominal de la bomba ya que las pruebas en este banco no serán cotidianas en los inicios, que en caso de ser motor eléctrico necesitaría un cambio de transformador de la interconexión MT/BT de la UACO.



Nº	PARTE Nº	DESCRIPCIÓN	CANT. x BOMBA
1	D-014 (*)	BOQUITA. Función de cierre	1
1-D	D-011-001	JUNTA TAPA (A). Borrachera 30 mm	1
2	D-002 (*)	IMPULSOR. Función de cierre	1
3	D-18001	EJE. Acero SAE 4140	1
3-A	D-1802A	CHAVETA IMPULSOR 3/8"	1
3-B	D-1803B	CHAVETA PUNTA DE EJE. 1/2"	1
3-C	D-1803C	TUERCA IMPULSOR ** W	2
3-D	D-1803D	ARANDELA IMPULSOR	1
4	D-0100	PLATILLO DE DESARME. Función de cierre	1
4-A	D-0300A	JUNTA PLATILLO. Acero	1
5	D-00100	PEDESTAL. Función de cierre	1
5-A	D-0010A	CARISA DEL PEDESTAL. Acero	1

Piezas que pueden cambiar su materialidad según pedido.

Nº	PARTE Nº	DESCRIPCIÓN	CANT. x BOMBA
6	D-0100000	SE. 1/2 MECANICO. Acero	1
6-A	D-0100000A	PISTA ESTACIONARIA	1
6-D	D-0100000D	GOLLAN DE ARRANQUE	1
7	D-01000007	TAPA PORTAPISTA con 1/2" Anillo	1
7-A	D-01000007A	JUNTA TAPA PORTAPISTA. Acero	1
10	D-00100	TAPA PEDESTAL. Función de cierre	2
10-D	D-00100D	JUNTA TAPA PEDESTAL. Acero	2
10-E	D-0101	RETEM	2
11	D-111-00	CUINTEA ROLLAS ES11	2
11-A	11-11	ARANDELA DENTADA DE DIFER	1
11-B	11-11	TUERCA DE EQUILIBRIO	1

(*) Para ordenar estas partes deberá indicarse el Modelo de Bomba.
Demoliciones de volutas para la bomba Molca del ex la Parte Nº 01-01-00
del Impulsor para el Modelo 605 en la Parte Nº 01-02-05

Figura 3 Esquema de corte de bomba circuladora KAYAK [5].

Los accesorios de medición para este banco serán:

- Medidor de presión de salida para la bomba KAYAK

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



- Detector de alineación Bomba-Motor.
- Detector de vibraciones del conjunto.
- Taquímetro del conjunto
- Medidor de la velocidad de fluido en dos puntos.
- Medidor de solicitaciones en el modelo.
- Taquímetro para el modelo
- Medidores de V, I y P de salida del modelo.
- Soportes, conexiones y accesorios para los artefactos anteriores.

1.1. Detalles del Banco Undimotriz:

Este banco, como se ha anticipado es el que necesita mas reacondicionamientos ya que el equipamiento electromecánico para la generación de olas, sólo las genera pero no las disipa. Para ello es necesario alargarlo con profundidad decreciente y rugosidad creciente del lecho del canal y así evitar el rebote de la ola en el extremo del canal.

La casilla de observación deberá tener un sector transparente de unos 2m² para poder observar el comportamiento de los modelos, que en nuestro caso es flotante-basculante o se que “cabalgaría” flotando montado sobre la ola, permitiendo el va y ven de imanes permanentes que inducirían tensiones y corrientes en un bobinado estator.

El generador de olas puede tener varias variantes de diseño electromecánico, que son:

- Óvalo batiente con sistema biela-manivela: se usan en pequeños bancos demostrativos, a veces manuales. Para bancos más grandes el sistema toma tamaños importantes con un costo de energía destacado para obtener su movimiento.
- Cortina vertical batiente con sistema biela-manivela en extremo: se utiliza en bancos muy grandes para obtener largos frentes de olas, que no se ajusta a nuestra necesidad.
- De pared batiente ajustada a eje con pivote movida por sistema biela-manivela: Se aplica en canales de mediano tamaño y son sencillos.

Se ha definido esta última alternativa para facilidad de instalación y mantenimiento en reducido espacio, cuyo esquema se puede apreciar en Figura 4. Las amplitudes de olas a obtener son del orden de 1m y con una frecuencia de 0,02 a 0,2 Hz.

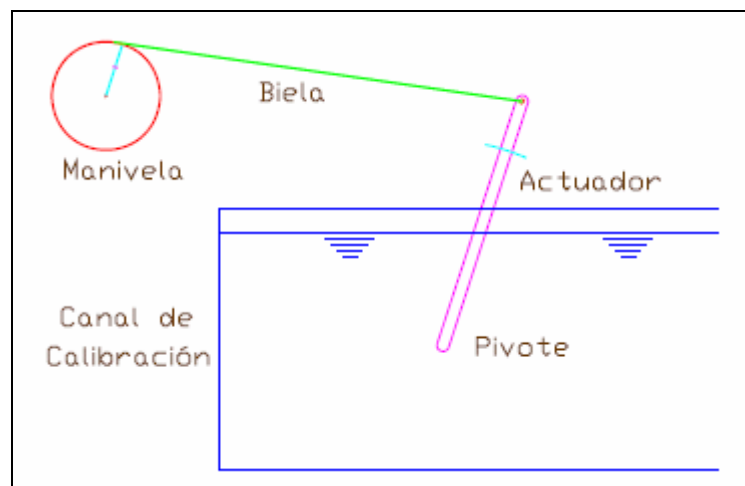


Figura 4 Esquema que detalla la forma mecánica para generación de olas [8].

3. DESARROLLO DE LAS INSTALACIONES.

A partir del año 2012 se puso énfasis en la adecuación y articulación de tareas para la obtención de las partes y accesorios electromecánicos. La remodelación parte del estado a junio del 2012 del estanque que se puede ver en la Figura 5 y Figura 6

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



Figura 5 Lados norte y este del estanque de H²A^o.



Figura 6 Lados Norte y Oeste del estanque de H²A^o

Las tareas proyectadas para readecuación del estanque disponible en dos canales de ensayos de energía oceánica para 2012-2013 son:

1. Inclusión en el presupuesto de expansión edilicia de la UACO de la remodelación civil de los piletones y gestión de equipamiento: esta etapa necesita de una solicitud de los permisos necesarios y donaciones de equipamiento prometidas
2. Remodelación civil de lo existente para la obtención de dos canales en sus medidas finales: Esta etapa se verá de realizarse en un período climáticamente benigno.
3. Fabricación de partes y accesorios para la generación de corrientes y olas del tipo marino: adecuación del equipo disponible a la instalación civil en lo que se refiere a bases, soportes, anclajes, etc.
4. Integración con equipamiento electromecánico de las partes y accesorios: ensamble de conjuntos para ser instalados en los bancos.
5. Instalación del equipamiento electromecánico: instalación y ajustes de los conjuntos: Bomba de circulación, cañería de circulación, generador de olas, etc.
6. Prueba de los bancos: Verificación de que se alcanzan las velocidades de corrientes marinas deseadas y accesibilidad y disponibilidad de los puntos de medición. También que el generador de olas, las genera en la amplitud y frecuencia deseadas.
7. Prueba de los modelos: se hará en dos etapas, la primera corresponde a los ajustes en los lugares permitidos en Caleta Paula (ver mas abajo) y la segunda etapa corresponde al ensayo de los modelos en los canales.

Los modelos se están realizando paralelamente a la gestión, adquisición de equipamiento y remodelación del estanque, y son [9]:

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



- Un modelo hidrodinámico para corrientes marinas que consta de una turbina de eje horizontal de dos aspas y de 40cm de diámetro, diseñada para esfuerzos en canal hidrodinámico,
- Un tubo electromagnético basculante para olas de 1m.

Estos modelos estarán antes de disponer los canales referidos en este trabajo. Es por ello que se ha conseguido el permiso de uso de un pontón y extremo de rompeolas en Caleta Paula, puerto de la ciudad de Caleta Olivia, Argentina, para realizar pruebas preliminares.

Se detalla la ubicación del pontón y rompeolas en la Figura 7.



Figura 7 Ubicación del pontón para pruebas preliminares hidrodinámicas (1) – Ubicación para pruebas undimétricas (2).

Estas pruebas preliminares permitirán ajustar los diseños de los modelos antes de ensayarlos en los canales. Las tareas referidas al inicio de este ítem se detallan en el cronograma de la Figura 6 que va desde 1 de junio del 2012 hasta 30 de junio del 2013.

Tabla 1 Cronograma de acciones 2012-2013.

Tarea	Jun11	Jul11	Ago11	Sep11	Oct11	Nov11	Dic11	Ene12	Feb12	Mar12	Abr12	May12	Jun12
1 Gestión	*****	*****	*****	*****									
2 Remodelación				*****	*****	*****	*****						
3 Fabricación part.			*****	*****	*****	*****							
4 Integración				*****	*****	*****	*****						
5 Instalación							*****	*****	*****				
6 Prue. Bancos									*****	*****	*****		
7 Prue. Modelos				*****	*****	*****					*****	*****	*****

3. CONCLUSIONES.

Se está desarrollando concretamente este banco de ensayos de Energía Oceánica, en particular Corrientes Marinas y Undimotriz en la UACO-UNCO, Santa Cruz, Argentina, con gran esfuerzo de la comunidad educativa del establecimiento, dado que es un proyecto multidisciplinar e interdisciplinar e integra parte de los objetivos de la conducción académica de la UACO.

Se ha realizado la reingeniería de la parte civil y se está realizando la de la parte electromecánica en virtud de lo disponible, lo donado y lo que hay que adquirir.

La obra civil de remodelación para tener los canales de prueba será como consta en la Figura 8 y en la Figura 9. Se estima que en el segundo semestre del 2013 estarán operando los bancos de ensayo según las necesidades del laboratorio de Energía Renovable de la UACO-UNPA.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica
III CAIM 2012

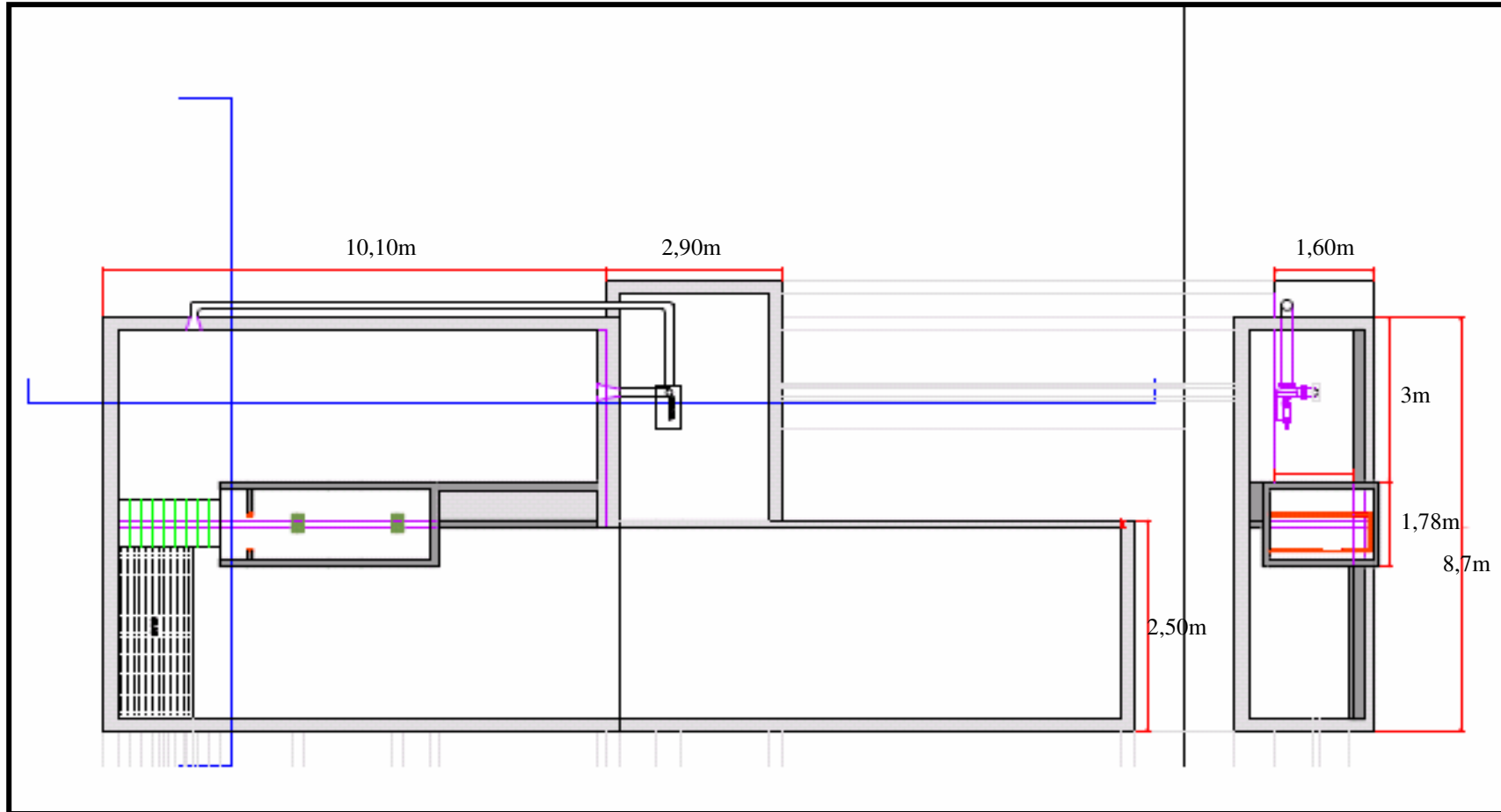


Figura 8 Esquema de vista de arriba con canal hidrodinámico en parte superior y canal undimotriz en parte inferior. A la derecha corte en el acceso a los canales.

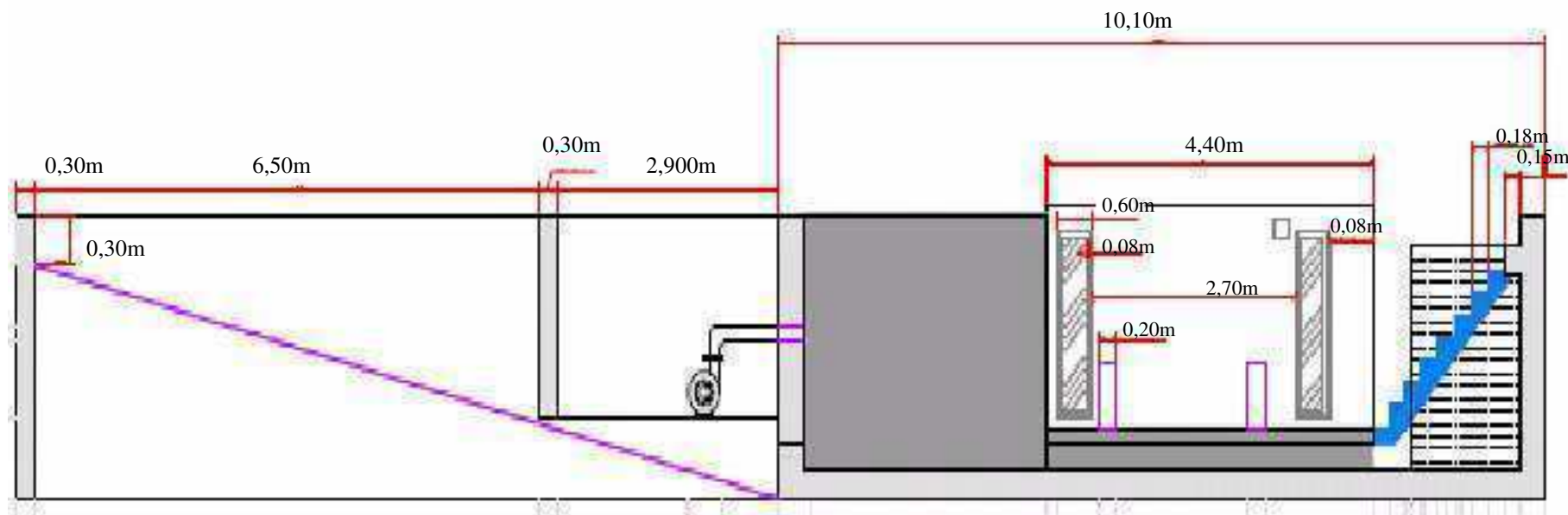


Figura 9: Corte Longitudinal mostrando pendiente para disipación de olas en Canal Undimotriz y lugar para emplazamiento de bomba de circulación en Canal Hidrodinámico.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

4. REFERENCIAS.

- [1] Shaw, Ronald; (1982). *Wave Energy, a design challenge*. Reino Unido. 1ra. Edición. Ellis Horwood Ltd. John Wiley & Sons, Open University.
- [2] Labriola, Carlos V.M.;(2011). “Energía Oceánica, una alternativa energética para la Patagonia Atlántica Austral”. *Congreso latinoamericano de Generación y transporte de Energía Eléctrica*. Mar del Plata, Pcia. de Buenos Aires, noviembre 2011.
- [3] Labriola, Carlos V.M. ;(1997). “La energía Eólica aplicada a Microemprendimientos: Escalado de turbina Darrieus-Troposkien”. *XII Congreso de Ingeniería Eléctrica de Chile*. Temuco, Chile.
- [4] León, H, Chacón, H., labriola, C., “Energía Oceánica, una alternativa energética para la Patagonia Atlántica Austral”, *Congreso latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica*, mar del Plata , Noviembre 2011.
- [5] PI B29/125: Análisis de sistema de convertidores fluido-dinámicos de energía renovable para la Patagonia Austral de Argentina.
- [6] Lassig. J. labriola, C., “*La Energía Eólica para mejorar la calidad de vida en la patagonia Austral*”, PICTO 2010, FIUNCo - UACO-UNPA – FIULP, 2010-2012.
- [7] KAYAK, “Manual de mantenimiento” de bombas KISA 03, 1999.
- [8] Chavez, R., Luna, E. “Determinación preliminar del equipamiento del banco de ensayos hidrodinámicos de la UNI”, *Congreso de ingeniería Mecánica*, Perú, Lima, 2003.
- [9] León, Horacio, Abdelbasat, Abdelbaki, Chacón, Hugo, Peralta Cecilia, Labriola, Carlos V. M., “*Banco de Ensayos para Convertidores de Energías Mareomotriz y Undimotriz*”, III CAIM, Buenos Aires, 2012

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a:

- A la Sra. Prof. Nancy Sisca, Directora de la tecnicatura en Energía renovable del IPES que se desarrolla en Pico Truncado por su buena disposición para este proyecto permitiendo que sus alumnos desarrollen tareas para el mismo.
- Al Sr. Daniel Casarín Jefe de Taller de dicha tecnicatura por el aporte de mano de obra, materiales y gestión de equipamiento donado para este proyecto.
- A los alumnos Miguel Moreno y Cecilia por su aporte a este trabajo y al proyecto.
- A las autoridades de la UACO, Decano y Director del Depto. de Ingeniería, por integrar este proyecto al Plan de desarrollo de la Unidad académica.
- Al Grupo de Investigación del laboratorio de Energía renovable por su atenta asistencia a las necesidades del proyecto y de este trabajo.



ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE POTENCIA DE LOS ÓRGANOS MECÁNICOS QUE CONFORMAN UN CICLO RANKINE ORGÁNICO DE PEQUEÑA ESCALA

Gomez Khairallah Aníbal Oscar *, Cattaneo, Carlos Alberto, Gomez Khairallah Ulises Oscar

¹ Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías.
Av. Belgrano "S" N°1912, Ciudad Capital, C.P. 4200.
agomez@unse.edu.ar, cacatta@unse.edu.ar, tonnycap@yahoo.com.ar

RESUMEN.

La realidad actual de las energías renovables en el ámbito de aplicación del mercado rural de la República Argentina se encuentra acotada exclusivamente a sistemas de aprovechamiento solar fotovoltaico y en algunos casos puntuales, sistemas de aprovechamiento eólico de escala reducida. El aprovechamiento de fuentes de calor, basados en biomasa con fines de obtención de energía eléctrica se encuentran con escaso y casi nulo desarrollo local, desaprovechando una fuente de energía primaria abundante en sectores rurales.

La alternativa de aprovechamiento seleccionada, con fines eléctrico, basada en el uso de biomasa como fuente de energía primaria, para este trabajo, fue la tecnología de tipo Rankine Orgánica, la cual consiste en una conversión de energía de tipo térmica en energía mecánica, por lo que en el presente trabajo, se efectúan las estimaciones y análisis de la demanda de potencia de los órganos que conforman un sistema Rankine Orgánico de pequeña escala (máquina de expansión, bomba de fluido de trabajo, generador eléctrico), basándose en las mediciones de los requerimientos de estos, para alcanzar su funcionamiento autónomo, con capacidad de generar potencia útil, a través de un prototipo en desarrollo, cuya máquina de expansión y generador (arreglo tecnológico denominado microturbogenerador) están ya en instancias de prueba y adquisición de datos de relevancia de este [1] [2].

Palabras Claves: Generador eléctrico basado en ciclo Rankine Orgánico, Energías Renovables.



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



1. INTRODUCCIÓN.

La energía eléctrica es una de las varias formas que puede asumir la energía; en particular, es ésta, la forma más versátil, ya que permite su generación, distribución y transformación en los puntos de consumo en otras formas de energía: lumínica, mecánica, térmica, a través de dispositivos adecuadamente diseñados para tal efecto. A pesar de su enorme potencialidad de uso, que todos conocemos, esta forma de energía, se encuentra sub valorada desde la perspectiva de las fuentes primarias de las que proviene y el impacto ambiental que su generación produce.

En la actualidad, en particular para el caso de la República Argentina, existe un grupo de personas que no tienen acceso a los beneficios que brinda la energía eléctrica, lo que representa un 4% de la población [3], situación motivada por diferentes factores, entre los que sobresalen la gran extensión del territorio y la baja densidad de población de estas regiones, lo que hace inviable la instalación de líneas de transmisión para abastecimiento de energía.

Estas situaciones puntuales de falta de suministro energético constituyen, lo que se ha dado a llamar Mercado eléctrico rural, en el que la demanda es atendida básicamente a través del proyecto PERMER (Programa de Energías Renovables en Mercados Rurales).

Si bien el PERMER utiliza para satisfacer la demanda de energía eléctrica casi exclusivamente sistemas Fotovoltaicos y aerogeneradores de pequeña potencia, las cuales son tecnologías muy difundidas, estudiadas y con un alto grado de desarrollo (las llamadas tecnologías 'maduras'), no deja de lado la posibilidad de uso de otras formas de energía primaria aparte de la solar y eólica para lograr su objetivo principal, atento a lo que establece la Ley Nacional N° 26190 de RÉGIMEN DE FOMENTO NACIONAL PARA EL USO DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA, DESTINADA A LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA en su Artículo Primero y Artículo Sexto inciso "b" [4].

Es la gran demanda de suministro energético detectado [3], la posibilidad de disponer de fuentes de calor de variada índole no aprovechadas con fines energéticos actualmente, y la escasa o nula existencia de tecnología local (desarrollado y producido en Argentina) de origen térmico de baja temperatura para la generación de energía eléctrica, lo que motivó la iniciativa de concretar el presente trabajo.

Si bien existen varias alternativas para la conversión de energía térmica en mecánica-eléctrica, tales como tecnología termodinámica de tipo Stirling y ciclo Ericsson, o tecnología de tipo termoeléctrica, se tuvo en cuenta la tecnología de tipo Rankine Orgánica debido a su relativa sencillez, a su posibilidad de funcionar a temperaturas reducidas en su fuente caliente (a pesar del bajo rendimiento que posee para estas temperaturas de trabajo), como así también a su potencialidad, de ser replicada en la escala que se requiera, dependiendo de las características de la fuente de calor.

2. Descripción de arreglo tecnológico.

El sistema que sustenta la construcción del prototipo está basado en un ciclo Rankine Orgánico, ciclo termodinámico donde el fluido que evoluciona es un fluido orgánico, no es agua [5], [6]. El fluido de trabajo es un gas, de alto peso molecular y propiedades tales que permite el funcionamiento del equipo, con un rendimiento adecuado, a temperaturas del orden de los 90°C, lo que le confiere un gran número de aplicaciones a esta tecnología [7] como lo son:

Aprovechamientos Geotermiales.

Aprovechamientos de tipo solar Térmico (en sus diferentes alternativas, incluido desalación).

Aprovechamiento de la energía de Biomasa.

Aprovechamiento del gradiente de temperatura oceánico.

Aprovechamiento de fuentes de calor residual

Éstas son sólo algunas de las tantas aplicaciones, ya que es posible, de acuerdo a las características de las fuentes de calor disponible, como así también a las necesidades locales, desarrollar equipos combinados basados en esta tecnología, que brinden además de energía, ya sea mecánica o eléctrica, por ejemplo refrigeración o calefacción.

Un sistema Rankine Orgánico es básicamente un equipo Rankine (conjunto de dispositivos de carácter térmico, mecánico, eléctrico) que transforma energía térmica en energía mecánica en el eje, la cual es en general transformada nuevamente en energía eléctrica. Para lograr tal fin, en el interior del sistema evoluciona un fluido termodinámico (Orgánico) que describe un ciclo, el cual se pretende

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



sea lo más próximo posible a un ciclo de Rankine (Ciclo ideal de potencia de vapor [8], que está formado por cuatro transformaciones termodinámicas básicas:

1. Compresión isentrópica en una bomba (Transformación 1-2).
2. Adición de calor a presión constante en una caldera (Transformación 2-3).
3. Expansión isentrópica en una Máquina de Expansión (Transformación 3-4).
4. Rechazo de calor a presión constante en un condensador (Transformación 4-1).

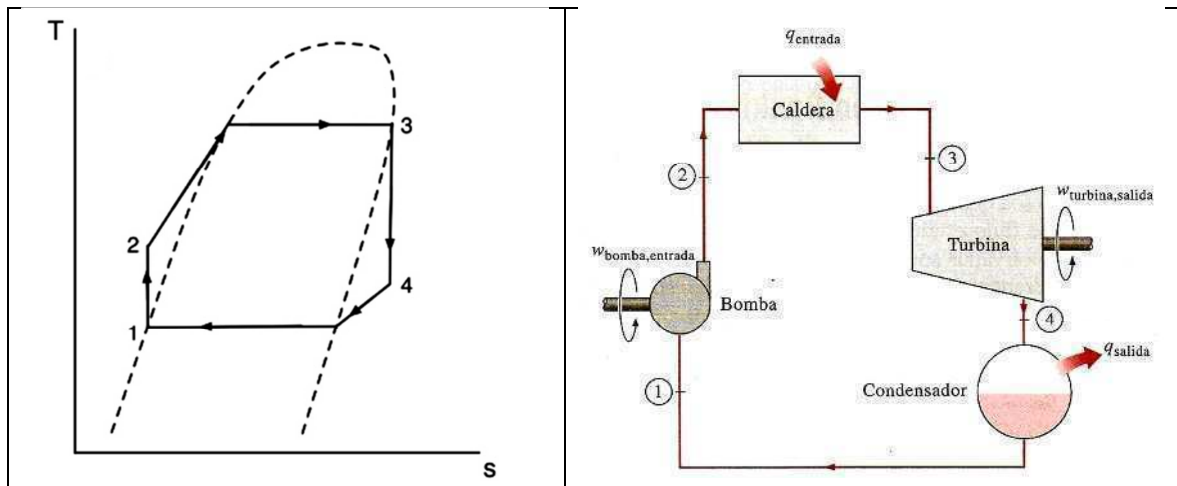


Figura 1 [8] Representación del Ciclo Rankine en el campo T-S y el arreglo esquemático de los componentes mecánicos para su concreción.

Resulta claro, que los componentes críticos de un sistema Rankine son los dispositivos mecánicos de transformación de energía (máquina de expansión: transformaciones 3-4 de la figura 1), siendo los elementos mecánicos y térmicos restantes (bomba, intercambiadores de calor) periféricos de éste que permiten el funcionamiento en estado estacionario del primero.

Se concretó el diseño de un arreglo tecnológico, al que se le asignó el nombre de Microturbogenerador. Este consta de tres dispositivos mecánicos: la máquina de expansión, el generador eléctrico y la bomba de fluido motor, que se encuentran vinculados directamente en un eje común, girado de este modo, a una única velocidad, resultando esta configuración novedosa en la escala de trabajo abordada.

El hecho de concretar un arreglo como el mencionado permite que sus dimensiones sean reducidas, lo que facilita llevar a cabo el encapsulado de éste, en un recipiente de presión, logrando por este medio evitar todas las posibilidades de fuga de fluido motor desde el conjunto de dispositivos mecánicos figura 2.

Esta posibilidad de encapsular el arreglo tecnológico, es de suma relevancia, ya que de no ser por esta, serían necesarios dispositivos mecánicos de hermetismo (retenes de diversa índole), que impidan fugas de fluido motor, transformándose en puntos críticos en lo relacionado a confiabilidad y rendimiento, ya que éstos son elementos que consumen potencia [1], [2], figura 3.

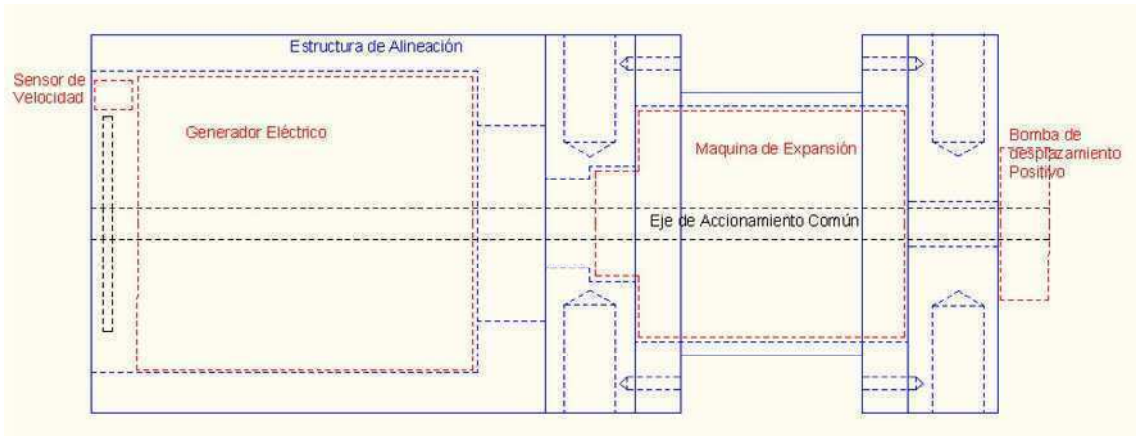


Figura 2 Representación esquemática del arreglo tecnológico.



Figura 3 Imágenes del arreglo tecnológico y encapsulado, logrados.

Generador eléctrico (1), Máquina de expansión (2), Bomba de fluido de trabajo (3), Sensor de velocidad de giro (4), encapsulado abierto (5)

3. Proceso de caracterización del arreglo tecnológico.

Para concretar esta tarea, es necesario conocer los parámetros que gobiernan las transformaciones termodinámicas que se llevan a cabo en cada componente del sistema Rankine, los cuales son las variables de estado del fluido de trabajo (presión, entalpía, entropía, etc.).

En base a estos parámetros se seleccionaron los equipos de medición y servicios auxiliares necesarios para la construcción del banco de pruebas del arreglo. Este equipo fue de gran utilidad para evaluar el comportamiento del arreglo y poder de este modo realizar las correcciones pertinentes sobre éste.

Es necesario aclarar que el banco de pruebas permite el funcionamiento en forma aislada del arreglo tecnológico construido, por medio de aire comprimido como fluido motor.

Los parámetros que se consideran de relevancia y que permiten la simulación del comportamiento del microturbogenerador en un sistema Rankine son:



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



- Presión de entrada a la máquina de expansión.
- Presión de salida de la máquina de expansión.
- Presión de descarga de la bomba de fluido de trabajo.
- Caudal de descarga de la bomba de fluido.
- Frecuencia de giro del arreglo tecnológico.
- Caudal demandado a la entrada de la máquina de expansión.
- Tensión producida por el generador eléctrico.
- Corriente generada por el generador eléctrico.

Los resultados de las mediciones son representados en las siguientes figuras, en las que se destacan las diferentes condiciones de funcionamiento bajo las que se concretaron los ensayos del Microturbogenerador.

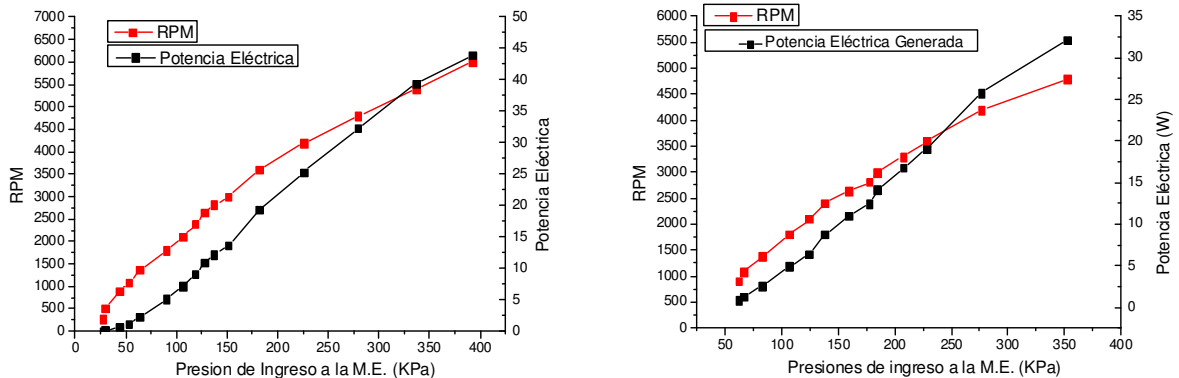


Figura 4 Resultado de mediciones, izquierda microturbogenerador sin bomba de fluido incorporada, derecha con bomba de fluido incorporada.

4. Estimación de la Potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

Con la ayuda de toda la información recabada, a través de las mediciones y de los escasos datos que se dispone de alguno de los componentes que integran el arreglo, se pudo estimar en forma aproximada, la demanda de potencia de cada componente y con este dato su eficiencia, para su cotejo con elementos de características semejantes y de los cuales se dispone de información detallada, cuya semejanza en valor absoluto validan la metodología utilizada.

4.1. Condiciones para la estimación de la Potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

Las condiciones para poder llevar a cabo las estimaciones planteadas ilustradas en la figura 4 y se detallan a continuación:

- Se trabaja sobre puntos de funcionamiento estables, es decir puntos de equilibrio mecánico.
- Conocimiento de las características de funcionamiento del generador (la potencia generada es función de las revoluciones de la máquina).
- Conocimiento aproximado del rendimiento del generador 50 % funcionando como motor (Valor de manual), 25 % para su funcionamiento como generador (Valor estimado).
- Conocimiento, del potencial hidráulico de la bomba, (valores medidos en banco de pruebas).
- Conocimiento de la potencia de entrada (provista por el aire comprimido) a la Máquina de Expansión, para el arreglo sin bomba (valores medidos en banco de pruebas).
- Conocimiento de la potencia de entrada (provista por el aire comprimido) a la Máquina de Expansión, para el arreglo con bomba (valores medidos en banco de pruebas).
- Conocimiento del rendimiento bombas de características semejantes a las utilizadas en el arreglo, (Valor que permite la validación de la estimación realizada).



4.2. Procedimiento para la estimación de la Potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

El proceso de determinación de los parámetros desconocidos, que permiten la caracterización apropiada dicha del arreglo tecnológico, se desarrolló en cinco pasos, proceso que ilustra a través del diagrama de flujo representado en la figura 5.

1. Determinación del rendimiento de la M.E. η_{ME} en función de rpm.

Resultado determinado por cálculo, ecuación (1), obtenido a través de la información del valor estimado para el rendimiento del generador eléctrico η_{g} la potencia eléctrica producida por el generador P_E y la potencia de entrada a la M.E. P_{ME} , esta última proporcionada a través de aire comprimido, mediciones llevadas a cabo, para el caso del arreglo sin la bomba de fluido.

$$\eta_{ME} = \frac{P_E}{P_{ME}} \quad \eta_{g} \rightarrow \eta_{ME} \quad (1)$$

2. Determinación de la potencia mecánica producida por la M.E. P_{eje} , para el arreglo con la bomba de fluido incluida.

Parámetro logrado por medio de cálculos, ecuación (2), con los coeficientes de rendimiento obtenido en el paso N° 1, para cada uno de los valores de revoluciones utilizados en los ensayos, la ayuda del coeficiente de rendimiento supuesto para el generador eléctrico y los resultados de la medición con bomba de fluido (potencia de entrada a la M.E. y potencia eléctrica generada para esta configuración del arreglo).

$$P_{eje} = \eta_{ME} P_{ME} \quad (2)$$

3. Determinación de la potencia mecánica demandada P_B por la bomba y su correspondiente rendimiento η_B .

Con la información obtenida en el paso N° 2, se determina por un simple cálculo de diferencia, ecuación (3), la potencia consumida por la bomba en el arreglo, diferencia entre la potencia producida en el eje por la M.E. P_{eje} y la potencia demandada por el generador eléctrico P_g , de forma semejante, efectuando el cociente de la potencia hidráulica P_H (medida para cada punto de revoluciones) y la potencia consumida por la bomba P_B , se obtiene el rendimiento de esta.

$$P_B = P_{eje} - P_g = P_{eje} - \left(\frac{P_e}{\eta_g} \right) \quad \eta_B = \frac{P_H}{P_B} \quad (3)$$

4. Validación del proceso de cálculo.

Esta acción de validación, se lleva a cabo por medio de la comparación del rendimiento de bomba obtenido por cálculo, según el procedimiento descrito, con el valor del rendimiento mecánico, de una bomba comercial, de características semejantes, en particular para este caso, se trata de bombas de engranajes internos, marca PMPO, de la cual se dispone información técnica detallada [9].

5. Determinación de las condiciones de funcionamiento nominales del arreglo tecnológico.

Del análisis de variación de los coeficientes de rendimiento obtenidos en función de las revoluciones, el módulo de la potencia eléctrica generada y la demanda de fluido motor, se definen las condiciones nominales de funcionamiento del arreglo tecnológico logrado.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

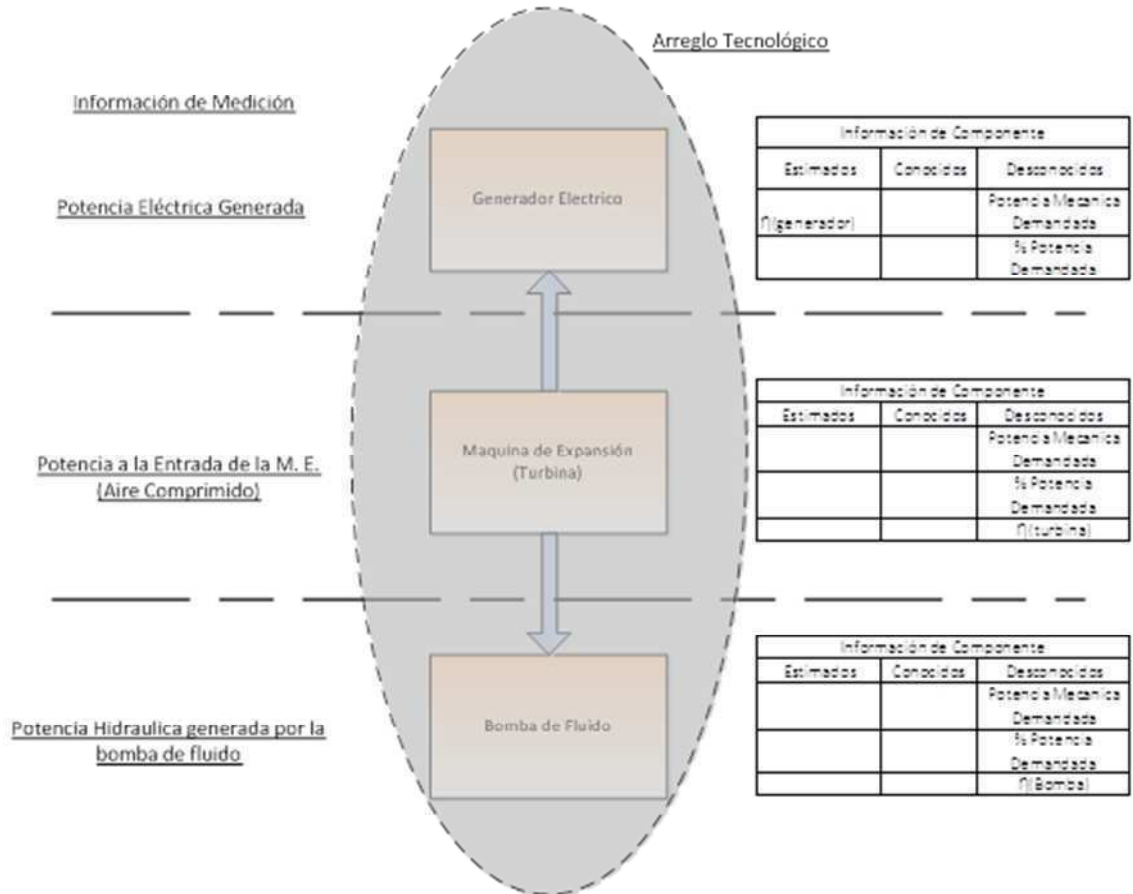


Figura 5 Representación esquemática de información para determinación de los parámetros desconocidos (las celdas en blanco de las tablas de datos de cada componente representa, precisamente la ausencia de información, ya sea estimado o conocido)

Los resultados obtenidos del proceso de estimación de la potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico, se encuentran tabulados en la tabla 1, en la misma se exponen tanto los resultados finales, como así también los valores de las mediciones y resultado de cálculos intermedios.

De forma semejante en la figura 7, son representados los resultados obtenidos mediante un gráfico en el campo de las revoluciones, el cual facilita la tarea de análisis, para la determinación de las condiciones de funcionamiento nominales del arreglo tecnológico.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

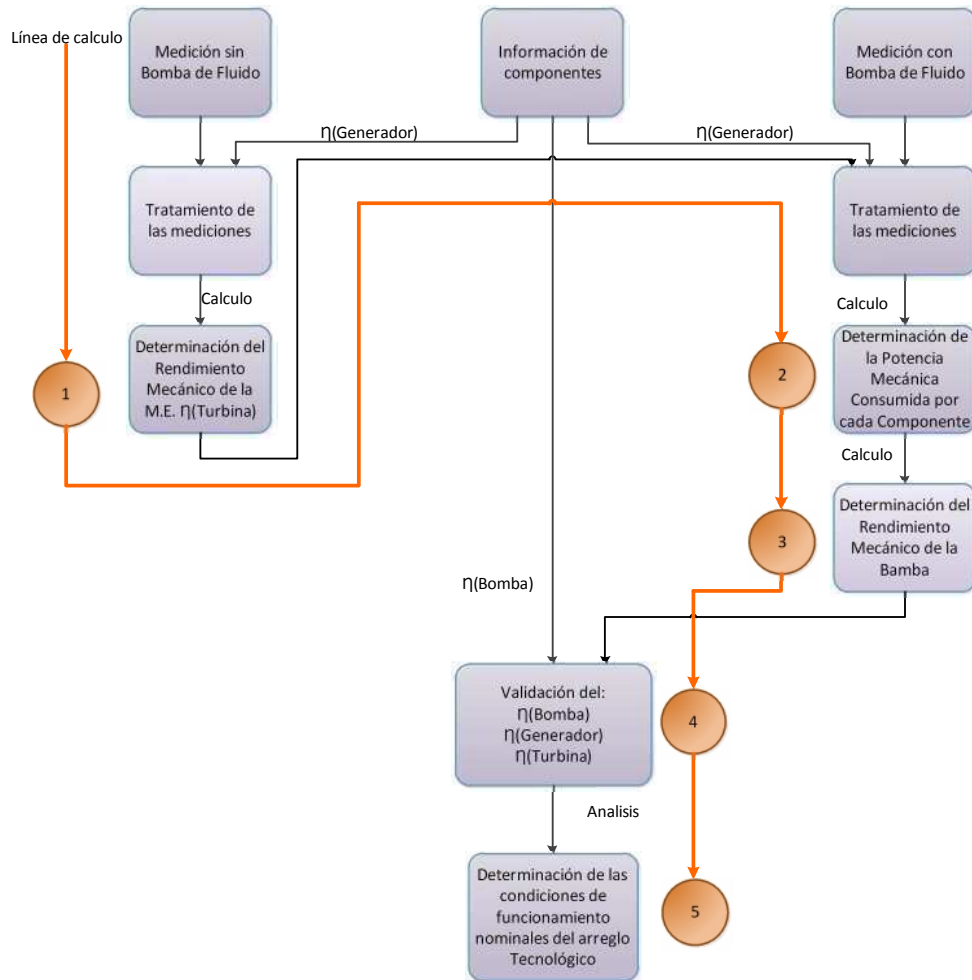


Figura 6 Representación de la línea de cálculo seguida para la estimación de la potencia demandada por los componentes del arreglo tecnológico.

Referencias tabla 1: P_{ME} (Potencia de entrada a la M.E., medida directamente); P_e (Potencia eléctrica generada, medida directamente); η_{ME} (Rendimiento de la M.E., obtenido por calculo); P_g (potencia mecánica consumida por el generador, obtenida por calculo); P_{eje} (Potencia mecánica producida por la M.E., obtenida por calculo); P_B (Potencia mecánica demandada por la bomba, obtenida por calculo); P_H (potencia hidráulica generada por la bomba, medida directamente); η_B (rendimiento mecánico de la bomba de fluido)

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL AREA
DESAFIO
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 1 Tabla de resultados de proceso de estimación.

<i>rpm</i>	P_{ME} sin bomba (W)	<i>Pe</i> salida (W)	<i>ME</i>	P_{ME} - con bomba (W)	P_g (W)	<i>Peje</i> (W)	P_B (W)	P_H (W)	<i>B</i>
900	57	0,9	0,049	74	3,5	3,7	0,2	0,0	0,128
1080	63	1,3	0,072	85	5,1	6,1	1,0	0,2	0,157
1380	85	2,6	0,108	120	10,2	13,0	2,8	0,8	0,289
1800	136	4,9	0,150	176	19,8	26,5	6,8	1,5	0,215
2100	181	6,4	0,159	224	25,5	35,6	10,1	2,0	0,196
2400	219	8,8	0,167	263	35,2	44,1	8,9	2,5	0,285
2640	249	11,0	0,175	312	44,0	54,7	10,7	3,3	0,308
2820	274	12,5	0,179	360	50,0	64,4	14,4	3,7	0,255
3000	297	14,1	0,184	382	56,6	70,3	13,8	4,1	0,297
3600	400	19,0	0,193	511	76,1	98,7	22,6	5,7	0,254
4200	512	25,8	0,198	641	103,2	126,7	23,5	8,6	0,365
4800	666	32,1	0,194	842	128,5	163,4	34,8	10,0	0,287

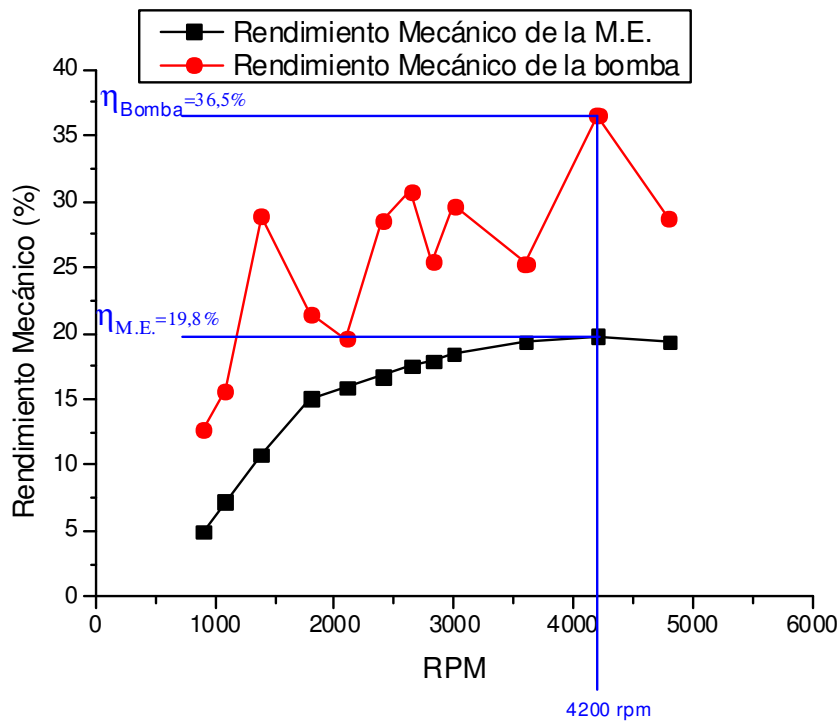


Figura 7 Resultado del proceso de estimación concretado



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL AREA
ASIGNATURAS
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4.3. Procedimiento de validación del método de estimación.

La coincidencia de los coeficientes obtenidos por el método de estimación descripto, reflejados en la última columna de la tabla 1 con la información de la bomba de referencia utilizada, la que arroja un valor de rendimiento de 30%, permiten adoptar como ciertos los coeficientes de rendimiento de la bomba incluida en el arreglo tecnológico, del generador eléctrico y la turbina, los que resultaban desconocidos en un principio, además de la figura 7 se destaca la exagerada irregularidad del comportamiento correspondiente al rendimiento mecánico de la bomba de fluido, este se asocia al mecanismo utilizado para la regulación de presión de descarga de fluido de la bomba al momento de las mediciones, el cual es de accionamiento manual.

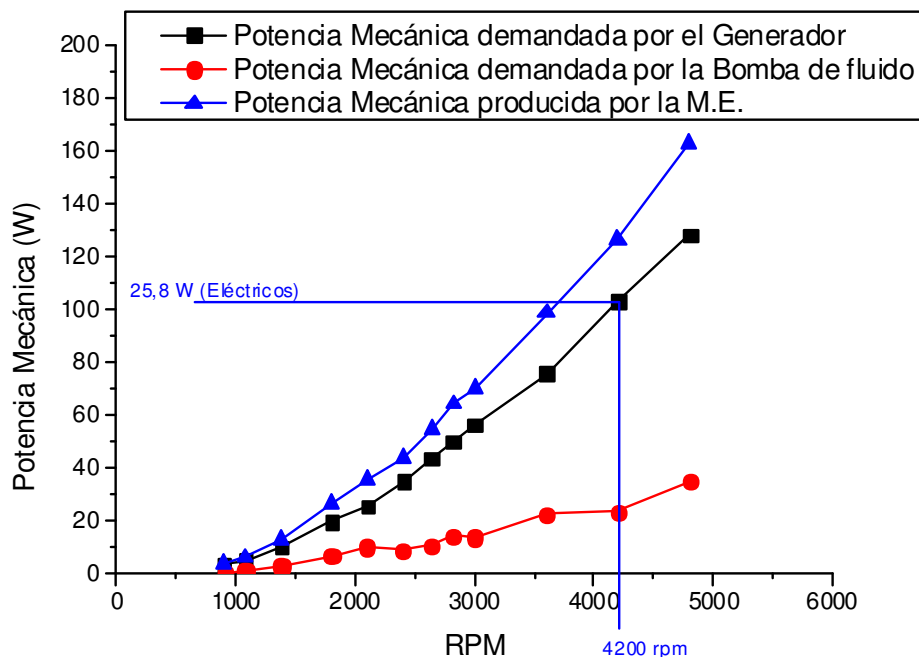


Figura 8 Resultado del proceso de estimación concretado, Potencia demandada por cada componente del Microtubogenerador.

En las figuras 7 y 8, se tiene representado la información resultado del proceso de estimación, a través de esta se considera concretada la etapa de caracterización del equipo, además de la lectura de estas figuras surge casi de inmediato la identificación de las condiciones nominales de funcionamiento buscadas, asociada a la información que se dispone del motor eléctrico utilizado.

Se considera condiciones nominales de funcionamiento de un equipo, aquellas condiciones en las que el equipo es capaz de operar en forma permanente, en este punto, los parámetros de funcionamiento permanecen constantes.

Las condiciones de funcionamiento identificadas como nominales para este arreglo en particular, son 4200 rpm, condición en la que el efecto útil final del equipo (potencia eléctrica generada) es $P(\text{eléctrica}) = 28,8\text{W}$, con un rendimiento mecánico global de $(\text{Mecánico}) = 4,1\%$.



Tabla 2 Condiciones de funcionamiento nominal del arreglo tecnológico logrado.

Condiciones de funcionamiento nominales		
RPM	Potencia Eléctrica generada	η (Global)
4200	25,8 W	4,1%

5. CONCLUSIONES.

Se puede comentar, que a pesar del reducido número de mediciones concretadas y la escasa información técnica de los componentes usados en el arreglo tecnológico, se logró la determinación de la demanda de potencia de estos, e incluso con esta información se determinaron las condiciones de funcionamiento nominales y el rendimiento mecánico global del arreglo.

Así mismo con la información lograda en el proceso de estimación comentado, se pudo determinar en forma cuantitativa a través del rendimiento de cada componente, un orden de importancia de las mejoras a tener en cuenta para el desarrollo, la que encabeza el generador eléctrico utilizado, ya que su rendimiento es demasiado bajo, estando al alcance mejoras sustanciales sobre el mismo. De forma semejante, del trabajo surge que la máquina de expansión utilizada, posee un rendimiento del mismo orden que el del generador eléctrico, aunque en este caso lograr mejoras sobre la misma no son simples ni económicas, tanto es así, que en este caso se justifica un cambio de escala que permita el uso de máquinas de expansión de mejores prestaciones.

6. REFERENCIAS.

- [1] Gomez Khairallah, Aníbal Oscar, Cattaneo, Carlos, Gomez Khairallah, Ulises Oscar(2011). "CONSTRUCCIÓN Y ENSAYO DE MICROTURBOGENERADOR". Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Oporto, Portugal.
- [2] Gomez Khairallah, Aníbal Oscar, Cattaneo, Carlos, Gomez Khairallah, Ulises Oscar (2011). "ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN TÉCNICA, EN UN SISTEMA RANKING ORGÁNICO, DE PROTOTIPO DE MICROTURBOGENERADOR. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15, 2011. ISSN 0329-5184, pag. 3-79, 3-85. Impreso en la Argentina.
- [3] Unidad Coordinadora del PERDER-UCP. 2008.
- [4] Ley Nacional Nº 26190 de Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía, destinada a la producción de energía eléctrica
- [5] X.D. Wang, L. Zhao, J.L. Wang. 2010. Experimental investigation on the low-temperature solar Rankine cycle. ScienceDirect, Applied Energy 87 (2010) 3366–3373.
- [6] Nishith B. Desai, Santanu Bandyopadhyay. 2009. Process integration of organic Rankine cycle. Energy, 1674–1686
- [7] Bertrand F. Tchanche, Gr. Lambrinos. 2011. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications; ScienceDirect Energy Conversion and Management 15 3963–3979
- [8] Cengel Yunua; Boles Michel; Termodinamica; 5ª Edición; ISBN 970-10-5611-6; Kalyan K. Srinivasan, Pedro J. Mago, Sundar R. Krishnan; Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperatura combustion engine using an Organic Rankine Cycle; ScienceDirect Energy 35 2387e2399,(2010)
- [9] Hoja de datos de bomba tomada como referencia en el proceso de estimación descripto <http://www.pmpo.com/es/allegati/Coppia%202.74%20-%206.82%20cc.pdf/>

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Ensayo de rotores eólicos en pequeña escala

F. Gagliano¹, D. Schupbach², A. D. Otero³, R. Sosa⁴

¹UBA - Facultad de Ingeniería - Dto. de Ingeniería Mecánica

Av. Paseo Colón 850 - C1063ACV - Buenos Aires – Argentina. rgdfan@yahoo.com.ar

²danibrandt@gmail.com

³UBA - Facultad de Ingeniería - Grupo de Investigaciones en Sistemas Energéticos Primarios (ISEP).

aotero@fi.uba.ar

⁴UBA - Facultad de Ingeniería - Laboratorio de Fluidodinámica. rsosa@fi.uba.ar

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. De esta manera se busca desarrollar herramientas, que permitan el estudio teórico y práctico de la obtención de energía eléctrica a partir de la energía eólica, con el objetivo de utilizarlas tanto en el ámbito de la educación como de la investigación aplicada.

El trabajo consistió en tres etapas. Por un lado se diseñó y construyó un pequeño banco de ensayos que permite estudiar generadores eólicos de paso variable y con diferentes geometrías de las aspas. Dicho equipo permite, entre otras cosas, el relevamiento de la curva de potencia extraída por el generador en función de la velocidad de punta de pala del mismo (curva: C_p vs λ).

Por otro lado, se implementó un algoritmo basado en la teoría BEM que permite estimar la curva C_p vs λ para un generador eólico a partir del conocimiento de la geometría de las aspas y de las características aerodinámicas de los perfiles alares empleados en su construcción.

Por último se digitalizó una balanza aerodinámica con el objetivo de ensayar los perfiles alares a ser empleados en el generador eólico. De esta forma se pueden relevar las curvas de sustentación y arrastre (en función del ángulo de ataque y para diferentes números de Reynolds) para ser utilizadas como insumo por el algoritmo BEM.

En el presente trabajo se comparan las curvas C_p vs λ obtenidas tanto numéricamente como experimentalmente en el caso de aspas construidas con perfiles NACA0012 y empleando diferentes ángulos de paso.

Palabras Claves: generador eólico, ensayo, BEM, túnel de viento.



1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. Los resultados expuestos en el presente trabajo son parte de un proyecto que busca desarrollar las facilidades que permitan estudiar, tanto en el ámbito académico como en el de la investigación aplicada, la obtención de energía eléctrica a partir de la energía eólica.

El proyecto integral incluye, además de la construcción del rotor eólico en sí, la digitalización de una balanza aerodinámica para el estudio de las curvas características de los perfiles alares, la implementación de un algoritmo de cálculo, basado en la teoría BEM (teoría del momentum del elemento de pala o Blade Element Momentum), para la validación de los resultados experimentales obtenidos con el rotor a escala y la construcción de distintos moldes para poder fabricar diferentes tipos de aspas.

De esta manera se espera disponer de un equipo versátil para relevar experimentalmente y estimar numéricamente las curvas de potencia que se pueden obtener en un generador eólico teniendo como variables: las aspas a emplear (con cuerda y alabeo variables a lo largo de la envergadura) y el paso de las mismas (que podrá a su vez ser controlado dinámicamente).

En el marco del presente trabajo se exponen los avances realizados en el diseño, la construcción y la validación preliminar del rotor eólico. Esta etapa incluyó: la implementación del sistema de control de paso de las aspas, el diseño e implementación de un dispositivo para medir el torque generado por el equipo, y la instrumentación necesaria para medir la velocidad de la corriente libre y la velocidad de giro del rotor. Se realizaron, a su vez, ensayos preliminares con aspas que consisten en secciones del perfil alar NACA 0012 con alabeo y cuerda constantes. De esta forma se logró una primera comparación entre el cálculo teórico y los resultados experimentales.

Para determinar el tipo de rotor a diseñar, a priori, se tuvieron en cuenta los siguientes puntos. Como factor limitante se adoptó el diámetro del túnel de viento más grande disponible en el laboratorio de Fluidodinámica de la FIUBA (LFD) $D_{\text{TUNEL}} = 60$ cm. Si se adoptara un diámetro lo suficientemente pequeño como para evitar efectos de bloqueo en el túnel las palas resultantes serían demasiado esbeltas y esto dificultaría mucho su fabricación, con lo cual se aceptó trabajar con $D = 40$ cm para el rotor. Cabe destacar que si bien el diámetro elegido es demasiado grande respecto del diámetro del túnel, se optó por trabajar asumiendo bloqueo del túnel pero priorizando la facilidad constructiva de las aspas, cabe mencionar a su vez que las dimensiones del equipo permiten su fácil traslado para ser ensayados en túneles de mayor diámetro.

Considerando el rango de velocidades del túnel de viento (de 5 a 20 m/s) se optó por trabajar en el rango de velocidades del flujo libre comprendidas entre 12 y 15 m/s.

Se consideró que los λ óptimos se encontrarían entre 6 y 7 que es lo usual considerando el número de palas utilizado (λ es la TSR - Tip Speed Ratio, la relación entre las velocidades perimetral y del viento en la punta de la pala) y como número de palas, se adoptó $B = 3$ que es lo usual en las máquinas comerciales actualmente [1] y además facilita, entre otras cosas, el balanceo del rotor. De esta forma, se estimó que para una velocidad del flujo libre de $U_1 = 12$ m/s y con $\lambda = 6$ el rotor estaría girando a 3500rpm siendo este valor el límite superior adoptado, para la velocidad de giro del rotor en el diseño.

Con estos cálculos preliminares la potencia disponible en la corriente de viento de ensayo es de: $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho U_1^3 A = 130$ W (donde U_1 es la velocidad de la corriente libre, A es el área del rotor como actuador discal y ρ es la densidad del aire a la temperatura ambiente).

De la potencia disponible, el mejor caso sería tener una turbina ideal, lo cual considerando el límite de Betz [2] $C_{\text{PBetz}} = 0,59$ esto representaría unos 70W en el eje del rotor. Está claro que al no ser un diseño de pala perfecto, y teniendo en cuenta todas las pérdidas, fallas constructivas, y la escala del modelo, la potencia que esperamos obtener es bastante menor.

Afinando un poco más los datos para el diseño se analizó la potencia generada por el rotor cuando empleamos un perfil NACA 0012 para las condiciones de diseño de $U_1 = 12$ m/s y $\lambda = 6$. Del algoritmo implementado en Matlab® se desprende teóricamente, incluyendo las pérdidas de estela y de punta de pala, que la potencia a obtener es de 55W, a eso debemos descontar las pérdidas del mecanismo, por ejemplo en los rodamientos.

Con estos parámetros, velocidad de rotación y potencia, se seleccionó el generador a utilizar, resultando en un motor de corriente continua (CC) de la marca Remmsi, trabajando como generador, el cual tiene una potencia nominal de 100W a 3000rpm, en 24V. Este motor, nos permite además

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



poder intercambiar distintos rotores para trabajar a otras velocidades de rotación si surgiera a futuro la necesidad.

El hecho de utilizar un motor de CC, brinda la posibilidad que al montar un par de palas de prueba, se pueda verificar por ejemplo el balanceo del rotor antes de colocar el equipo en el túnel de viento, alimentando el motor con una fuente de tensión variable. Trabajar a 3500 rpm representa una tensión en bornes del generador superior a la nominal, del orden de 28V (en vacío) lo cual no es un problema para la electrónica que maneja la resistencia de carga.

Una vez definido el generador a utilizar se procedió en una primera etapa a diseñar el ensamblado de todo el rotor eólico incluyendo la disposición de los mecanismos que permiten variar el paso de las aspas, las bancadas que soportan al generador y la ubicación del sensor de fuerza para medir el torque generado (Figura 1). En la Figura 1 a su vez se presenta una fotografía con el equipo ya construido y dispuesto en la sección de prueba del túnel de viento.

En las secciones siguientes describiremos sucesivamente: el diseño y desarrollo necesarios para lograr la instrumentación del equipo, la implementación del algoritmo que permite estimar la curva C_p vs λ y, finalmente, los resultados donde se comparan las curvas C_p vs λ obtenidas tanto numéricamente como experimentalmente en el caso de aspas construidas con perfiles NACA0012 y empleando diferentes ángulos de paso.

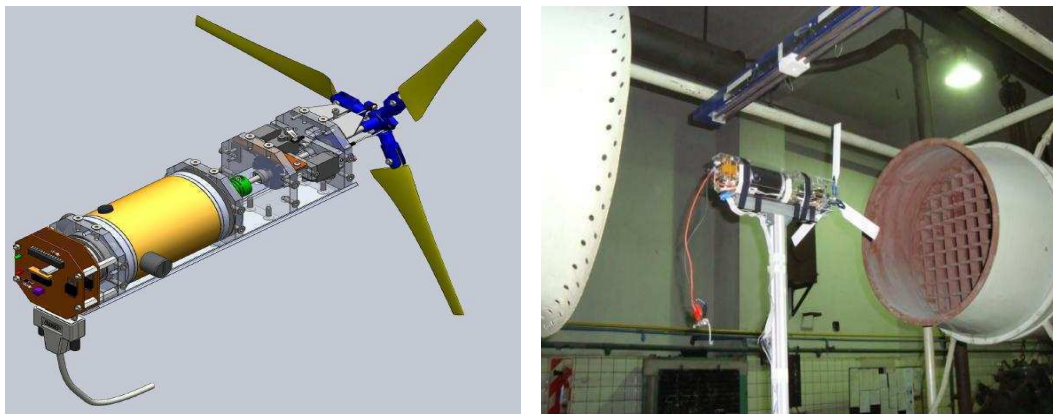


Figura 1. (Izquierda) Diseño del ensamblaje y disposición de las piezas del generador. (Derecha) Vista del generador montado en la sección de prueba del túnel de viento.

1. DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO

1.1 Diseño de la electrónica necesaria para la instrumentación del generador

Para el desarrollo de la electrónica, fue necesario primero aislar los parámetros necesarios para el trabajo, es decir, las variables a manejar tanto de entrada como de salida. Tomando a la electrónica del sistema como una caja negra, ésta debe ser capaz de leer las siguientes variables en tiempo real: RPM del rotor, velocidad de la corriente U_i , torque en el generador. También debe ser capaz de setear o escribir: paso de las palas y porcentaje de frenado.

Se describe a continuación la estrategia para manejar cada una de estas variables [3].

1.1.1 Lectura de las RPM

Para la lectura de la velocidad angular del rotor, se utiliza un encoder, fabricado con un disco ranurado y un detector óptico, seguido de un circuito acondicionador de señal, para generar a la salida una onda cuadrada de frecuencia proporcional a la velocidad de giro del eje. El disco ranurado posee 10 ranuras, con lo cual genera 10 pulsos en cada revolución del eje. Cada vez que se interrumpe el haz del emisor infrarrojo, se genera un pulso en la salida, el cual es leído por el micro controlador y almacenado automáticamente en un contador de eventos interno, el principio se ilustra en la Figura 2. En dicha figura también se muestra una fotografía donde se aprecia el montaje del sensor en una de las bancadas del motor.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Para determinar la velocidad, se lee la cantidad de pulsos almacenados en el contador del micro en un periodo de tiempo, con lo cual se puede conocer la frecuencia. La señal del lector pasa además por un buffer TTL 7407 y al igual que todas las señales del sistema está accesible en la placa principal o placa base, para ser monitoreada por medio de un osciloscopio, por ejemplo.

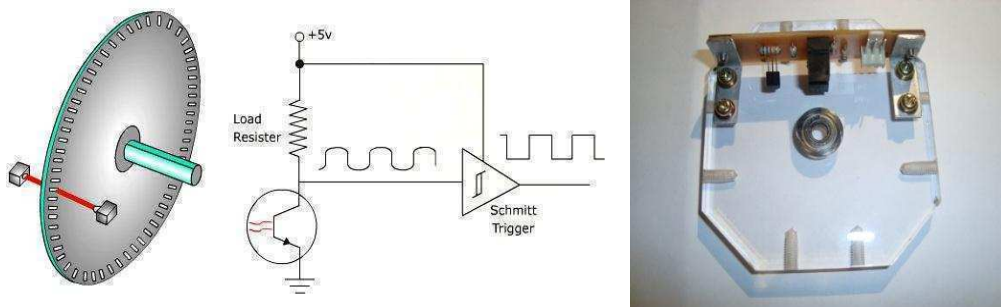


Figura 2. Esquema del principio de funcionamiento del encoder óptico y detalle del montaje del sensor en la bancada del motor

1.1.2 Lectura de Velocidad de corriente libre

Para medir la velocidad de la corriente libre, se utiliza un tubo Pitot, junto con un sensor de presión diferencial, el cual posee incorporada la electrónica necesaria para realizar el acondicionamiento de señales del sensor de Δp . El sensor de presión diferencial posee una salida en tensión de 0V a 5V para velocidades medidas como alturas de columna de agua entre 0 y 1" de columna de agua.

Dado que el sensor de presión ya posee su propia electrónica, lo único que fue necesario realizar fue un circuito seguidor, implementado con un Amplificador Operacional LM741. El objetivo de este circuito es simplemente aislar las señales entre el amplificador propio del sensor de presión del Pitot y el micro controlador. La salida entra directamente al convertidor A/D del micro controlador y se incorpora a las variables leídas, para luego ser enviada a la PC junto con todos los otros parámetros. Se agregó en la entrada del amplificador una resistencia de pulldown para que la entrada quede puesta a tierra cuando no se conecta el sensor al equipo, esto evita que el operacional tenga valores aleatorios en la salida, con esto se leerá 0V en la entrada analógica del A/D del micro controlador.

1.1.3 Medición del Torque

La estrategia consiste en utilizar un sistema de palanca, la cual está montada en el motor de CC utilizado como freno. La palanca convierte el torque en el rotor Q, en una fuerza a una distancia d, del centro de rotación del eje. Dada las dimensiones del dispositivo, cuyo cuerpo no supera los 80 mm de lado, y para evitar sistemas de palanca para el conexionado de celdas de carga, se optó por un sensor de fuerza de tipo piezoeléctrico, principalmente por su tamaño. Todo este sistema tiene como ventaja, su muy bajo costo frente a torquímetros dinámicos comerciales, reducido tamaño y relativamente fácil implementación de la electrónica asociada. Del análisis preliminar de potencia a obtener de la corriente de viento, para el túnel de viento disponible, velocidades de rotación, etc, se concluyó que un sensor de 15 N a 30 mm de distancia del eje es lo correcto, facilitando además el montaje en el dispositivo (esto se puede observar en la Figura 3). Con esta configuración, el sistema permitirá medir torques en el eje de hasta 50 N.mm.

El sensor piezoeléctrico de fuerza seleccionado, de tipo puente de Wheatstone, es el FSG-15N1A de Honeywell. La señal obtenida, es amplificada por un amplificador de instrumentación AD620 y luego leída por un canal del convertor A/D del microcontrolador PIC16F873A. Para alimentar el sensor, se utiliza un regulador de tensión de tipo diodo Zener, de 10V.

El sensor posee una sensibilidad de 24 mV/N, lo cual a fondo de escala representa una tensión del puente de 360 mV. Para obtener por ejemplo, 5,1V al medir 10 N, que representan 30 N.mm, la ganancia necesaria en el AD620 es de 20,25.



UTN.BA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
DE INGENIERÍA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

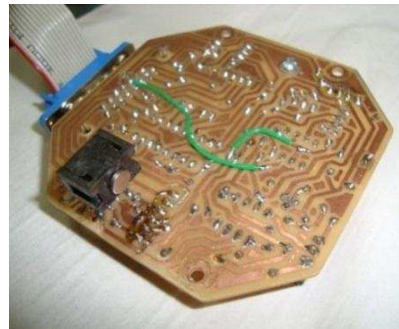
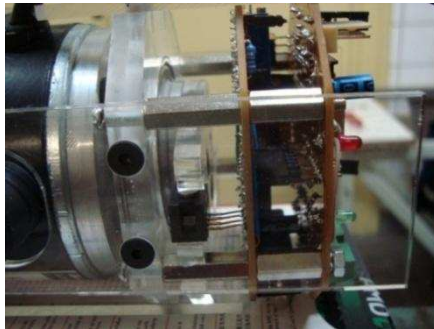


Figura 3. (Izquierda) Detalle del montaje del sensor de fuerza y el sistema de palanca. (Derecha) Detalle del montaje del sensor de fuerza en la placa de circuito impreso

Para poder realizar modificaciones en la ganancia del amplificador, se previó tener 2 modos de operación, uno con ganancia fija y otro con ganancia variable, lo cual permite además ajustar el amplificador en un cierto rango de interés y provee mayor versatilidad al equipo. Así tendremos:

Modo fijo: Ganancia de 23,4545. Se obtiene por resistencia fija al 1% de tolerancia

Modo variable: Ganancia entre 26 y 50. Se obtiene por una resistencia variable en una de las plaquetas.

El circuito AD620, es un amplificador de instrumentación de fácil implementación y configuración, y su ganancia queda determinada solo por el valor de una resistencia externa (R_G) según: $G = \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1$.

Dado el tamaño del sensor y la disposición de las placas de electrónica en el dispositivo, esto permitió prever el montaje del sensor directamente en la placa como se muestra en la Figura 2 y se detalla en la Figura 3.

1.1.4 Paso de las Palas

Para el seteo del ángulo de posicionamiento o pitch de las palas, se utilizan servomotores de CC del tipo de aeromodelismo, los cuales requieren de una señal cuadrada de ancho de pulso variable (PWM) como "set point" para su posición. Las grandes ventajas que tienen son su bajo costo, alto nivel de integración, y facilidad de control para esta aplicación.

Estas señales PWM se generan dentro del micro controlador utilizando como base de tiempos la rutina principal del programa, la cual cada aproximadamente 10ms genera los pulsos del ancho correcto, ya sea para los servos que giran a derecha o bien a izquierda, necesario esto debido a que no todos están montados en la misma posición, como se observa en la Figura 4.

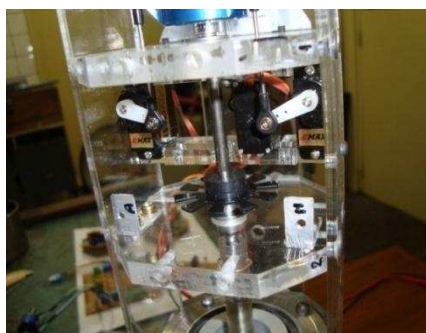


Figura 4. (Izquierda) Detalle del montaje de los servos en el equipo. (Derecha) Detalle del rotor modificado para trabajar con 3 palas.

Estas señales pasan por un buffer TTL 7407, cuyo objetivo es absorber la corriente consumida por los servos y aislarlos del micro controlador ante eventuales malas conexiones, cortocircuitos, o inclusive falla del servo, etc. Se realizó el mando del paso con 3 servomotores, debido a que esta solución



optimizaba el espacio y evitaba la fabricación de piezas adicionales para comandar el sistema del rotor, obtenido este a partir de un rotor modificado de helicóptero de aeromodelismo KDS450, el cual se adaptó para soportar 3 palas, como se observa en detalle en la Figura 4.

1.1.5 Frenado variable del Rotor

El frenado del rotor se realiza por medio del motor de CC utilizado como generador, la potencia obtenida en el rotor es disipada en forma de calor y/o luz en una lámpara o un resistor. La tensión generada por este será proporcional a su velocidad angular, pero la corriente dependerá de la resistencia interna del generador/motor y de la carga. Para poder tener un amplio margen de trabajo en el frenado del rotor, se optó por conectar la resistencia de carga a través de un sistema PWM (Modulación por ancho de pulso) el cual permite obtener prácticamente cualquier nivel de frenado del rotor en un amplio rango de velocidades angulares. La señal PWM se genera a partir del modulo interno del micro controlador, con una frecuencia base de 1kHz y ancho de pulso variable entre 0 % (i.e. sin carga) y 100 % (i.e. totalmente cargado). Como elemento interruptor para el choqueo se adoptó un transistor MOSFET IRF630 de canal N, el cual soporta hasta 9A de corriente lo cual es más que suficiente para nuestra aplicación.

1.1.6 Agrupación de los circuitos

Se materializaron los circuitos en 2 plaquetas diferentes montadas en paralelo, de manera que todo quede dentro del cuerpo del prototipo. Para el diseño de los circuitos impresos se recurrió a un Software de CAD específico. Previamente se definió la ubicación de las placas en la estructura, y luego de algunas componentes como el sensor de fuerza, conectores, etc. En total se construyeron 4 placas de circuito impreso, las cuales tienen las siguientes funciones:

Placa del micro controlador (Placa 1): Esta placa posee el Microcontrolador PIC16F873, el conector necesario para su programación, la bornera de conexión para el generador, la bornera de conexión para la carga, un led de encendido, uno de monitoreo básicamente utilizado para desarrollo del software. También se encuentran los 3 conectores para los servomotores y el transistor MOS para el manejo por PWM de la carga.

Placa del sensor de Fuerza (Placa 2): Esta placa posee el sensor de fuerza, el amplificador del mismo (AD620), con la posibilidad de utilizarlo con ganancia fija o bien ganancia variable según lo requiera la experiencia. También se encuentra el circuito seguidor para la señal del tubo pitot, el circuito MAX232 cuya función es generar los niveles de tensión para el puerto RS-232. El regulador de tensión de +5V LM7805 también es parte de esta placa, como también el conector DB-15 para la conexión del cable a la placa base.

Placa de RPM (Placa 3): Esta placa tiene la función de sostener el sensor óptico para detectar las RPM del eje, y además posee el acondicionamiento de señal para generar una onda cuadrada (ver Figura 3).

Placa BASE (Placa 4): En esta placa se concentran todas las conexiones, la alimentación, y los comandos manuales tanto de paso y de freno, los mismos implementados con potenciómetros multivoltajes, para obtener una mejor resolución. Las señales de freno y paso también pasan por un circuito seguidor antes de dirigirse al micro controlador en la Placa 1. Esta placa posee además conexión para alimentar el sensor del tubo Pitot con 12V, y posee una bornera, o bien un conector en línea, para el monitoreo de todas las señales.

1.2 Instrumentación de la balanza aerodinámica

1.2.1 Mecanismo de la balanza

La balanza aerodinámica de perfiles tiene como objetivo obtener las fuerzas de arrastre y sustentación que se generan en un dado perfil al ser puesto en una corriente de aire de velocidad uniforme y conocida. Consta de un juego de palancas que transfieren los esfuerzos hacia un par de pesas, las cuales se desplazan en una escala graduada donde se puede leer la fuerza correspondiente. En el marco del presente trabajo se adaptó la balanza para que en lugar de medir fuerzas por medio del desplazamiento de pesas, lo hiciera por medio de la deformación de celdas de carga. Esto permite mayor precisión y mayor facilidad para la recopilación y el manejo de los datos de los ensayos. Para lograrlo, fue necesario caracterizar la balanza y adaptar dos celdas de carga, una

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
DE INGENIERÍA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

para la sustentación y otra para el arrastre, de manera tal de interferir lo menos posible con el diseño original de la balanza. En la Figura 5 se puede observar un esquema del mecanismo y del montaje de las celdas.

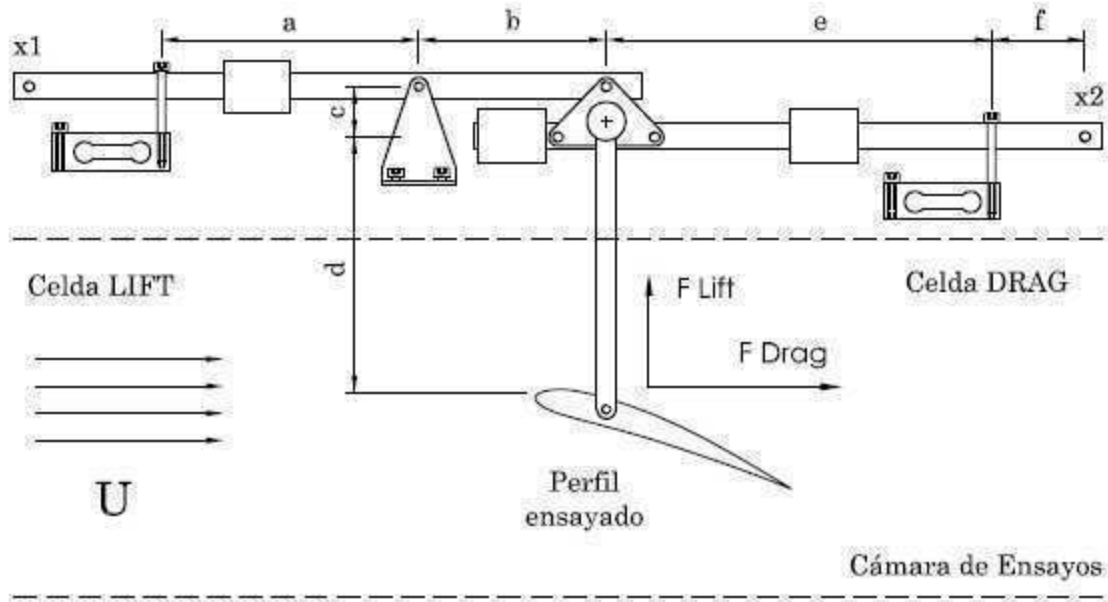


Figura 5: Esquema del montaje mecánico de la balanza de perfiles.

La balanza también debe ser capaz de admitir varios tipos de perfiles alares u otras geometrías para los diversos ensayos.

Para el presente trabajo se fabricó un perfil NACA 0012 en poliuretano expandido de alta densidad. La cuerda del perfil se seleccionó para lograr un bloqueo en la sección del túnel de viento menor al 50% con un ángulo de ataque de 90°, mientras que la envergadura quedó definida en un valor de 30 cm dada la distancia entre soportes. La forma adecuada del perfil se le confirió utilizando corte por hilo caliente CNC, se reforzaron los laterales con dos chapas de aluminio de 3 mm de espesor con la forma del perfil a las cuales se fijaron sujeciones que vinculan todo el conjunto al eje principal. Este eje permite que durante el ensayo se pueda cambiar el ángulo de ataque del perfil.

Para estimar el valor de las fuerzas a medir se analizan las Ecuaciones (1) y (2) que definen los coeficientes de interés C_L y C_D (respectivamente). Con los coeficientes estimados iguales a la unidad se pueden calcular los esfuerzos máximos a soportar y por lo tanto a medir por las celdas de carga, resultando en: $F_{Lift} = 0.8 \text{ N}$ y $F_{Drag} = 1.6 \text{ N}$. Entonces, para tener cierto margen, se adopta como criterio que las fuerzas máximas ejercidas serán $F_{Lift} = 1 \text{ N}$ y $F_{Drag} = 2 \text{ N}$.

$$C_L = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho c U^2} = \frac{\text{Fuerza de sustentación/ unidad de longitud}}{\text{Presión dinámica x cuerda}} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho c U^2} = \frac{\text{Fuerza de arrastre/ unidad de longitud}}{\text{Presión dinámica x cuerda}} \quad (2)$$

Estas fuerzas de sustentación y arrastre generadas en el anclaje del perfil deben ser afectadas por las longitudes de las palancas que interfieren en el vínculo de cada una de ellas con la respectiva celda de carga, como se observa en la Figura 5. Para la fuerza de sustentación, la misma debe ser afectada por la relación de longitudes b/a mientras que para el arrastre, la relación es d/c . Para realizar las mediciones, es necesario equilibrar la balanza con los contrapesos.

1.2.2 Diseño del sistema electrónico de la balanza de perfiles

Celdas de carga

Las celdas de carga están constituidas por una estructura que se deforma proporcionalmente a la carga que soporta, sobre la cual se instalan galgas extensométricas que miden la deformación de la estructura a la que son adosadas. Estas galgas se ordenan de manera que formen un puente de Wheastone. La principal característica de este puente es su alta sensibilidad. Se pueden ver los principios de las celdas de carga en Field and Beams [6]. En la Figura 6 se observa un esquema de la celda utilizada.



Figura 6: Celda de carga tipo single point, de puente completo.

Al igual que en el diseño del amplificador para el sensor de torque, en este caso se implementa el amplificador de las celdas de carga con un amplificador de instrumentación AD620. La diferencia con el caso del sensor de torque es que, dado que las señales son de una magnitud mucho menor, se debe trabajar con ganancias mucho más altas, superiores a 10000. Por este motivo se debe implementar una amplificación en etapas, intercalando luego del amplificador AD620 una corrección del offset y un filtro pasa-bajos. La celda seleccionada es de 2 mV/V, lo cual significa que la tensión de salida del puente de Wheastone será de 2 mV para la carga máxima de la celda por cada voltio de alimentación del puente. Si se alimentara el puente con una tensión excesiva, se incurriría en grandes errores debido a variaciones en las resistencias por variación térmica. Como estándar, en general se especifica entre 5 V y 15 V para la tensión de alimentación. Para este trabajo se seleccionó una celda comercial tipo single-point modelo CDL de Flexar S.R.L., cuyas características principales son: Tipo paralelográfica de aluminio, de puente completo, cuatro galgas extensométricas, carga máxima: 50 N, sensibilidad: 2 mV/V, resistencia del puente de 350 ohms.

Para este caso, con 10 V de alimentación la máxima tensión de salida del puente es de 20 mV. Dado que la celda es de 50 N, se tiene en la salida 0.4 mV/N.

Diseño del amplificador

Como ejemplo, y para fijar parámetros, asumiremos que las relaciones de palanca anteriormente son unitarias, lo cual es posible ajustando la posición del montaje de las celdas. Para la fuerza de sustentación se estimó un máximo de 2 N. Teniendo en cuenta la constante de la celda y la tensión de alimentación, se obtiene como salida de la celda 0,8 mV.

$$V_{o,celda} = (2mV/V)10V \frac{2 N}{50 N} = 0.8mV \quad (3)$$

El objetivo del amplificador es obtener en la salida una tensión del orden de 2500 mV/N, con lo que para un span de 2 N en la fuerza de sustentación representa en la salida del amplificador 5 V. Esto último requiere en el amplificador una ganancia total de $GT = 5 V/0.8 mV = 6250$. La ganancia finalmente es obtenida como el producto de las ganancias de las dos etapas implementadas, realizando la corrección de offset en la primera etapa. La tensión de salida del conjunto responde a la Ecuación (4):

$$V_{o,amp} = (V_{o,celda}G_1 - V_{offset})G_{pb}G_2 \quad (4)$$

Este es el criterio para desarrollar las dos etapas, observando en los ensayos que la relación señal-ruido sea lo suficientemente baja como para no alterar las mediciones. Otro parámetro importante es

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



el ancho de banda del amplificador. Es necesario recortar la banda de frecuencias para que solo se amplifiquen las bajas frecuencias. Consecuentemente, fue necesario implementar un filtro activo pasa-bajos entre G1 y G2, este último representado en la Ecuación 4 por Gpb.

Con el objeto de dar un amplio margen de trabajo, se implementó nuevamente una corrección del offset que permite pre-cargar las celdas o bien utilizar modelos con diferentes pesos y corregir el offset generado. También se implementó en la etapa de ganancia G2 la posibilidad de variar la ganancia para tener mayor libertad en el ajuste de los parámetros del sistema.

2. IMPLEMENTACIÓN DEL CÓDIGO BEM

Para calcular las curvas de potencia del generador se utilizó un método análogo al presentado por Manwell et al. [2] con pequeñas variaciones respecto de los desarrollos que allí figuran.

El método se basa en la teoría de la cantidad de movimiento del elemento de aspa. En dicha teoría se igualan las fuerzas correspondientes a un elemento de longitud diferencial de aspa con las correspondientes a la conservación de la cantidad de movimiento de la corriente de fluido que atraviesa un anillo de radio determinado y espesor diferencial del rotor. De esta forma se obtiene un par de ecuaciones para los factores de inducción, las que al depender de los coeficientes de sustentación y arrastre, y por ende del ángulo de ataque y de incidencia que dependen de estos factores, deben resolverse iterativamente.

Por otro lado, en el cálculo se tuvo en cuenta las pérdidas en las puntas de las palas. Estas pérdidas se deben a que parte del flujo que incide sobre los perfiles alares que forman el aspa en vez de circular en la forma correspondiente lo hace alrededor de la punta del aspa, reduciendo la sustentación y disminuyendo la potencia extraída. Las pérdidas de este tipo son más importantes cuanto más cerca de la punta del aspa esté la estación considerada. Este efecto puede considerarse a través de un factor F propuesto por Prandtl (ver [2], y citas allí). Este factor se aplica modificando las fuerzas obtenidas de la conservación de las cantidades de movimiento lineal y angular de la corriente de fluido.

Además, se utilizó una variante basada en la relación empírica de Glauert [4,5] en caso que la estela detrás del rotor se vuelva turbulenta. Manwell et al. [2] exponen un método que tiene en cuenta todas estas situaciones pero considera que la fuerza de arrastre es nula. En este trabajo no se utilizó esta última hipótesis de forma de mejorar el cálculo en caso de perfiles que no sean delgados donde el arrastre puede ser importante. Una detallada explicación del código implementado para el estudio de este generador puede encontrarse en [7].

3. RESULTADOS

En esta sección presentamos los resultados obtenidos por un lado con la balanza aerodinámica y por el otro con el generador. A su vez presentamos la comparación entre las curvas de potencia obtenidas con el generador y aquellas que resultan de la implementación del algoritmo BEM cuando este utiliza como datos de entrada las curvas $C_L(\alpha)$ y $C_D(\alpha)$ relevadas en la balanza aerodinámica.

En la Figura 7 se presentan los valores de C_L hallados con la balanza para un perfil NACA0012 considerando $Re = 60.000$ y en función del ángulo de ataque (α) junto con datos experimentales hallados por [8] para el mismo perfil pero considerando $Re = 160.000$.

Se observa la gran diferencia en el comportamiento de la sustentación de acuerdo al número de Reynolds considerado. Cabe destacar, sobre todo, la gran diferencia que presentan ambas curvas para ángulos de ataque elevados. Para el Re estudiado en el LFD (que se corresponde con los valores de Re que realmente experimentan las aspas en el generador) la pérdida de sustentación del perfil se produce para ángulos de ataque mayores y de manera más suave que en el caso de considerarse $Re = 160.000$.

A su vez en la Figura 8 se presentan los valores de C_D hallados con la balanza para un perfil NACA0012 a $Re = 60.000$ en función del ángulo de ataque (α).

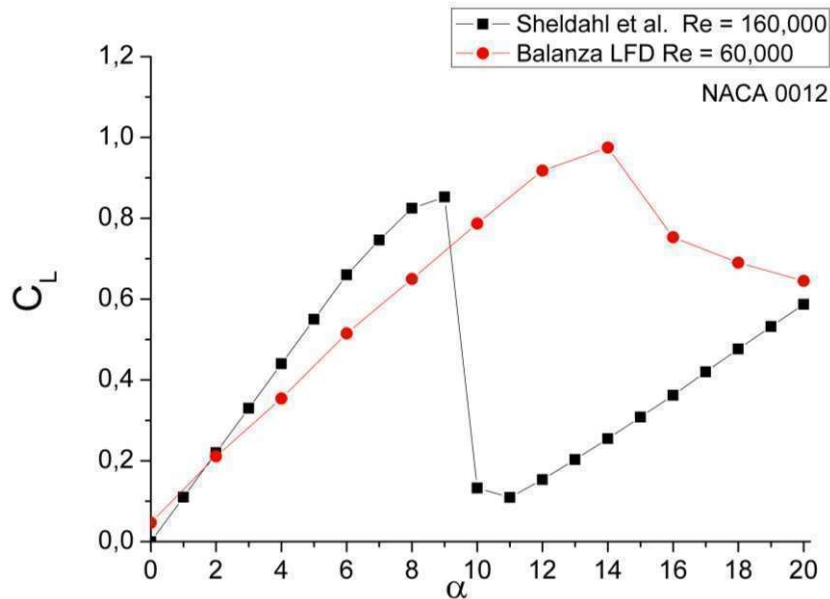


Figura 7. Curva $C_L(\alpha)$ obtenida mediante la balanza del LFD para un NACA 0012. $Re = 60.000$

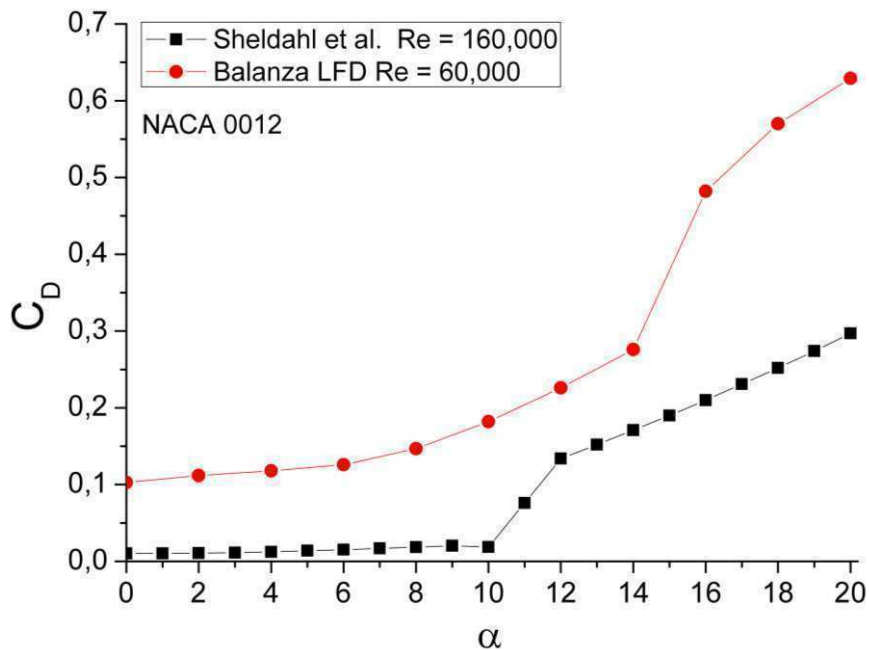


Figura 8. Curva $C_D(\alpha)$ obtenida mediante la balanza del LFD para un NACA 0012 a $Re = 60.000$

Por un lado podemos señalar que, en el caso $Re = 60.000$, los valores relativamente altos de arraste (especialmente evidenciados para valores de α pequeños) se deben a que la balanza mide además del arraste del perfil el arraste de los brazos que lo soportan. Se espera en un trabajo futuro poder discernir el aporte de cada uno de dichos elementos y de esta forma poder tener un valor más acertado del arraste experimentado por el perfil. Sin embargo en el marco del presente trabajo, y por simplicidad, se ha corregido la curva $C_D(\alpha)$ mediante la resta del valor constante de $C_D=0.1$ (siendo este valor igual a la diferencia que presentan ambas curvas para $\alpha=0$).

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Cabe destacar sin embargo que la balanza recupera correctamente la dinámica de la curva del arrastre en función de α presentando un aumento fuerte del arrastre cuando el perfil entra en pérdida ($\alpha \sim 14^\circ$ para $Re = 60.000$).

En esta primera etapa del proyecto, a su vez, hemos estudiado el comportamiento del generador empleando un perfil simétrico NACA0012. Las aspas en el generador no poseen alabeo y se han estudiado distintos ángulos de pitch (θ).

En la Figura 9 se presentan las curvas de C_p vs λ obtenidas con el programa para un perfil NACA0012 (tomando las curvas de $C_L(\alpha)$ y $C_D(\alpha)$ de los datos experimentales de la balanza, figuras 7 y 8) para distintos ángulos de pitch (curvas con línea llena). A su vez se presentan en dicha figura los valores experimentales hallados para el generador considerando tres ángulos de pitch diferentes (símbolos, $\theta = 14^\circ$, $\theta = 10^\circ$ y $\theta = 6^\circ$). Los resultados experimentales se obtuvieron fijando la velocidad del flujo libre en el túnel de viento ($U_f = 12$ m/s) y variando el nivel de frenado del motor eléctrico.

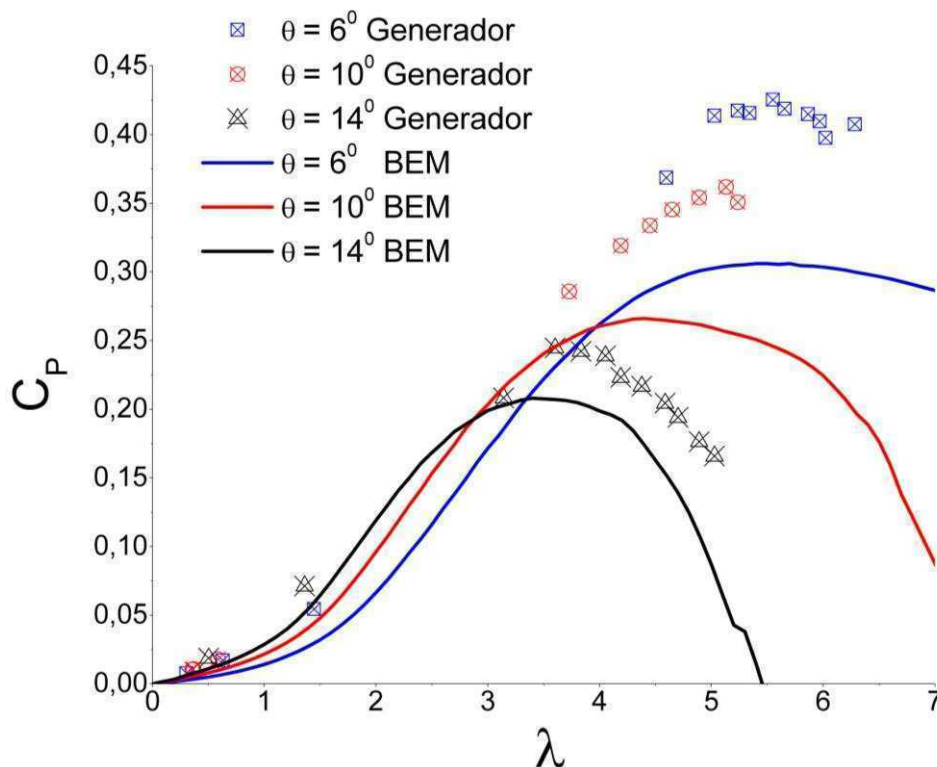


Figura 9. Curvas C_p vs λ para distintos valores del ángulo de pitch. Línea llena: resultados numéricos (BEM), símbolos: resultados experimentales obtenidos con el generador.

Se puede observar que el comportamiento general de las curvas C_p vs λ respecto del parámetro θ es similar tanto para las curvas numéricas como para las curvas obtenidas con el generador. En ambos casos a mayor ángulo de pitch se obtienen valores menores de C_p y a menores valores de λ .

Por otro lado se observa que, para valores de pitch bajos, tanto las curvas experimentales como las numéricas presentan un sostenimiento de la potencia obtenida más allá de los máximos de C_p . Cabe destacar respecto de este último punto que cuando las curvas C_p vs λ numéricas fueron obtenidas empleando datos de $C_L(\alpha)$ y $C_D(\alpha)$ de la bibliografía (a Re mucho más altos que los encontrados en el generador) la curva de C_p presentaba una caída más brusca más allá del máximo [7].

De hecho la diferencia de comportamiento de las curvas aerodinámicas para ángulos de ataque altos según se consideren distintos Re (ver Figura 7) es la responsable de la mencionada diferencia de las curvas numéricas C_p vs λ especialmente a valores elevados de λ cuando el perfil entra en pérdida [9].

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



De ahí la importancia que representa la posibilidad de disponer de valores experimentales de las curvas de $C_L(\alpha)$ y $C_D(\alpha)$ para los Re y los α estudiados.

Resta aún comprender la causa por la cual se obtienen mayores valores de potencia en el generador que en los resultados numéricos. Una posible explicación del fenómeno estaría vinculada con el tamaño de la sección de prueba del túnel de viento respecto del diámetro del generador y el hecho de que el túnel es un túnel cerrado. Futuros trabajos que consideren el estudio del generador en túneles de viento, ya sea abiertos o bien de sección más grande, se presentan de utilidad para avanzar sobre esta hipótesis. De todas formas la reproducción de las curvas C_P vs λ tanto experimental como numéricamente y el correlato encontrado entre sus comportamientos son de gran utilidad a la hora de establecer criterios de diseño de generadores eólicos.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un trabajo que tiene como objetivo el diseño, construcción y validación de un equipo para ensayar rotores eólicos en pequeña escala. Se ha descrito todo el trabajo de instrumentación del generador y de la balanza aerodinámica. Se han presentado resultados preliminares comparando las curvas de potencia obtenidas con el modelo y las obtenidas con el código numérico desarrollado en el marco del presente trabajo y basado en la teoría BEM, el cual a su vez incorpora como datos de entrada curvas aerodinámicas obtenidas experimentalmente.

Se ha logrado construir un equipo robusto y versátil que permite estudiar generadores eólicos en escala empleando distintos tipos de aspas y un paso variable. Los primeros resultados (obtenidos para aspas que consisten en secciones del perfil alar NACA 0012 sin alabeo y con cuerda constante) muestran una buena correspondencia del comportamiento de las curvas C_P vs λ respecto del parámetro θ . Sin embargo las desviaciones entre los resultados experimentales y los numéricos aún son elevadas. Se espera poder ensayar el generador en un túnel de viento de mayor sección a fin de estudiar la influencia de los efectos de borde del túnel sobre dichas desviaciones. A su vez, si bien se ha verificado la importancia de poder relevar las curvas características de los perfiles alares en el rango de Re y de ángulos de ataque que son de interés, aún resta discriminar de la medida de arrastre del perfil el arrastre producido por la estructura de soporte de la balanza.

5. REFERENCIAS

- [1] Burton T. (2001). Wind Energy Handbook. Wiley.
- [2] Manwell J. F., McGowan J. G. and Rogers A. L. (2002) Wind energy explained: Theory, design and application. Wiley, Chichester, UK.
- [3] Bolton W. (2007) Mecatrónica. Alfaomega, 2da Edición
- [4] Glauert H. (1926) A general theory of the autogyro. British ARC, 1111.
- [5] Glauert H. (1935) Airplane propellers. Aerodynamic theory, 4:169–360.
- [6] C. Field and D.M. Beams. Introduction to strain gages. 2005.
- [7] Schupbach D., Gagliano F., Otero A. D. and Sosa R. (2011) Construcción y validación de un equipo para ensayo de rotores eólicos en pequeña escala. XXXIV Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, 04 al 07 de Octubre, Rio Hondo, Santiago del Estero, Argentina.
- [8] Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C. (1981) Aerodynamic Characteristics of Seven Airfoil Sections Through 180 Degrees Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines, SAND80-2114, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- [9] Viterna L. A. and Janetzke D. C. (1982) Theoretical and Experimental Power from Large Horizontal-Axis Wind Turbines. NASA TM-82944

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Evaluación del Comportamiento Termo-Energético de una Vivienda Social en la ciudad de Corrientes a través de Monitoreo Experimental y Programas Simuladores.

Gallipoliti, Virginia¹; Sogari, Noemí¹; Gea, Marcelo²; Busso, Arturo¹

¹ G.E.R – Grupo en Energías Renovables – FaCENA – U.N.N.E.
Campus Libertad – Av. Libertad 5460 – 3400 Corrientes- Argentina
Tel: +54 3783 473931 int. 129 / Fax: +54 3783 473930/ e.mail: angelinaq2@arnet.com.ar

² Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO - CONICET)
Universidad Nacional de Salta – Salta - Argentina marcelogea@gmail.com

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es describir el comportamiento térmico-energético de dos habitaciones superiores de una vivienda social unifamiliar de operatoria estatal en la ciudad de Corrientes, Argentina. La idea central apunta a focalizar la investigación sobre un área crítica del diseño desde la óptica de la vivienda social en pos de minimizar costos de mantenimiento e inversión para garantizar adecuadas condiciones de habitabilidad. La ciudad Corrientes está localizada en una región muy cálida del país, donde los valores de temperatura efectiva corregida media, en el día típicamente cálido, son superiores a 26,3°C; durante la época caliente todos los sectores presentan valores de temperatura máxima superiores a 34°C y valores medios superiores a 26°C, con amplitudes térmicas menores de 14°C. El período invernal es poco significativo con temperaturas medias durante el mes más frío superior a los 12°C.

Se midieron temperaturas medias y se simularon con los programas TRANSYS y SIMEDIF la variación de la temperatura en cada una de las habitaciones. Se analizaron los resultados del monitoreo térmico realizado durante distintas estaciones del año, y se realiza la simulación térmica en condiciones reales de uso, con un ajuste entre datos medidos y simulados satisfactorio. Finalmente se simula con ambos programas, para el período del mes de Marzo, el comportamiento térmico de una de las habitaciones con *una envolvente mejorada térmicamente*, y *protección solar* en las primeras horas del día en puerta ventana al Este, lo que lograría disminuir en 3°C la temperatura media interior de la habitación, y subsiguiente ahorro de energía en refrigeración. El trabajo plantea el mejoramiento, fundamentalmente desde el punto vista ambiental (reducción de las emisiones de CO₂), como así también la adquisición hábitos ahorro energético al incorporar en las rutinas diarias, las acciones de protección del ingreso solar en los meses de verano.

Palabras claves: Confort térmico- Simulación- Vivienda – Auditoria.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



1. INTRODUCCION

Gran parte de la energía que se utiliza actualmente en Argentina es para el rubro de la construcción edilicia. Las decisiones del proyectista tienen gran impacto sobre el contexto energético-ambiental, así como también en la vida útil de los edificios. Para una acertada toma de decisiones, se debe tener a disposición no sólo alternativas tecnológicas válidas, sino información adecuada y objetiva sobre las mismas, e instrumentos que permitan evaluarlas de forma integral.

En las viviendas sociales construidas en las provincias de Corrientes y Chaco, la adecuación climática es un factor que se introduce generalmente en instancias posteriores al diseño (por parte del usuario), para paliar así las falencias de proyecto y construcción, teniendo que recurrir a la implementación de equipos electromecánicos de acondicionamiento ambiental. Esto genera un alto y continuo consumo energético para climatización interior con el fin de alcanzar las condiciones necesarias de habitabilidad en los mismos (Di Bernardo, Jacobo y Alías, 2008). La política de vivienda prioriza la construcción de obra nueva que al establecimiento de planes para el mejoramiento de conjuntos habitacionales existentes. Si bien es indudable el aporte que significa para la población la construcción de nuevos conjuntos habitacionales, la observación y análisis del estado físico actual de los edificios muestran problemas no resueltos en su origen o generados a posteriori que deben ser objeto de estudios especiales (Hreňuk, N.2006)

Por otro lado las normativas existentes, en particular las Normas IRAM, si bien han sido actualizadas, no son de aplicación obligatoria en estos aspectos y las prácticas parecieran apuntadas a resolver sólo la reducción del costo inicial de las viviendas de producción estatal. Queda para los usuarios resolver las deficiencias, las patologías debidas al tipo de ocupación, la reposición y mantenimiento y los altos costos operativos con sus recursos. En el ámbito local de dos de las ciudades cabecera del NEA (Corrientes y Resistencia) se han llevado a cabo estudios de desempeños higrotérmicos y energéticos en viviendas sociales (Sogari et al, 2006; Boutet et al, 2007; Di Bernardo, Jacobo y Alías, 2008) y se ha generado un cúmulo de experiencias que constituyen antecedentes directos del presente trabajo. (Alías –Jacobo 2009).

El objetivo principal de este trabajo fue describir el comportamiento térmico-energético de dos habitaciones superiores de una vivienda social unifamiliar de la ciudad de Corrientes, una de ellas construida por el dueño como ampliación de su vivienda. Para ello se realizará un monitoreo experimental durante un período de tiempo específico del mes de Marzo de 2010 y otro período del mes de Agosto del mismo año. Luego se realizará la simulación dinámica con los programas informáticos TRNSYS (Solar Energy Laboratory, 2004) y SIMEDIF (Flores Larsen, Lesino, G, Saravia L, 1999, INENCO – UNSA- CONICET) y se comparan resultados y ajustes. A partir de aquí, y verificando los niveles de desconfort, se vuelve a simular la habitación que presenta más desconfort térmico pero con mejoras realizadas por su propio dueño como aumento de la resistencia térmica de una pared al Sur y protección solar en puerta ventana de orientación Este.

Las ciudades de Resistencia y Corrientes están localizadas en la zona bioambiental Ib (IRAM 11603, 1996): *muy cálida*, donde los valores de temperatura efectiva corregida media, en el día típicamente cálido, son superiores a 26,3°C; durante la época caliente todos los sectores presentan valores de temperatura máxima superiores a 34°C y valores medios superiores a 26°C, con amplitudes térmicas menores de 14°C. El período invernal es poco significativo con temperaturas medias durante el mes más frío superior a los 12°C.

1.1 La vivienda analizada

Constituye una tipología común de las viviendas de conjuntos habitacionales urbanos de la región. Corresponde a un barrio de viviendas entre medianeras, de tipología dúplex, en un terreno de 6,00 m. de frente por 15,00 m. de fondo, y con 98,6 m² de superficie útil cubierta total. Ubicada como conjunto

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



de viviendas en el sector Noroeste de la ciudad capital de Corrientes, en la zona Bioambiental: la (cálida húmeda) de Latitud Sur: 27°54', ASNM: 64 m; Temperatura Base: 18°C, Grados días: 56 – 262; Nombre del barrio: Dr. José Nicolini. Su frente tiene orientación: al Norte. Ocupantes: 3 personas. El sistema de cerramientos se resuelve mediante ladrillos cerámicos huecos de 18x18x25cm., revocados exterior e interiormente. La cubierta es de chapa galvanizada. El cielorraso de planta alta es independiente, de placas tipo aglomerado, con aislación térmica de lana de vidrio, (k aproximado a 1 W/m² °K), y el de planta baja es aplicado bajo losa. El entrepiso se materializa con losa alivianada de viguetas pretensadas. Las ventanas son de marco metálico con vidrio simple. Las aberturas interiores son puertas placa y las exteriores con celosías metálicas.

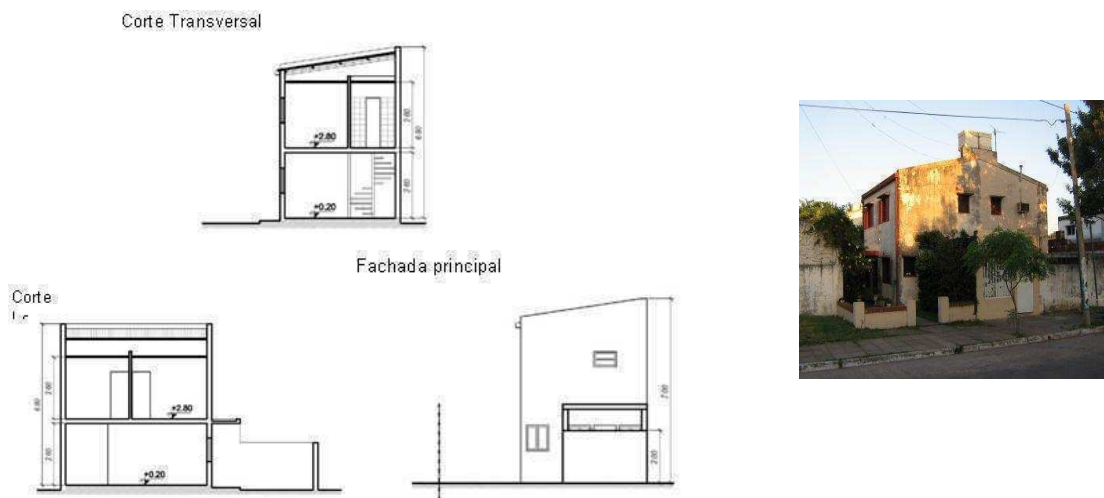


Figura N° 1: La vivienda analizada. Fachada principal y cortes

La vivienda en estudio cuenta en su planta baja con pequeño Porch de ingreso (4,59 m²), un Living comedor (13,50 m²), una Sala Multiuso (7,6 m²), donde se encuentra la escalera de acceso a la segunda planta. La cocina (9,67 m²), un baño social y lavadero (6,50 m²). Un patio trasero y otro adelante de ingreso a la vivienda. En la planta alta se ubican los tres dormitorios: Dormitorio 1 (8,12 m²), dormitorio 2 (8,12 m²) y Dormitorio 3 (8,7 m²) y un baño. El dormitorio 3 es el que se orienta hacia el Sur y sobre el cual se realizarán las observaciones. El techo es a dos aguas de chapa galvanizada con una pendiente del 14 %. La altura media de los locales: 2,6 m.

1.1.2 Monitoreo experimental

Se presentan los datos experimentales obtenidos durante el monitoreo con sensores testigos del comportamiento térmico de la vivienda con instrumentales del GER Grupo de Energías Renovables del Área de Física Aplicada de la Facultad de Ciencias Exactas (FaCENA) de la Universidad Nacional del Nordeste. Se utilizaron 2 termocuplas tipo “K”, previamente calibradas en el rango de temperaturas de trabajo. Se ubicaron colgados del centro aproximado del cielorraso de cada dormitorio. Se conectaron a un módulo de adquisición de datos: Data Logger (Registrador Virtual NOVUS FIELD LOGGER) de 8 canales analógicos, alimentado con 220 voltios, conversor y software de adquisición de Datos. Previamente a la instalación en la vivienda del adquisidor de datos, se lo configuró

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

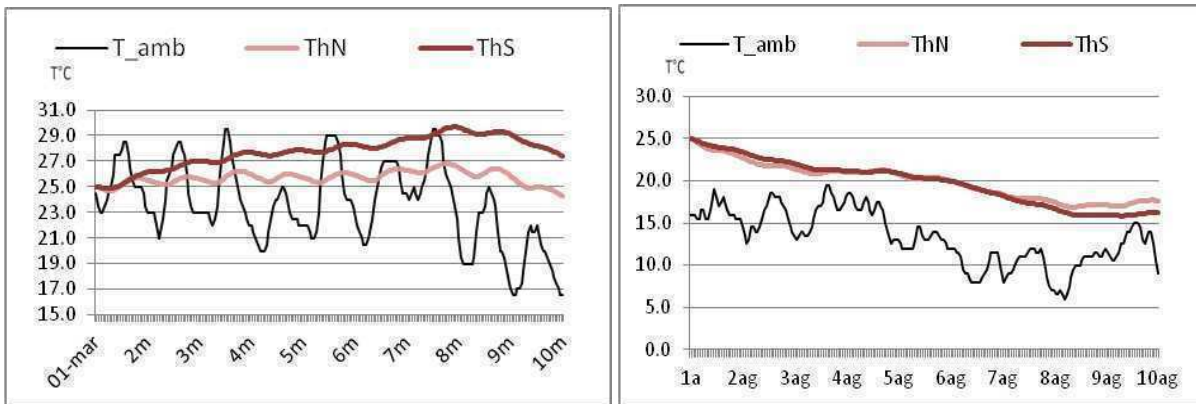


Figura 2: Evolución de temperatura interior en las habitaciones norte y sur de la vivienda, para el período 01/03 al 10/03/2011 y 01/08 al 10/08/2011. Referencias: T_amb: temperatura ambiente. ThN: temperatura habitación al Norte. ThS: temperatura habitación Sur

mediante el software “Field Chart”, que acompaña el equipo y corre sobre las plataformas Windows95 y/o superiores. Los registros climáticos muestran, para el periodo de marzo, temperaturas exteriores entre 20 °C y 35 °C representativas de días de verano en la ciudad de Corrientes, así como datos de Irradiación solar global máximos de 900 W/m² en horas del mediodía. Para Agosto, el período de registro presentó temperaturas típicas invernales para esta zona entre 7 °C y 23 °C. La Figura N° 5 presenta la evolución de las temperaturas medias de los dos dormitorios de planta alta analizados desde el día 1 de Marzo al 10. En la misma se observa un desfase de 3 hs. aproximadamente en la ocurrencia del máximo de temperatura y una baja amplitud térmica entre el día y la noche. Se aprecia también que, el dormitorio orientado hacia el Norte, presentan mejor comportamiento térmico respecto al que da al Sur.

Del registro de las temperaturas medias interiores de estos dos dormitorios se observa que durante el período considerado en el mes de marzo ambos tienen un comportamiento térmico acorde a los rangos de confort definidos por autores locales (rango de bienestar psicofísico, franja de temperaturas dentro de la cual no se hace imperativo el uso de climatización artificial en Resistencia y Corrientes definido entre los 18°C y los 29°C). Salvo el dormitorio Sur que presenta valores de desconfort los días 8 y 9, el resto de los días analizados ambos dormitorios mantienen una diferencia de temperatura entre ellos de 2°C y 3°C. Para el periodo de invierno las temperaturas medias interiores de los dormitorios se mantienen casi iguales (poca amplitud térmica), registrando valores de desconfort térmico a partir del día 7 de Agosto, ocasión que se registran temperaturas entre 15°C y 16 °C.

1.1.3 Simulación térmica

SIMEDIF permite estudiar el comportamiento térmico de edificios ya construidos (calcular la temperatura horaria en el interior de los locales de un edificio) y ajustar los datos medidos, de forma de conocer su comportamiento bajo diferentes condiciones climáticas o de orientación, detectar problemas de confort y estudiar la eficiencia de posibles alternativas de rediseño. Este programa

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



admite hasta 50 zonas térmicas, además admite el ingreso hora a hora de las ganancias internas (disipación metabólica, calefacción extra, cocción de alimentos, etc.). Puede descargarse libremente de Internet. Tanto la versión actual como la anterior, fueron utilizadas por numerosos grupos de investigación para la simulación de datos medidos con muy buenos resultados (Caso et al, 1986; Reyes y Evans, 1993; Esteves et al., 1994; Beascoechea y Filippin, 1998; Hernandez y Lesino, 2000; Filippin, 2000; Flores Larsen, Filippin y Lesino, 2001; Flores Larsen, Filippin y Lesino, 2004a y 2004b, Sogari 2006).

Por otro lado, el programa *TRNSYS*, comercializado desde 1975, (Klein et al 1976) es un programa originalmente desarrollado para el estudio de sistemas con energía solar, se diseñó para simular el funcionamiento transitorio de los sistemas térmicos de energía. Es un software que involucra ecuaciones algebraicas y diferenciales e incorpora una librería con los más usuales sistemas térmicos energéticos y diseñados especialmente para simulaciones transitorias. *TRNSYS* permite que el usuario describa y supervise totalmente todas las interacciones entre los componentes del sistema. Posee entornos gráficos *IISiBat* y *PRESIM*, las novedades en el módulo *PREBID* para la descripción de edificios y los importantes avances en las interfaces no gráficas *TRNSEED*. El entorno *TRNSHELL* permite la edición de ficheros e incorpora en un solo clic las acciones necesarias para construir, ejecutar y analizar una simulación *TRNSYS*.

Se tuvieron en cuenta, las condiciones de vínculo reales de la vivienda analizada con las viviendas contiguas. Las condiciones de ocupación reales de la vivienda monitoreada fueron cargadas en ambos programas de simulación, con el fin de obtener una base homogénea de comparación: una familia de 3 miembros, con un patrón de comportamiento (grado de permanencia en las distintas zonas en cada hora del día y tipo de vestimenta y de actividad) que fue consultado al dueño. Las condiciones mínimas de confort se fijaron según rangos usuales para la región y según consideración de datos de temperaturas de diseño medias definidas en la norma *IRAM 11603/96* para Corrientes: entre 18°C (mínima para el confort invernal), con 70% HR, y 29°C (máxima para el confort estival), con 60% HR (Alías et al, 2009). La simulación con el programa *TRNSYS* es utilizado para estudiar el funcionamiento de sistemas solares tendientes a calentar agua, calefaccionar edificios, etc. En nuestro caso se usaron los *TYPE 16* (procesador de Radiación), *33* (parámetros psicométricos), *19* (Room), *28* (ático- techo), *25* y *65*.

Por otro lado como se contaba con datos medidos de temperatura exterior se hizo el promedio hora a hora y se ingresan estos datos al programa. Para la vivienda estudiada, las propiedades físicas de los materiales utilizados se obtuvieron a partir de tablas. Se utilizaron coeficientes convectivos interiores de 6 y 8 W/m² °C (para superficies no asoleadas y asoleadas, respectivamente) y coeficientes convectivos exteriores de 17 W/m² °C, valor obtenido a partir de la expresión (Duffie y Beckman, 1991): $h = 5.7 + 3.8 v$ En donde h es el coeficiente convectivo en W/m² °C y v es la velocidad media de viento en m/s, que para el periodo en estudio fue del orden de 3 m/s (verano). En las gráficas superiores (Figura N° 3) se muestra la simulación con *Simedif* junto con los datos medidos.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012

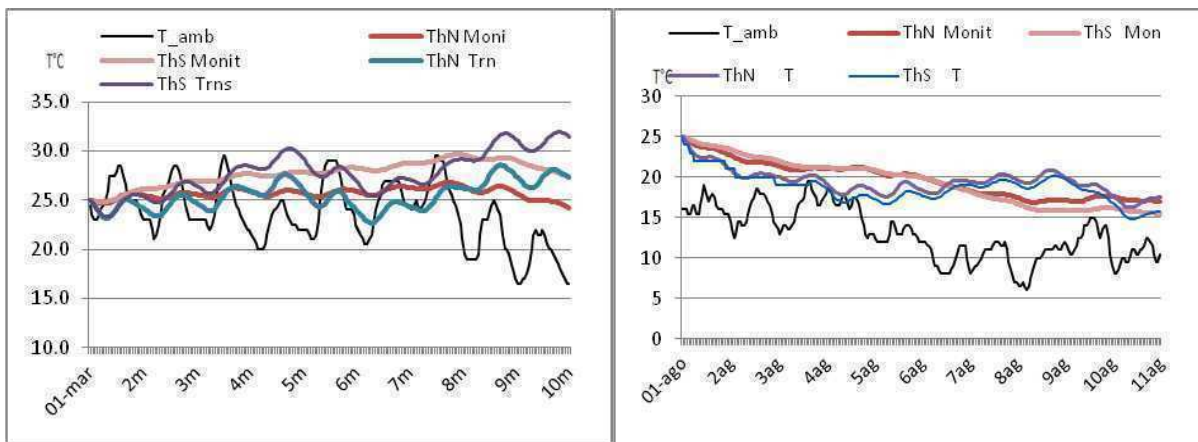


Figura N°4: Resultados de la simulación térmica con Trnsys y comparación con el monitoreo para el periodo 01/03 al 10/03/2011. Temperaturas medias Dorm al Sur: 27 °C al Norte: 25 °C. Para el periodo 01/08 al 10/08/2011, temperaturas medias Dorm al Sur: 19 °C al Norte: 19 °C

Las graficas de la Figura N° 4 muestran la evolución de las temperaturas horarias de las habitaciones (Norte y Sur) de la planta alta de la vivienda para el periodo de 10 días del mes de Marzo, monitoreadas y simuladas con el programa Trnsys. Presentan un rango de variación entre 25 C y 30 C a lo largo del periodo. El dormitorio Sur presenta una temperatura media superior (27 °C) al dormitorio Norte (25 °C) Para el periodo del mes de agosto, las simulaciones con Trnsys muestran valores de temperaturas interiores entre 18 C y 25 C con poca amplitud térmica a lo largo de cada día. Se observa poca variación entre ellas y presentan temperaturas de desconfort el día 10 de Agosto. Se adoptaron valores de renovaciones de aire 1 renov/hora para Marzo y 3 para el mes de Agosto.

La simulación con Simedif arroja un comportamiento general de las temperaturas internas dentro de los rangos brindados por el monitoreo experimental y la simulación con Trnsys, para el periodo del mes de Marzo, valores entre 25° y 31° C aunque con una variación horaria más acentuada, pudiendo causar esto las ganancias internas debido a equipos de luces y cocina. Para el período invernal se reducen las amplitudes térmicas que se registraban en verano y las temperaturas internas medias presentan poca diferencia entre ellas (entre 1° a 3°C) presentando temperaturas fuera del rango de confort el dormitorio al Norte para los días 7 y 8 de Agosto en las primeras horas de la mañana.

2. Mejoras tecnológicas en la vivienda

Una vez obtenido el modelo de la vivienda y validado mediante el ajuste de la simulación con los datos experimentales, es posible realizar cambios tecnológicos y morfológicos en la misma, para analizar de forma confiable el impacto en la temperatura interior de diferentes alternativas de diseño (Filipin; Flores Larsen, 2005). El siguiente paso consistió en mejorar la envolvente del dormitorio orientado al Sur mediante aislación térmica en la pared con esa orientación: panel de machimbre de espesor

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica III CAIM 2012



nominal de 0,20m, con una transmitancia térmica de 0,47 W/m²°C. El bastidor está recubierto en ambas caras por tablas de madera machimbrada de 1/2" de espesor, y en los interespacios entre parantes y horizontales del bastidor, se plantea un relleno de material aislante. Según IRAM 11605/96 esta solución se sitúa en un nivel A de construcción para verano, y en un nivel B para invierno. La segunda propuesta conjunta consistió en la colocación de una protección solar en horas de la mañana en puerta ventana al este del dormitorio Sur, por medio de un alero vertical móvil. Se simuló la vivienda con las mejoras detalladas anteriormente y bajo las mismas condiciones climáticas (Marzo).

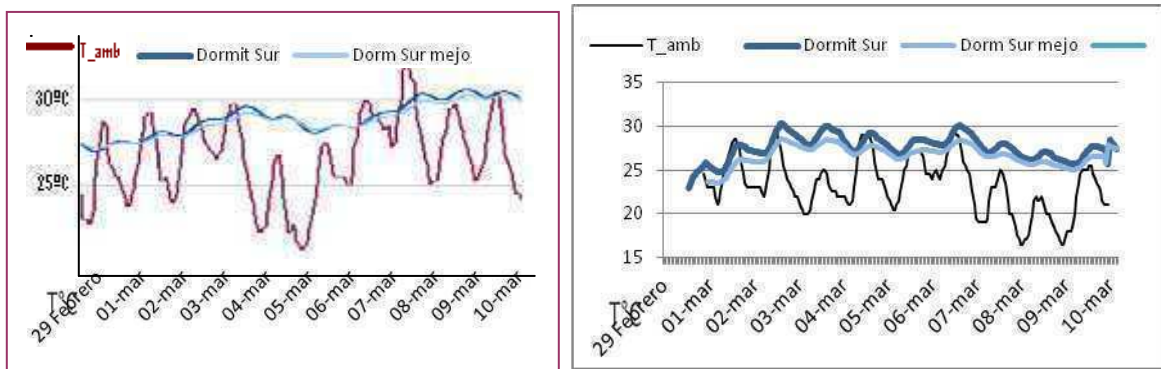


Figura 5: Graficas de simulación con Trnsys y Simedif del dormitorio Sur con mejoras para el período de Marzo

La Figura 5 muestra que, además de haber bajado la temperatura media de la vivienda, se disminuyó la amplitud térmica diaria (diferencia entre temperatura máxima y mínima), efecto que incide en una mejora del confort térmico en el ambiente interior. Por cuestiones de espacio las referencias que corresponden a las graficas en Simedif, se corresponden para las de Trnsys en lo que respecta a los colores.

3. CONCLUSIONES

Las medidas llevadas a cabo por el dueño consistieron en la colocación de una protección solar en horas de la mañana en la puerta ventana al este del dormitorio Sur, fue resuelto por medio de un alero vertical móvil de material liviano aislante, (retráctil de lona). Los parasoles macizos (de estructura de hormigón, por ejemplo) no son aconsejables. Ellos irradian al interior el calor acumulado, en las horas en que la ventilación beneficia a los locales. La eficacia de los parasoles, fijos o móviles, depende además de la fluidez con que circulen las brisas entre ellos y la superficie que protegen; por lo tanto se dejó un hueco de aire ventilado para no crear una cámara de aire caliente junto al vidrio. Para nuestro clima (cálido-húmedo), con altas temperaturas en verano, es necesario aumentar la resistencia térmica de los cerramientos. Esta medida es recomendable tanto desde el punto de vista del aislamiento térmico como de las condensaciones. El panel de madera posee, comparativamente con la de los otros materiales (ladrillos cerámicos huecos y comunes), valores mucho más bajos de transmitancia térmica, lo que lo hace más aislante y más eficiente desde el punto de vista del consumo energético para acondicionamiento interior de los ambientes. Se detecta que el panel de madera con un espesor de 20 cm en soluciones de muro tipo sándwich, presenta comparativamente con la pared doble de 40 cm una reducción del 40 % en los valores de transmitancia térmica y de un 57 % con respecto a la pared doble de 30 cm.

Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

III CAIM 2012



Se obtuvieron buenos resultados en el uso de estos simuladores, cada uno requiere una especial atención al momento de introducir los datos de la vivienda. Si bien las mejoras implementadas para el confort térmico fueron aportadas por un usuario sin experiencia, las mismas colaboraron a producir una disminución en la temperatura del dormitorio Sur de 31°C a 28°C para el verano, logrando ubicarse dentro del rango de confort. Estos programas pueden constituirse en herramientas de apoyo a decisiones de diseño mejorado para emprendimientos habitacionales sociales ya que permitió, como en este caso, realizar mejoras en la vivienda para el confort en una de las habitaciones, y, aunque conlleva un costo la materialización, puede ser amortizado con el ahorro de energía necesaria para climatizar, especialmente en los meses de verano. El trabajo plantea el mejoramiento, fundamentalmente desde el punto de vista ambiental (reducción de las emisiones de CO₂), como así también la adquisición hábitos ahorro energético al incorporar en las rutinas diarias, las acciones de protección del ingreso solar en los meses de verano.

4. REFERENCIAS

- [1] Di Bernardo, A.; Jacobo, G. J; Alías, H. M. (2008). Desempeño térmico–energético de viviendas sociales del NEA. Simulaciones con la herramienta informática “Ecotect”. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 12. ISSN 0329-5184. Argentina. Pp. 08.17 - 08.24
- [2] Hreňuk, Noelia I y Jacobo, G. (2006) Estudio de las patologías constructivas en equipamientos habitacionales de interés social en la región NEA: efectos en relación con el usuario, las condiciones de habitabilidad y su conservación
- [3] Boutet, M. L. et al (2007) Verificación del comportamiento térmico de un prototipo de vivienda familiar de madera mediante “ecotect” y “quick ii” Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329 5184
- [4] Sogari, N. et al (2006) Análisis del Comportamiento Térmico de un Prototipo de Vivienda Familiar de Madera. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 10. ISSN 0329-5184. Argentina.
- [5] Alías, H. M. y Jacobo, G. J. (2009). Evaluación de desempeño termo - energético de viviendas económicas del Nordeste argentino mediante simulaciones con “ECOTECT”. Retroalimentación de proyectos. Anales del 1º Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído (SBQP). ISSN 2176 – 4549. Universidad de São Paulo. São Carlos, SP – Brasil.
- [6] TRNSYS (Solar Energy Laboratory, 2004) y SIMEDIF (Flores Larsen, Lesino, G, Saravia L, 1999, INENCO – UNSa-CONICET)
- [7] Filippín C. Flores Larsen S. (2005) Comportamiento Térmico de invierno de una vivienda convencional en condiciones reales de uso. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 9, 2005. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- [8] Esteves A., Fernández J., Basso M., Mitchel J. y de Rosa C. (1994). Simulación térmica de edificios: aplicación de los modelos QUICK y SIMEDIF. Actas 17º Reunión de ASADES, Rosario, Argentina.
- [9] Hernández, A. y Lesino, G. (2000). Simulación mediante SIMEDIF del Comportamiento Térmico de un Prototipo de Vivienda Liviana construido en la Universidad Nacional de Salta. AVERMA N° 1. XXIII Congreso de ASADES. Rcia.
- [10] Filippín, C. et al (2001). Comportamiento higrotérmico y energético de la escuela Bioclimática de Catriló en la Provincia de La Pampa. AVERMA N° 5. XXIV Congreso de ASADES. Mendoza, Argentina.

- [11] Flores Larsen S. y Lesino G. (2001). Modelo térmico del programa SIMEDIF de simulación de edificios. Revista ERMA *Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 9, pp.15-24, ISSN 0328- 932X.
- [12] S. Flores Larsen, C. Filippín y G. Lesino. (2004) Monitoreo y simulación térmica de temperaturas superficiales de paredes Revista AVERMA . Volumen 8, Nº 1XXIV Congreso de ASADES. Mendoza, Argentina.
- [13] Beascoechea y Filippin, 1998; Un edificio solar pasivo para la Universidad Nacional de La Plata. *Avances en energías Renovables y Medio ambiente* 2, 1 pp. 03.17-03.20