



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

APLICACIÓN DE SIMULACIÓN DE FALLOS PARA MEJORAR EL DISEÑO DE MAQUINAS Y PLANTEAR UN MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Carrizo, Blanca Rosa ⁽¹⁻²⁻³⁾, **Abet, Jorge Eduardo** ^{(1-2) (*)}, **González, Gustavo J.** ⁽¹⁻⁴⁾

¹ Dpto. Ing. Mecánica, Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba.
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria,
CP (X5016ZAA) – Córdoba – Argentina.

bcarrizo@tecnicatura.frc.utn.edu.ar

² Dpto. Ing. Industrial, Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

³ Dpto. Ing. Sist.. Información, Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Córdoba

⁴ Dpto. Sist. Electromecánicos, Centro de Invest. Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico.

RESUMEN

La planificación de un cronograma de mantenimiento preventivo sobre una máquina que aún no está en funcionamiento ó está en fase de diseño, es un proceso que depende de la habilidad y experiencia del personal a cargo para predecir las condiciones de funcionamiento de la máquina. Para realizar tal tarea se debe disponer de datos históricos de máquinas análogas operando en condiciones similares a las esperadas, o bien con la ayuda de computadoras se puede realizar un proceso de simulación estadística sobre los fallos de los componentes críticos sobre los cuales se desea actuar con el programa de mantenimiento preventivo.

El mantenimiento preventivo es un programa de acciones planeadas de mantenimiento que apuntan a la prevención de fallas y paradas de los equipos. El objetivo primario del mantenimiento preventivo es evitar la falla de la máquina antes de que ésta realmente ocurra. Está diseñado para preservar y mejorar la fiabilidad de la maquinaria por medio del reemplazo de componentes gastados antes de que fallen. Las actividades del mantenimiento preventivo incluyen el chequeo de las máquinas, revisión parcial o completa a períodos especificados, cambios de aceite, lubricación, etc. Además, los operarios pueden registrar el deterioro del equipo para saber si reemplazar o reparar los componentes desgastados antes de que causen una falla del sistema. Los últimos avances tecnológicos en dispositivos para la inspección y diagnóstico han permitido un mantenimiento de los equipos más exacto y efectivo; el programa de mantenimiento preventivo ideal debería evitar toda falla de la máquina antes de que esta ocurra.

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un estudio estadístico a través de la simulación de fallas con computadora de los rodamientos de un compresor en fase de diseño desarrollado para el proyecto final del este alumno, suponiendo que éstos serán la principal causa de falla de la máquina. El modelo estadístico de fallas de los rodamientos responde a una distribución de Weibull, de la cual se dispone de sus tres parámetros gracias a los estudios realizados por los fabricantes.

La obtención de los datos aleatorios de fallas y el posterior análisis estadístico se realizará con la ayuda del software de cálculo MATLAB. Finalmente, se estudiará el efecto del mantenimiento preventivo de los rodamientos cada un período específico de tiempo, con el objetivo de tener una idea cualitativa de cómo favorece dicha acción a la fiabilidad del sistema completo. De ninguna manera el plan aquí tratado será juzgado como el correcto y el mejor, simplemente será un ejemplo de aplicación de las técnicas estadísticas para desarrollar un programa de mantenimiento preventivo.

Palabras Claves: *Fiabilidad, Mantenimiento, Análisis de Fallos, Simulación Weibull con MATLAB.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se realiza sobre los rodamientos de un Compresor de Aire Comprimido de ciclos alternativos y la simulación de fallos se centraron sobre los rodamientos a montar en sobre las bancadas y muñones del cigüeñal (Biela – Manivela) de la máquina. La simulación de fallas se realiza sobre los rodamientos de un compresor durante la fase de diseño y suponiendo que éstos (rodamientos) serán la principal causa de falla de la máquina [4].

El modelo estadístico propuesto responde a una distribución de Weibull, de la cual se dispone de sus tres parámetros gracias a los estudios realizados por los fabricantes de rodamientos.

La obtención de los datos aleatorios de fallas y el posterior análisis estadístico [6] se realizará con la ayuda del software de cálculo MATLAB [1].

Finalmente, se estudiará si el mantenimiento preventivo sobre los rodamientos en cada período específico de tiempo, con el objetivo de tener una idea del comportamiento de la fiabilidad del sistema completo. De ninguna manera el plan aquí tratado será juzgado como el correcto y el mejor, simplemente será un ejemplo de aplicación de las técnicas estadísticas para desarrollar un programa de mantenimiento preventivo.

2. CASO DE ESTUDIO

El presente trabajo analiza los rodamientos de un Compresor de Aire Comprimido de ciclos alternativos y la simulación de fallos, se centraron sobre los rodamientos a montar en sobre las bancadas y muñones del cigüeñal (Biela – Manivela) de la máquina.

A continuación se muestran ilustraciones de los componentes del Compresor:

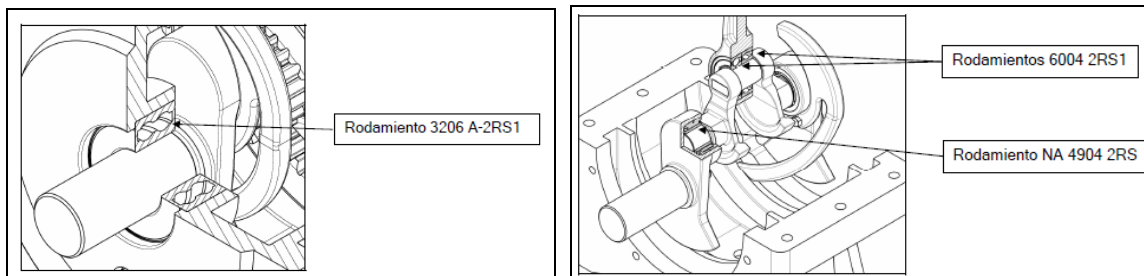


Figura 1. Componentes de un Compresor

2.1. Simulación y Obtención de Datos

Tabla 1. Planteo del Problema

La generación de los datos aleatorios de falla de los rodamientos con MATLAB para una distribución de Weibull se realiza con la función $wblnd(n,b,ij)$ donde:	Variable
n	η
b	β
i	filas de la matriz resultados aleatorios
j	columnas de la matriz rds. aleatorios



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Para rodamientos, si la medida de la vida se expresa dimensionalmente como $x=L/L_{h10}$, entonces: $R = e^{-(x/n)^\beta}$

Los fabricantes de rodamientos encontraron que los parámetros que mejor ajustan la probabilidad de falla a los resultados reales son $\beta=1,483$ y $\eta/L_{h10}=4,439$, donde L_{h10} es la vida en horas esperada para el rodamiento especificado sometido a la carga de funcionamiento calculada.

La variable x es equivalente a t .

Para el presente estudio se simularán estadísticamente treinta (30) fallas para cada rodamiento, los cuales se detallan a continuación.

Tabla 2: Análisis discreto de las cantidades de fallas ocurridas entre los MTTF1-MTTF2, con los parámetros de escala para cada uno de ellos.

Cant.	Designación	Tipo	Capacidad de Carga dinámica	Carga dinámica equivalente	Vida esperada L_{h10}
2	6004 2RS1	Rígido de bolas, estanco	9360 N	2302 N	1400 Hs.
2	NA 4904 2RS	Agujas, estanco	19400 N	3544,3 N	2844 Hs.
2	3206 A-2RS1	Doble hilera de bolas	28100 N	3544,3 N	10382 Hs.

Rodamiento	$\eta=L_{h10} \cdot 4,439$
6004 2RS1	6214,6 Hs.
NA 4904 2RS	12624,5 Hs.
3206 A-2RS1	46085,7 Hs.

Los siguientes tres comandos de MATLAB [1] [2] ejecutados 2 veces cada uno para cada tipo de rodamiento generan la simulación de fallas en horas:

```
>> Dat1A=wblrnd(6214.6,1.483,30,1);
>> Dat1B=wblrnd(6214.6,1.483,30,1);
>> Dat2A=wblrnd(12624.5,1.483,30,1);
>> Dat2B=wblrnd(12624.5,1.483,30,1);
>> Dat3A=wblrnd(46085.7,1.483,30,1);
>> Dat3B=wblrnd(46085.7,1.483,30,1);
```

Así MATLAB genera los seis (6) vectores columna (matrices de 30 x 1) con los tiempos hasta la falla (MTTF) de cada rodamiento que se detallan en la **Tabla 3**.

2.2. Análisis Estadístico

Para darle significado estadístico y obtener la distribución de fallas de los MTTF obtenidos por simulación, éstos deben ordenarse ascendentemente y se les deben asignar las probabilidades acumuladas de falla según la siguiente expresión: $q(i) = (i-0,3)/(N+0,4)$

Donde: i es el orden de cada MTTF y N el tamaño de la muestra (30 en este caso) [3].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 3: Vectores columna generados por MatLab para cada rodamiento.

q(i)	6004 2RS1		NA 4904 2RS		3206 A-2RS1	
	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Rodamiento 1	Rodamiento 2
0.023	451,29	310,18	564,45	5831,97	1386,35	4581,14
0.056	757,62	1421,41	1175,65	5999,74	9289,63	7360,37
0.089	1364,92	2309,61	1458,11	6312,91	10385,25	9772,64
0.122	1551,12	2401,97	2079,68	6424,31	11940,93	10559,16
0.155	1591,92	2595,60	3259,64	6587,15	12223,12	11742,09
0.188	1927,07	3261,70	3901,43	6714,74	13636,58	11906,81
0.220	2074,30	3425,16	4784,15	7475,49	16095,53	12854,07
0.253	2105,92	3602,51	5143,16	7807,93	21533,07	15229,03
0.286	2304,41	3926,01	5541,98	7875,59	26117,64	15405,78
0.319	2788,91	4101,32	5846,87	8257,95	29199,02	20378,55
0.352	2874,18	4127,58	6583,46	8835,61	38117,12	23268,34
0.385	3078,09	4233,52	7266,97	10279,73	38683,89	24635,14
0.418	3146,55	4576,35	7502,65	10758,86	39485,92	25808,20
0.451	3435,42	4708,46	7521,82	10818,29	43036,34	35884,76
0.484	3565,22	5149,45	7899,17	11014,51	45317,78	37961,19
0.516	3766,82	5229,35	8468,36	12257,54	47447,74	38206,59
0.549	4231,36	5513,00	9892,53	12631,71	49763,93	38688,62
0.582	4423,93	5610,17	11053,75	12967,69	53752,69	40200,04
0.615	4537,41	6080,06	11079,88	13974,11	55676,73	40779,53
0.648	4642,90	6613,95	11569,20	17770,30	57382,59	41558,43
0.681	4886,40	7060,08	11642,54	19277,26	58178,81	46922,05
0.714	5391,20	7252,30	12564,54	22633,70	58231,61	54648,28
0.747	6185,80	8122,52	13785,16	23266,09	63352,91	57544,91
0.780	6517,11	8406,06	14175,14	25608,75	65735,49	63321,88
0.813	6526,42	8581,44	15200,02	27226,05	66191,62	66903,34
0.845	6922,45	9888,32	16905,65	28485,60	74631,80	67783,64
0.878	7180,08	12253,04	16954,27	29974,18	74889,03	68522,71
0.911	7432,64	12524,47	17144,70	32761,43	84669,73	71650,58
0.944	7710,84	13007,65	20225,39	32960,22	94586,64	126396,44
0.977	9079,97	16989,05	33220,94	34039,58	100164,74	136823,83

Tabla 4: Muestra los datos de la Tabla 3 ordenados con su probabilidad asociada

6004 2RS1		NA 4904 2RS		3206 A-2RS1	
Rodamiento 1	Rodamiento 2	Rodamiento 1	Rodamiento 2	Rodamiento 1	Rodamiento 2
4886,40	9888,32	11569,20	10818,29	74631,80	7360,37
1364,92	16989,05	14175,14	27226,05	38683,89	54648,28
2074,30	1421,41	3259,64	29974,18	21533,07	67783,64
3565,22	8581,44	33220,94	13974,11	10385,25	11742,09
2105,92	7060,08	5143,16	34039,58	53752,69	57544,91
3435,42	3425,16	1175,65	12257,54	55676,73	25808,20
6517,11	7252,30	564,45	6587,15	12223,12	4581,14
7180,08	5149,45	4784,15	22633,70	58178,81	24635,14
6526,42	12253,04	11079,88	28485,60	16095,53	11906,81
4537,41	310,18	9892,53	7807,93	9289,63	126396,44
2874,18	4101,32	16905,65	7875,59	58231,61	71650,58
6922,45	5610,17	7266,97	32960,22	57382,59	15229,03
1927,07	4708,46	13785,16	32761,43	94586,64	40200,04
4231,36	6613,95	1458,11	17770,30	84669,73	10559,16
6185,80	5513,00	5846,87	8257,95	26117,64	20378,55
3078,09	8122,52	11642,54	25608,75	63352,91	23268,34
4423,93	4127,58	5541,98	12631,71	13636,58	46922,05
5391,20	2595,60	15200,02	7475,49	65735,49	66903,34
3146,55	4576,35	11053,75	5999,74	66191,62	68522,71
3766,82	3602,51	2079,68	6424,31	1386,35	63321,88
2304,41	8406,06	6583,46	23266,09	39485,92	40779,53
757,62	6080,06	16954,27	10758,86	47447,74	12854,07
4642,90	2401,97	3901,43	11014,51	49763,93	35884,76
1551,12	3261,70	7521,82	12967,69	45317,78	15405,78
9079,97	5229,35	20225,39	19277,26	43036,34	37961,19
451,29	4233,52	17144,70	6714,74	29199,02	38206,59
7432,64	2309,61	7899,17	6312,91	74889,03	38688,62
7710,84	12524,47	7502,65	5831,97	100164,74	41558,43
1591,92	3926,01	12564,54	10279,73	38117,12	9772,64
2788,91	13007,65	8468,36	8835,61	11940,93	136823,83



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

A continuación se obtienen las frecuencias de fallas obtenidas agrupadas en intervalos de clase, es decir, se efectúa un análisis discreto de las cantidades de fallas ocurridas entre los **MTTF1-MTTF2** para luego visualizarlas en forma de gráficos de barra que darán una idea de la distribución de fallas generadas por la simulación.

Tabla 5: Rodamientos 6004 2RS1

Intervalos de clase	6004 2RS1	
	Rodamiento1	Rodamiento2
0-1000	2	1
1000-2000	4	1
2000-3000	5	3
3000-4000	5	4
4000-5000	5	5
5000-6000	1	4
6000-7000	4	2
7000-8000	3	2
8000-9000	0	3
9000-10000	1	1
10000-11000	0	0
11000-12000	0	0
12000-13000	0	2
13000-14000	0	1
14000-15000	0	0
15000-16000	0	0
16000-17000	0	1
Total	30	30

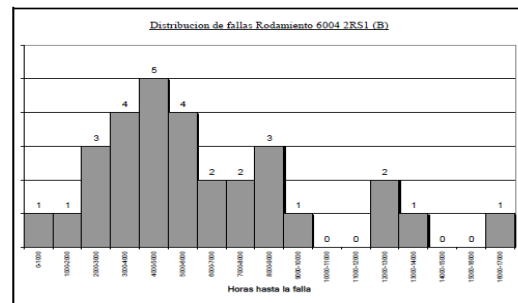
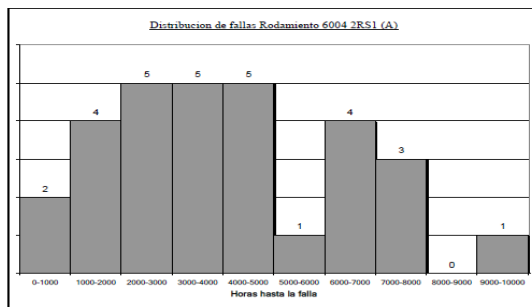


Figura 2. Gráfico con escala log-log obtenido a partir de Tabla 3.

Los datos ordenados de la Tabla 5, pueden además volcarse en un gráfico con escala log-log como se muestra en la siguiente figura generada por MATLAB. Un gráfico similar, llamado papel de Weibull, se utiliza para obtener los parámetros de la función esta distribución de probabilidad. En este trabajo, dichos parámetros se calcularán con las herramientas estadísticas proporcionadas por MATLAB para obtener mayor exactitud. De esta manera los siguientes dos gráficos presentados son meramente ilustrativos y no se generarán para el análisis de los datos de los restantes componentes.

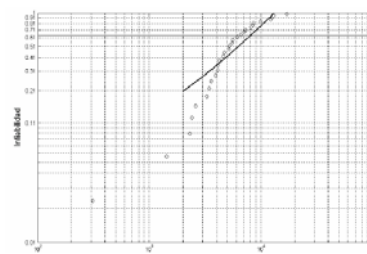
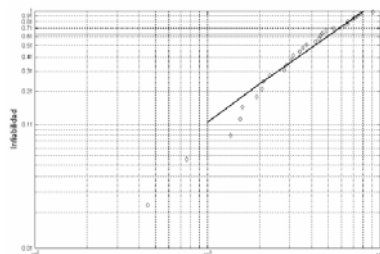


Figura 3. Horas hasta la falla



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

La función **wblfitData**) [1] realiza la regresión lineal para obtener los parámetros de Weibull de la matriz de datos Data generada por la función **wblnd** utilizada durante la simulación, devolviendo como resultado una matriz de orden 1x2 con los parámetros ordenados (η , β).

Tabla 6. Comandos utilizados y los resultados obtenidos:

Rodamiento	Comando MATLAB	Resultado	η	β
6004 2RS1 (A)	>> wblfit(Dat1A)	[4597.4 1.87]	4597,4	1,87
6004 2RS1 (B)	>> wblfit(Dat1B)	[6845.97 1.69]	6845,9	1,69
NA 4904 2RS (A)	>> wblfit(Dat2A)	[10827.11 1.46]	10827,1	1,46
NA 4904 2RS (B)	>> wblfit(Dat2B)	[17638.61 1.79]	17638,6	1,79
3206 A-2RS1 (A)	>> wblfit(Dat3A)	[50389.24 1.68]	50389,2	1,68
3206 A-2RS1 (B)	>> wblfit(Dat3B)	[44911.83 1.36]	44911,8	1,36

Si bien los datos de falla aleatorios fueron generados para una distribución con $\beta=1.483$, el análisis de los resultados obtenidos generaron distintos β particulares para cada caso. Estos serán los utilizados a lo largo del siguiente análisis. Lo mismo aplica para el parámetro de escala η .

Las funciones de MATLAB **wblpdf(t,n,b)** y **wblcdf(t,n,b)** generan matrices cuyos elementos son las ordenadas de la función densidad de probabilidades y de la función de densidad acumulada respectivamente, para los parámetros t (tiempo, definido por una matriz de $1 \times n$), η y β , de la distribución de Weibull. Luego se representan los valores obtenidos en gráficos (t,f), (t,R) y (t, λ).

A continuación se muestra la utilización de dichas funciones en MATLAB para la obtención de los siguientes resultados estadísticos en el rodamiento 6004 2RS1 (A):

- **Función densidad de probabilidad (fdp)**, • **Fiabilidad (R)**, • **Tasa de fallos (λ)**.

Para los demás rodamientos se procederá de igual manera.

Primero se debe generar el vector fila de los tiempos. La siguiente línea genera un vector fila de orden 1x101 con tiempos que van de 0 a 10000 hs a intervalos de 100 hs: **>> t=0:100:10000;**

Luego se genera un vector del mismo orden con las ordenadas de la fdp utilizando la función wblpdf : **>> f=wblpdf(t,4597.4,1.87);**

La fiabilidad **R(t)** es igual a **1-F(t)**, donde **F(t)** es la función densidad acumulada de probabilidades, y se puede obtener con la función **wblcdf** de MATLAB de la siguiente manera:

>> R=1-wblcdf(t,4597.4,1.87);

Y la tasa de fallos $\lambda(t)$, igual a **f(t)/R(t)** se obtiene haciendo: **>> L=f./R;**

Finalmente, se generan los gráficos utilizando el comando plot(x,y), para todos los resultados obtenidos. Las siguientes páginas muestran los gráficos de Distribución de fallas y de fiabilidad obtenidos para cada rodamiento del mismo tipo y lo mismo se puede obtener para todos los rodamientos.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

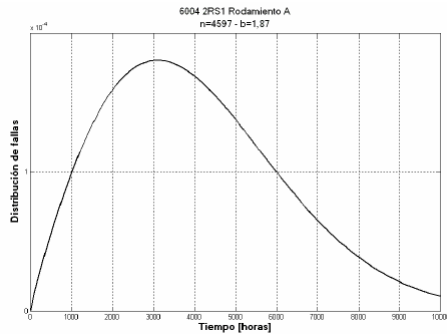


Figura 4. Distribución de Fallos

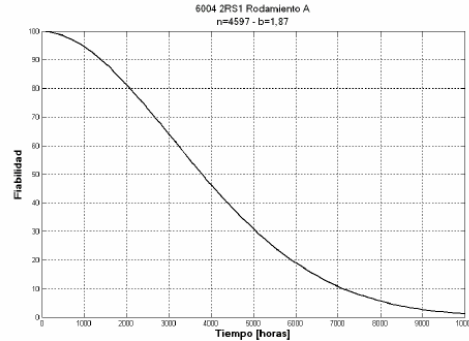


Figura 5: Fiabilidad

Repetimos el mismo análisis de la sección anterior para cada rodamiento y obtenemos la Fiabilidad del Conjunto. Esta fiabilidad total del sistema la obtenemos analizando el compresor como si fuera un conjunto de componentes “en serie”, es decir que la falla de cualquiera de ellos implica la falla del conjunto, el compresor de aire. En tal caso la fiabilidad compuesta se calcula con la siguiente expresión: $R(s) = R_A \cdot R_S \cdot \dots \cdot R_n$

Es decir que, la fiabilidad del sistema $R(s)$ es igual al producto de las fiabilidades de los componentes por separado.

Si se realiza dicho análisis sobre los resultados de fiabilidad obtenidos en las secciones anteriores utilizando MATLAB se obtiene la fiabilidad total del compresor según muestra la curva Fiabilidad.

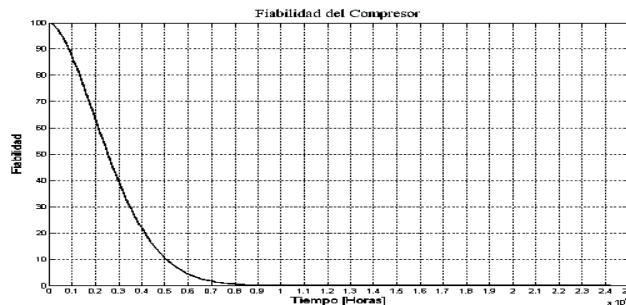


Figura 6. Fiabilidad total del Compresor

En esta curva se puede apreciar cómo influye el corto tiempo hasta la falla de los rodamientos 6004 2RS1 y NA 4904 2RS en el MTTF del compresor, ya que los rodamientos 3206 A-2RS1 tienen un MTTF hasta diez (10) veces mayor. Esto nos permite adelantar que no será conveniente efectuar las tareas de mantenimiento preventivo en los mismos períodos para los diferentes tipos de rodamientos, ya que de esa manera estaríamos reemplazando rodamientos con baja probabilidad de falla o, dicho de otra manera, mucha vida útil por delante.

2.3. Aplicación del Mantenimiento Preventivo

En la introducción a este trabajo se aclaró el significado de mantenimiento preventivo y se fijaron sus objetivos. En la presente sección se analizará un método para calcular y evaluar



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

cuantitativamente el efecto de aplicar mantenimiento preventivo sobre los componentes del sistema. Se llegará a ver como aumenta la fiabilidad del sistema mediante la sustitución periódica de sus componentes, extendiéndose en consecuencia el MTBF (Mean Time Between Failure, Tiempo Medio Entre Fallos) de los mismos, el cual es sólo un parámetro indicativo de su fiabilidad pero que no provee ninguna información sobre el comportamiento de la distribución de fallas del sistema.

Fiabilidad condicional de un componente o sistema

La fiabilidad condicional es la probabilidad de que un componente o sistema complete exitosamente una misión Δt inmediatamente después de haber completado exitosamente una misión T . El tiempo de la misión previa y el tiempo de la misión subsiguiente a cumplir deben ser tenidas en cuenta para los cálculos de la fiabilidad condicional. La función de confiabilidad condicional del componente o sistema está dada por: $R(T, \Delta t) = R(T + \Delta t) / R(T)$

donde: $R(T, \Delta t)$ es la fiabilidad condicional, $R(T + \Delta t)$ es la fiabilidad después de haber funcionado el tiempo $T + \Delta t$, $R(T)$ es la fiabilidad al tiempo T .

En los cálculos de fiabilidad con mantenimiento preventivo se utilizará la función de fiabilidad condicional de la siguiente manera: $R(T + \Delta t) * R(T)$

Para entender mejor lo dicho se desarrollará un ejemplo sencillo. Supongamos que vamos a aplicar mantenimiento preventivo al rodamiento 6004 2RS1 reemplazándolo cada 1400 horas, de esta manera obtendremos la fiabilidad del sistema luego de 2000 horas de funcionamiento, primero aplicando mantenimiento preventivo, y luego sin aplicarlo.

Si se aplica mantenimiento preventivo y el rodamiento se reemplaza luego de 1400 horas de funcionamiento, se tiene: $R(T)_{1400}$ fiabilidad del sistema al momento de reemplazar el rodamiento.

$R(T, \Delta t) = R(600)$ fiabilidad del sistema 600 horas después del reemplazo (2000 horas totales), la cual es la fiabilidad condicional del sistema para funcionar 600 horas luego de haber cumplido exitosamente las 1400 horas anteriores.

$$R(T + \Delta t) = R(600) \cdot R(1400) = 0,985 \cdot 0,9 = 0,866 \quad \text{Fiabilidad del sistema a las 2000 horas.}$$

$$R_{mp} = 88,6 \%$$

Si no se aplica mantenimiento preventivo:

$$R(2000) = 0,81 \quad \text{fiabilidad del rodamiento que no se reemplaza luego de 2000 horas}$$

$$R = 81 \%$$

El ejemplo muestra claramente la utilización de la fórmula de fiabilidad condicional aplicada al mantenimiento preventivo, y además demuestra cómo se obtiene una ganancia importante en la fiabilidad del sistema reemplazando un componente cada un periodo de tiempo determinado. La determinación de ese período es lo más importante de la programación, y se deben tener en



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

cuenta razones técnico económicas. Técnicamente, reemplazar un componente demasiado temprano incurre en el riesgo de descartar un componente con mucha vida útil remanente, y por otro lado, extender el período de mantenimiento preventivo mas allá de lo conveniente incurre en el riesgo lógico de la falla. Económicamente, se debe buscar el período que minimice los costos de aplicar una política de mantenimiento preventivo.

Ahora se determinará una fórmula general para el cálculo de la fiabilidad extendida en el tiempo de un sistema si sus componentes son reemplazados cada período regular de tiempo T_p .

Supongamos que se quiere determinar la probabilidad de que un componente de un sistema este funcionando normalmente luego de un tiempo t , y luego de haber sido reemplazado n veces cada intervalos regulares de tiempo T_p .

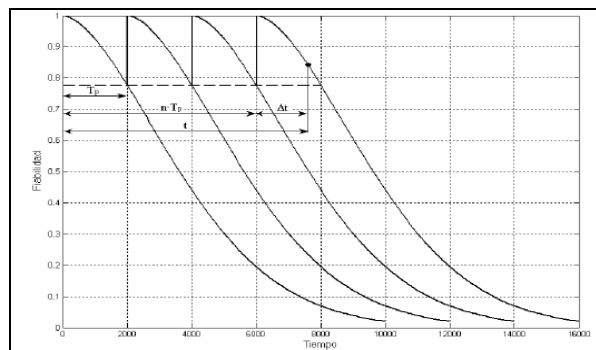


Figura 7. Representación gráfica del tiempo (t), donde el número de reemplazos n es la parte entera de la relación.

$$T = n \cdot T_p + \Delta t \text{ y } N = \text{entero}(t / T_p)$$

Y sólo es posible evaluarla en una función continua del tiempo utilizando un programa de computadora que discrimine la parte entera de la misma.

La probabilidad de que el sistema sobreviva al tiempo $2 \cdot T_p$ sin que el componente haya fallado es:

$$R(2 \cdot T_p) = R(2 \cdot T_p - T_p) \cdot R(T_p) \text{ y } R(2 \cdot T_p) = R(T_p)^2$$

Y la probabilidad de que sobreviva al tiempo $3 \cdot T_p$ es:

$$R(3 \cdot T_p) = R(3 \cdot T_p - 2 \cdot T_p) \cdot R(2 \cdot T_p) = R(T_p) \cdot R(2 \cdot T_p) \text{ y } R(3 \cdot T_p) = R(T_p) \cdot R(T_p)^2 = R(2 \cdot T_p)^3$$

En general, se puede establecer que la probabilidad de que el sistema sobreviva al tiempo $n \cdot T_p$ sin que falle el componente en cuestión es: $R(n \cdot T_p) = R(T_p)^n$

En definitiva y lo que interesa a nuestros fines, la probabilidad de que el sistema sobreviva a un tiempo t luego de haber sido intervenido n veces cada intervalos regulares de tiempo T_p , se obtiene de la siguiente forma: $R(t) = R(\Delta t) \cdot R(n \cdot T_p) = R(t - n \cdot T_p) \cdot R(T_p)^n$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-nT_p}{n}\right)^b} \cdot \left[e^{-\left(\frac{T}{n}\right)^b} \right]^n$$

Debido a que como se dijo n debe ser el entero de la función del tiempo $n = t / T_p$ se utilizará la función **fix(n)** de Matlab para evaluar la función de fiabilidad:

>> Rp=exp(-(((T-fix(T./Tp).*Tp)./n).^b)).*(exp(-(Tp./n).^b)).^fix(T./Tp); donde:

MatLab	T	TP	n	b	exp
Variable	t	tp	n	β	e

De esta forma se tiene un método computacional para evaluar la fiabilidad de un sistema si se le aplica al mismo un programa de mantenimiento preventivo.

Tiempo medio hasta la falla (MTTF: Mean Time To Failure):

El indicador Tiempo Medio Hasta la Falla (MTTF) es la integral en el tiempo de la función de fiabilidad del sistema, es decir: $MTTF = \int R(t) dt$ (Integral entre cero e infinito)

El cálculo del MTTF con Matlab se realiza con las siguientes líneas:

- Con Mantenimiento Preventivo: **>> Rqp=@(T)exp(-(((T-fix(T./Tp).*Tp)./n).^b)).*(exp(-(Tp./n).^b)).^fix(T./Tp); >> MTTFp=quad(Rqp,0,t);**
- Sin Mantenimiento Preventivo: **>> Rq=@(T)1-wblcdf(T,n,b); >> MTTF=quad(Rq,0,t);** donde:

MatLab	Rq	Rqp	MTTF	MTTFp	t
Variable	Fiab. Sin MP	Fiab. Con MP	MTTF sin MP	MTTF con MP	Tpo. Infinito

Donde: quad (F,a,b) es Integración numérica de F entre a y b

Rodam.	6004 2RS1	NA 4904 2R1	3206 A-2RS1
Tp = L_{h10}	1.400 hs	2.800 hs	10.400 hs

Cualitativamente el efecto de aplicar una política de mantenimiento preventivo a cada uno de los rodamientos en estudio. Primero supongamos que vamos a respetar el tiempo de buen funcionamiento calculado según la relación carga – vida de los rodamientos sometidos a la carga dinámica equivalente determinada en la fase de diseño (con una fiabilidad de 90%), y los vamos a reemplazar a cada uno según los intervalos. Estos intervalos de reemplazo nos dan las curvas de color negro en los gráficos de fiabilidad que se muestran en las páginas siguientes, donde las curvas rojas representan las fiabilidades sin intervención de mantenimiento. Se ve claramente que la fiabilidad del sistema, en relación al componente en estudio, aumenta y se extiende de manera ventajosa en el tiempo.

De todos modos, aplicar dichos intervalos de reemplazo sobre el compresor sería muy poco práctico, ya que las intervenciones para cambiar cada tipo de rodamiento están desfasadas entre sí, lo que generaría detener el compresor para realizar las tareas de mantenimiento según el siguiente cronograma:



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- 1400 Hs: Rodamientos 6004 2RS1
- 2800 Hs: Rodamientos 6004 2RS1 y NA 4904 2RS
- 4200 Hs: Rodamientos 6004 2RS1
- 5600 Hs: Rodamientos 6004 2RS1 y NA 4904 2RS
- 7000 Hs: Rodamientos 6004 2RS1
- 8400 Hs: Rodamientos 6004 2RS1 y NA 4904 2RS
- 9800 Hs: Rodamientos 6004 2RS1
- 10400 Hs: Rodamientos 3206 A-2RS1
- 11200 Hs: Rodamientos 6004 2RS1 y NA 4904 2RS

Se puede optimizar un poco este cronograma si extendemos el intervalo de intervenciones sobre los rodamientos 6004 2RS1 a 2500 horas junto con los rodamientos NA 4904 2RS. De esta manera hay solo 4 detenciones del compresor, y no 8, antes de cambiar los rodamientos 3206 A-2RS1 de mayor MTTF.

3. CONCLUSIONES

Al diseñar un producto, se tiene la posibilidad de elegir o determinar cómo serán los trabajos de mantenimiento para reparar el bien, esta posibilidad en la etapa del diseño se lo puede denominar como "el diseño para el mantenimiento" (pensar como fallaría y como lo repararíamos). Cuando se utiliza en esta etapa el enfoque de "diseñar el mantenimiento", el mismo está fuertemente influenciado por las características de fiabilidad, de los costos (pueden resultar muy altos), o ser de difícil implementación (imposible debido a las limitaciones técnicas del producto en la fase de diseño de un producto se está convirtiendo en crítico para la competitividad en el mercado. Como se mencionó en la introducción a este trabajo poder realizar simulaciones de cómo se pueden comportarse las fallas en una máquina y valorar factores que influyen sobre el programa de mantenimiento preventivo. Esto nos puede permitir introducir cambios en la etapa de desarrollo del compresor y mejorar las formas en que se efectuaran los mantenimientos.

No obstante el plan definitivo se lo deberá evaluar junto con otros factores que se deben considerar y que se relacionan al tipo de misión al que esté destinado el equipo. Lógicamente que ninguna simulación puede reemplazar la distribución de fallas en real funcionamiento, pero la estadística nos permite inferir previamente el comportamiento del "material". Lo desarrollado sintéticamente aquí sirve para demostrar las bondades técnicas de una simulación junto con la aplicación del método estadístico de Weibull para la predicción de fallas de un sistema y el análisis preliminar del mantenimiento preventivo.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

4. REFERENCIAS

- [1] Holly Moore. Matlab para Ingenieros. - Edición 2007.
- [2] Javier García de Jalon, José Ignacio Rodríguez, Alfonso Brazalez. Aprende Matlab 5.3 como si estuviera en primero Autores: Editorial: Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Año: 2001.
- [3] Marc E. Hernite. Aprende Matlab 5.3 como si Programing in Matlab. Editorial: Thomson learning. Año 2001.
- [4] Enrique Villamil García, Ingeniero UBA-Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Miguel J. García Hernández, Ph. D. Introducción al proyecto de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [5] Francois Monchy. Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial. Año: 2010.
- [6] Bertram I. Amstadter. Matemáticas de la Fiabilidad - Fundamentos-Prácticas. Año 2011.