



RCM INGENIERIA

CONFIABILIDAD Y ANALISIS ESTADISTICO PARA LA PREDICION DE FALLAS, SEGURIDAD, SUPERVIVENCIA, RIESGO, COSTO Y GARANTÍAS DE LOS EQUIPOS.

Ing William Murillo

RESUMEN:

Este artículo provee un entendimiento del básico de la técnica del uso de distribuciones Weibull y log Normal desarrolladas para el análisis y predicción de falla. Esta nueva aplicación reduce los costos, calibración de instrumentos, análisis de las mediciones y propiedades de los materiales, también calcula los tiempos óptimos para el mantenimiento y ayuda a tomar decisiones en diagnóstico y nuevas inversiones de proyectos.. Este método muestra la aplicación del weibull análisis en computadores personales, para reemplazarlo por laboriosos cálculos en hojas de calculo y graficas manuales.

1. VISIÓN GENERAL DEL ANÁLISIS WEIBULL

Back Ground:

Inventado por Waloddi Weibull (1887-1979) en 1937 y publicado en 1951

1.1 Ejemplos:

Los siguientes son ejemplos de Problemas de ingeniería resueltos por Weibull.

- ◆ Falla de un componente durante tres meses, ¿Cuántas fallas se puede esperar en seis, doce meses?
- ◆ Programar el mantenimiento y ordenar repuestos
- ◆ En una Planta eléctrica con muchas salidas por fallas en la tubería de la caldera, basada en inspección, pronosticar su ciclo de vida y overhaul
- ◆ Los costos de fallas esporádicas, sujetas a desgastarse y uso o fatiga, es 20 veces más costosa que una salida planeada.

1.2 Ventajas:

Precisión razonable y precisa en el análisis de fallas

Provee un simple y poderoso gráfico, medición de vida, arranques, paradas, operación, ciclos de misión vs. % acumulativo de fallas. Los parámetros β (Beta, a pendiente) proveen una filosofía de falla y η (ETA, característica de vida) tiempo de falla weibull análisis está relacionado con el MTTF.

1.3 Distribución de una falla:

La pendiente de la gráfica weibull, β (beta) se define como:

$\beta < 1.0$ indica mortalidad infantil

$\beta = 1.0$ significa falla aleatoria

$\beta > 1.0$ indica falla por desgaste

Se puede determinar los porcentajes de falla para determinar por ejemplo el 1% de las fallas de una población el cual pueda fallar, es llamada β_1 .

$\beta_{0.1} = 0.1\%$ de la población

$\beta_{10} =$ determina el tiempo en el cual el 10% de la población puede fallar.

La característica η es definida como la edad al cual el 63.2% de las unidades podrían fallar, entonces se determina como $\beta 63$.

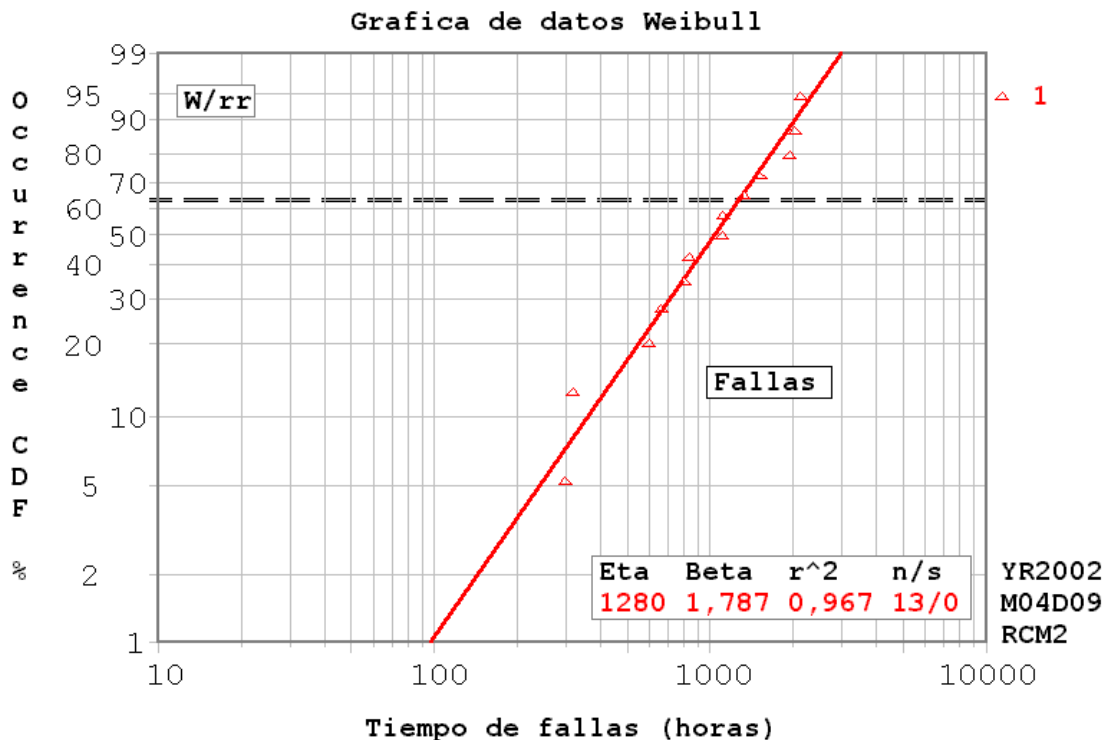


Figura 1.1: Grafica de una distribución weibull con $\beta=1.787$, falla por desgaste CDF=Comulative Distribution Function

1.4 Pronóstico y predicción de fallas

Cuando las fallas ocurren en servicio, una predicción del número de fallas que podrían ocurrir en un próximo periodo de tiempo es deseable calcular. La figura 1.2 provee información del cálculo de la predicción de fallas en una población de equipos similares.

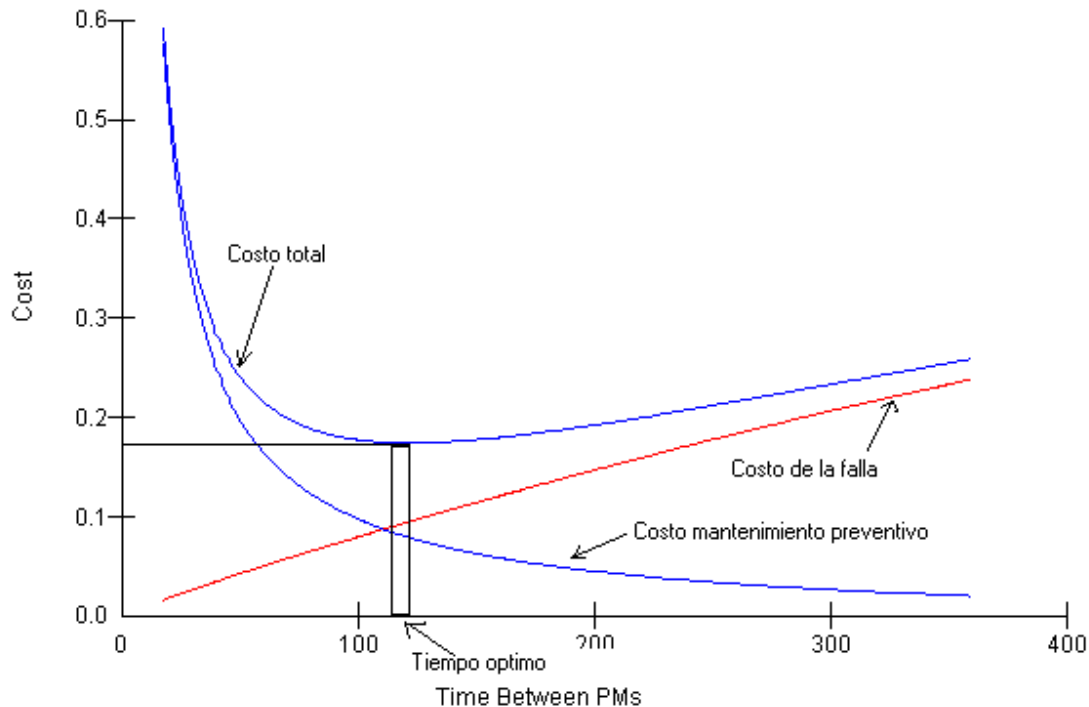
Algunos problemas en gráficos erróneos weibull son la información mal recogida:

- Mezcla de modos de falla
- Problemas con el origen cero de la falla
- Datos manuales donde las edades de las partes son desconocidas
- Construcción de curvas Weibull donde no existan fallas.

la distribución weibull provee con mayor frecuencia los mejores cálculos de la vida de los componentes, esto es debido al rango amplio de los parámetros y las familias de distribuciones que cubre, incluyendo la distribución exponencial, normal y poisson. Log normal no esta dentro de la familia de Weibull y es el mas significativo competidor para comparar sus cálculos.

Precisión por long normal es escogido para deterioro por sistema de aceleración, materiales no lineales y ratas de crecimiento en grietas.

Optimum Schedule for Preventive Maintenance



1.5 Planeación del mantenimiento

La distribución Weibull es usado para la planeación del mantenimiento, particularmente en el Reliability Centered Maintenance. β (Beta) nos dice si o no de las inspecciones son programadas o los overhauls son necesarios.

$\beta < 1$ los overhauls e inspección programados son de costo económico no efectivo.

$\beta > 1$ periodo de overhaul o programa de inspección son leídos directamente desde el grafico, calculando la probabilidad aceptable de las fallas.

Para modos de falla por desgaste, si el costo de una falla sin planear es mayor que el costo de un reemplazo planeado, el intervalo del tiempo optimo del mantenimiento o reemplazo es calculado a costo mínimo.

La distribución Weibull podría optimizar los intervalos y los costos del mantenimiento.

Usando el predictor de fallas weibull, cuantitativamente se puede calcular:

- Programar y no programar el mantenimiento
- Forzar un retrofit o un convincente retrofit
- Inspecciones no destructivas vs. reemplazo de partes
- Mantenimiento correctivo vs. Nada de mantenimiento.
- Diferentes tiempos entre overhauls.
- Intervalos óptimos del reemplazo.

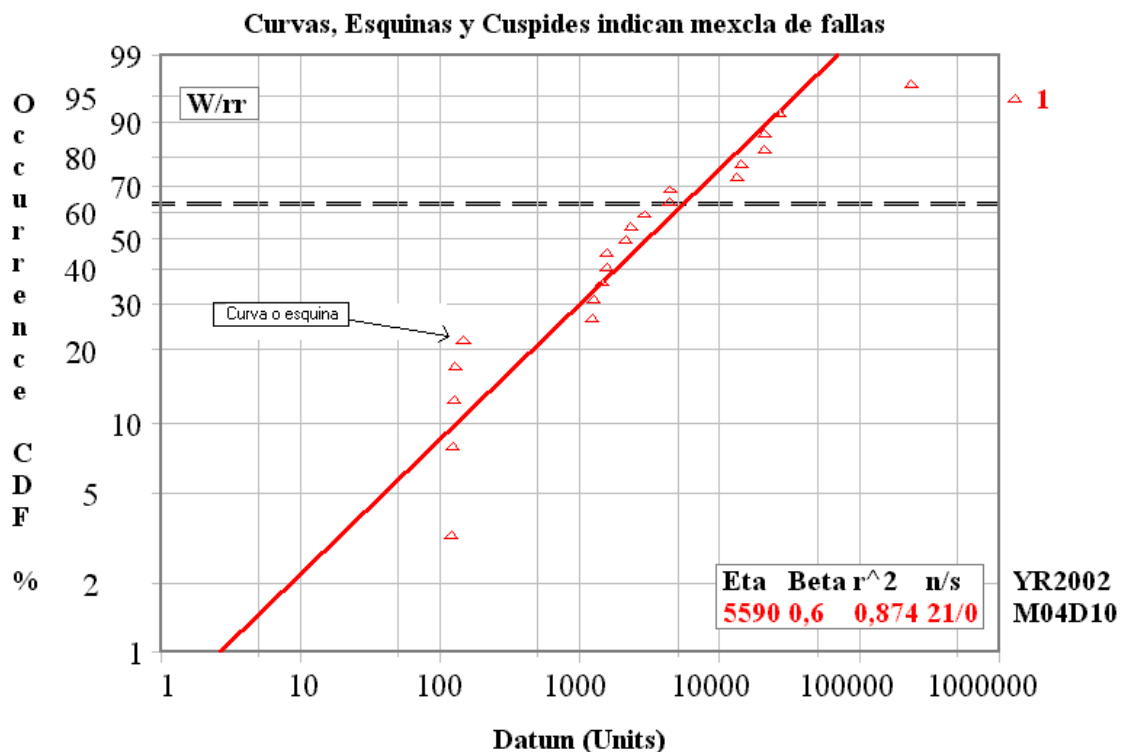
Los planes de mantenimiento cíclicos son cambiados por las ratas de falla. Los ciclos son también afectados por las interacciones entre los ciclos de vidas y los modos de falla de los sistemas, β , periodos de inspección y el reemplazo de partes.

1.6 Weibull con datos curvos

Los gráficos Weibull no siempre forman una estricta línea recta, cuando los datos forman una curva o esquinas indican mezclas de modos de falla y se deben de clasificar para determinar apropiadamente la distribución de la falla.

Otras curvas pueden ser de originadas por la edad del sistema o componente y hay que localizar el tiempo t_0 que es un periodo donde se garantiza de no existir fallas desde el inicio de su funcionamiento hasta este tiempo libre de fallas.

Los correctivos para evitar esta situación y crear parámetros weibull con grandes incertidumbres son no mezclar los modos de falla.



1.7 método Weibayes

La distribución weibull no sirve cuando no han ocurrido fallas. El método llamado Weibayes puede servir para estimar nuevos valores, si el número de fallas es extremadamente pequeñas y se conoce el parámetro β y η . Weibayes es más preciso que el weibull cuando se conoce el parámetro β .

1.8 Datos deficientes para distribuciones Weibull

- Mezcla de modos de falla
- Unidades de falla no determinadas
- Dato inspección
- Tiempos suspendidos o edades perdidas
- Datos de no fallas
- No existe tiempo cero de origen
- Muestras extremadamente pequeñas

Error de datos

2. GRAFICO DE DATOS E INTERPRETACIÓN.

2.1 Datos weibull

Los datos precisos para una distribución weibull son las “edades” de las partes, componentes o sistemas que fallan, estos datos pueden ser:

- Tiempos de operación de equipos (horas, días, kilómetros, etc)
- Arranques y paradas
- Lanzamientos de aviones o equipos militares
- Tiempos de almacenamiento
- Ciclos de fatiga
- Ciclos de alto stress
- Altas temperaturas y muchos otros parámetros

La figura 2.1 muestra el grafico de probabilidad weibull, usando apropiadamente los modos de falla y los tiempos de falla.

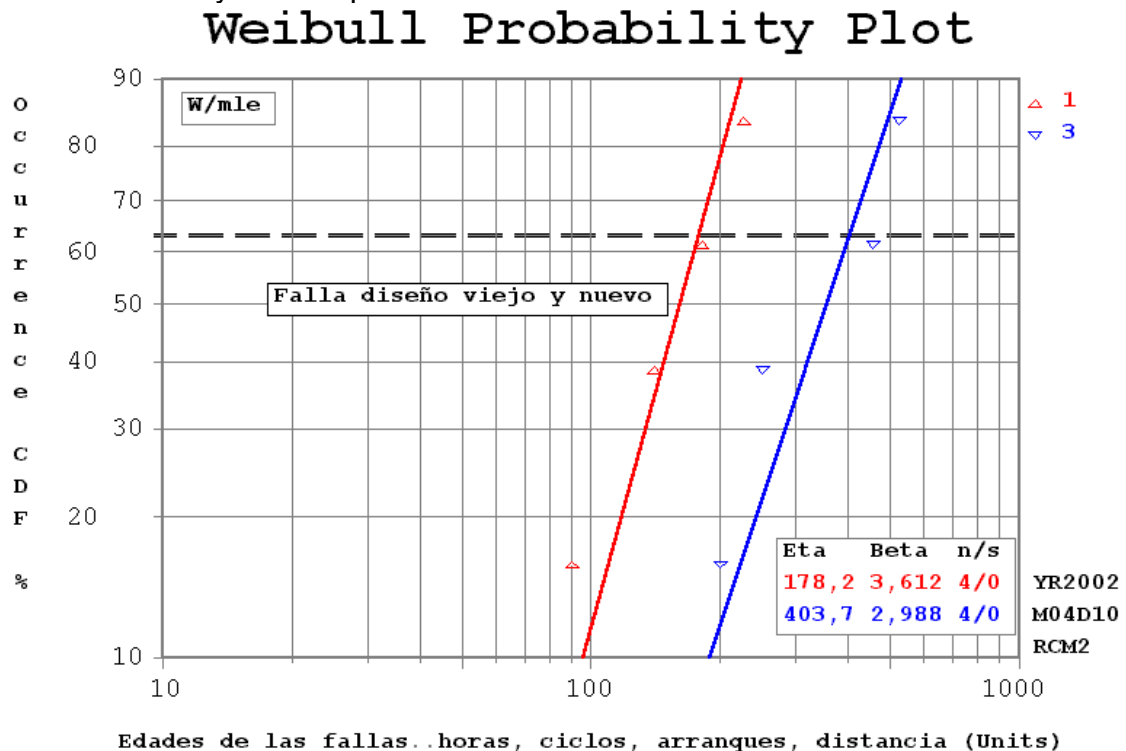


Figura 2.1

2.2 Escala de la gráfica weibull:

Escala horizontal: Edad o tiempo (t) logarítmica.

Escala vertical: Proporción de las unidades que pueden fallar a una edad (t) en porcentaje. Este valor se llama “ B live”, en la figura B10 = 95 unidades, B63.2 = 180 unidades de tiempo. Esto significa en el viejo diseño, que el 10% de las partes pueden fallar a un tiempo de 95 unidades; para el nuevo diseño B10 = 190 unidades, que significa que en el mismo 10% de partes pueden fallar a 190 unidades de tiempo.

CDF: Comulative Distribution Function

n/s: n es el numero de fallas / numero de suspensiones.



RCM INGENIERIA

Las suspensiones son revisiones o inspecciones a componentes donde no se encontró falla.

2.3 η (ETA) & β (BETA)

Los parámetros β & η de la distribución weibull son los valores usados para el análisis de vida de los componentes.

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad \text{Ecuación (A)}$$

La función de distribución weibull esta ilustrada en la ecuación (A) donde:

F(t) = Cumulative Distribution Function (CDF)

t = Tiempo de falla

η = Característica de vida parámetro escala

β = parámetro forma o pendiente.

e = 2.718281828, base del logaritmo natural.

β muestra la clase de falla como son mortalidad infantil, aleatoria, o desgaste, también es llamado el parámetro forma porque determina la familia o el tipo de distribución.

η es el parámetro vida y es igual al tiempo promedio para la falla (Mean Time To Failure MTTF) cuando β es igual a 1. la relación entre η y el MTTF es la función gamma de β .

$$MTTF = \eta \Gamma(1 + 1/\beta) \quad \text{Ecuación (B)}$$

- Cuando $\beta = 1.0$, MTTF = η , es una distribución exponencial
- Cuando $\beta > 1.0$, MTTF es menor que η
- Cuando $\beta < 1.0$, MTTF es mayor que η
- Cuando $\beta = 0.5$, MTTF = 2η

η es definida como la edad al cual el 63.2% de las unidades pueden fallar

$$F(t = \eta) = 1 - e^{-(\frac{\eta}{\eta})^\beta} = 1 - e^{-(1)^\beta} = 1 - 1/e = 0.632 \quad \text{Ecuación (C)}$$

2.4 "B" Life:

Muchas industrias usan B life como requerimientos de diseño. En la Aeroespacial, B1 life es usado para el inicio de una falla, B0.1 para fallas serias y B0.01 para fallas catastróficas. Algunas organizaciones citan su confiabilidad con un nivel de confianza, como son 99% de confiabilidad con un 95% de seguridad para fallas catastróficas.

2.5 Pruebas de inspección o Suspensión:

Es fácil mencionar equipos que no falla o fallan pero un modo diferente de falla es la inspección o una interrupción. Estos datos no pueden sé ignorados. Los tiempos de interrupción de las unidades pueden ser incluidos.

El mayor efecto de las interrupciones son el incremento de η y no afecta a β .

2. 6 interpretación del grafico Weibull

RCM INGENIERIA

La curva de la bañera puede ayudar a entender la relación entre β y los mecanismos de falla a través de la vida de un componente.

Weibull provee una pista acerca de los mecanismos de falla, con las diferentes pendientes o parámetro forma, implicando en las diferentes formas de falla, en la grafica 2.2 se muestra la curva de la bañera.

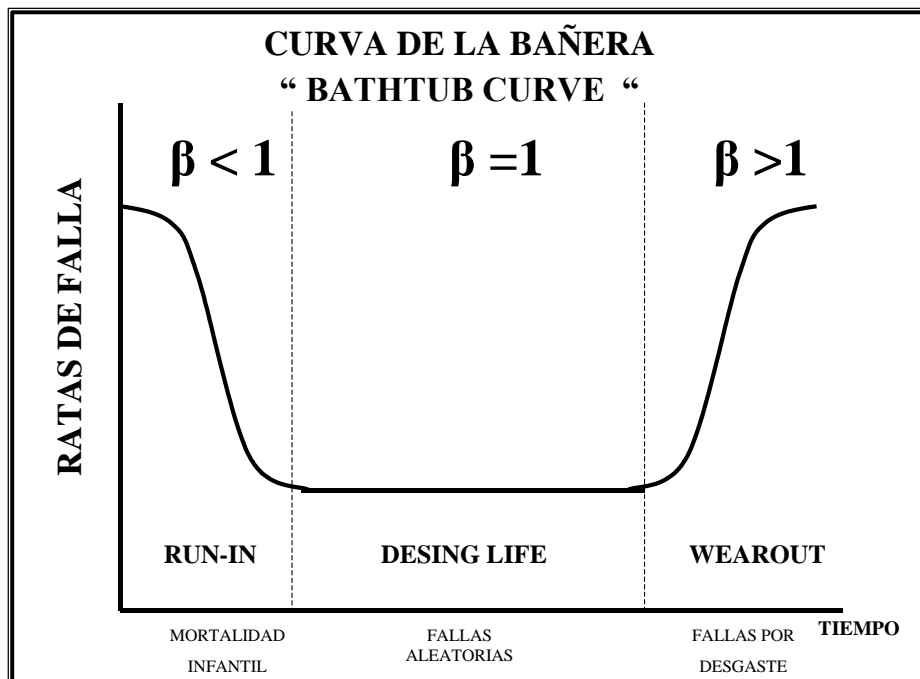


Figura 2.2 Curva de la bañera

2.7 $\beta < 1$ Implica Mortalidad Infantil:

Los Equipos electrónicos y mecánicos pueden iniciar con una alta rata de fallas en el inicio de proyectos y nuevos diseños, otros modos de falla son:

- ◆ Inadecuado burn - in o fuerzas, presiones ocultas.
- ◆ Problemas de producción
- ◆ Problemas de Desensamble.
- ◆ Problemas de Control de calidad.
- ◆ Problemas de over hauls.
- ◆ Fallas en componentes eléctricos.

2.8 $\beta = 1$ Implica Falla Aleatoria:

Falla independiente del tiempo o aleatorias y es igual a una distribución exponencial.

- ◆ Errores de mantenimiento / errores humanos
- ◆ Fallas debido a naturaleza, daños u objetos desconocidos, rayos.
- ◆ Mezcla de datos desde 3 o más modos de falla.
- ◆ Intervalos entre fallas.
- ◆ Over hauls no apropiados.



RCM INGENIERIA

2.9 $1 < \beta < 4$ Implica falla por deterioro temprano:

Si esta falla ocurre dentro del diseño de la vida es una desagradable sorpresa. Estas son muchas fallas de modo mecánicos en esta clase.

- ◆ Bajo ciclo de Fatiga.
- ◆ Muchas fallas de balineras.
- ◆ Corrosión.
- ◆ Erosión.
- ◆ Overhauls o partes reemplazadas con un bajo β son de costo no efectivo

2.10 $\beta > 4.0$ Implica deterioro rápido por edad de uso:

Típicos modos de falla con edades muy viejas y rápido salida por uso, también incluye:

- ◆ Corrosión por stresses.
- ◆ Propiedades de los materiales.
- ◆ Materiales como cerámicas.
- ◆ Algunas formas de erosión.

2.11 Desconocimiento en weibull que pueden ser cubiertos:

Suponga una parte tiene dos modos de falla, si una es mejor que la otra, la segunda nunca podría ocurrir sin la primera y puede ser eliminada.

El 1^{er} modo se dice que cubre "cover" el modo 2.

La existencia de fallas desconocidas garantizan riesgo porque desarrollan prueba que pueden no encubrir fallas ocultas.

3 Pronostico de fallas = análisis de riesgos

3.1 Situación:

El significado de una falla tiene su ocurrencia en servicio, sin embargo envuelve pérdidas financieras y riesgos en la seguridad del manejo responsable demanda un pronóstico de el número de fallas esperado que puede ocurrir en el futuro. Cuantas fallas podrían haber en el próximo mes, en los próximos seis meses y en el próximo año?. El pronóstico de las fallas prioriza y localiza las acciones correctivas para evitar estas fallas. Este análisis del riesgo y la predicción de la magnitud del problema aclara la visión del futuro. "Riesgo" es empleado como un sinónimo de "pronóstico de falla", la estadística llama a esto la "análisis de la predicción".

3.2 Definición:

Un análisis de riesgo o un pronóstico de falla predice el Número de incidentes que puede ocurrir en un específico periodo de tiempo.

3.3 Técnicas de pronóstico:

La distribución de fallas es determinada desde la falla y datos en suspensión, el pronóstico requiere una entrada adicional.

- La edad del componente en servicio.
- Uso de ratas por unidad mensual, anual o diaria.
- Introducción a ratas a nuevas unidades (modo de falla).
- Partes dañadas son reemplazadas con partes tiempo cero.

Con esta información se puede determinar el pronóstico de una falla.

Las técnicas usadas para pronóstico de fallas varían desde el cálculo simple a un complicado análisis de SIMULACIÓN MONTE CARLO.

3.4 Calculando el pronóstico de fallas Fallas esperadas

El primer paso para el cálculo de número de fallas esperadas en un tiempo t_i , si pertenecen a una población de N ítem y cada ocurrencia tiene t_i horas o ciclos, el número de fallas esperadas de esta población es la probabilidad de falla por un tiempo t_i , sobre el número de unidades N , incluyendo fallas y suspensiones (interrupciones o inspecciones).

El número esperado de fallas es:

$$Fallas _ Esperadas = \sum F(t_i) = \sum_{i=1}^N (1 - \varepsilon^{-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta}) \quad \text{Ecuación (D)}$$

Ejemplo:

Calcular las fallas esperadas de un grupo de 20 bombas, una a la cual falla a 2000h, otra falla a 3000h. estas tienen 5 interrupciones a edades de 1000 y 4000h, y 4 a 2000 y 3000h, respectivamente.

Tabla 3.1 información de las fallas

Numero de unidades	Tiempo en horas	F(t) de la figura 4.1	F(t) x N N=5
5S	1000	0.0058	0.029
4S+1F	2000	0.0317	0.1585
4S+1F	3000	0.100	0.5
5S	4000	0.214	1.07

$$18S+2F=20$$

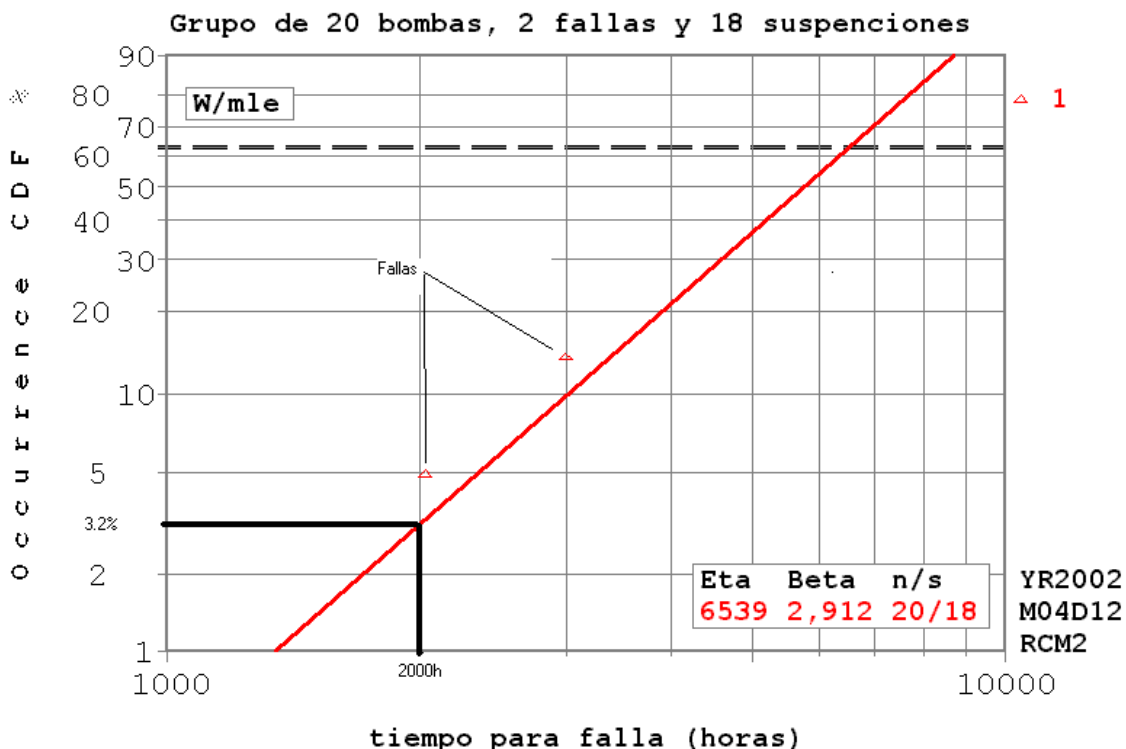


Figura 3.1 Grafico weibull del calculo de las expectativas de falla de 20 bombas.

Si la expectativa de la falla es mucho más grande que la observada en el número de fallas, el weibull puede no aplicar para la población entera. Este es un problema “batch”, la detección de problemas batch es una razón para el cálculo de expectativa de falla presentes.

3.5 Análisis y resumen de pronósticos de falla (P.F.)

La expectativa de las fallas sobre una población de equipos o misiones, sumando fallas mas suspensiones:

$$Expectativas_de_Fallas = \sum (F(t_i)) \text{ Ecuación (E)}$$

El pronostico de una falla futura es resumida sobre el riesgo (unidades con suspensiones) solamente:

$$Pronosticos_de_Fallas = \sum \frac{F(t_i + u) - F(t_i)}{1 - F(t_i)} \text{ Ecuación (F)}$$

Cuando las unidades son reemplazadas la ecuación para el calculo desde Weibull es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \text{ Ecuación (H)}$$

3.6 Ejemplo: Daño de rodamientos.

La población es de 26 rodamientos en servicio con edades por encima de 2050 horas. Las fallas del rodamiento fueron a 230, 334, 423, 990, 1009 y 1510 horas, 6 suspensiones o inspecciones a 1697h

La figura 3.2 muestra el grafico weibull con las distribuciones de las fallas

RCM INGENIERIA

fallas de Rodamientos

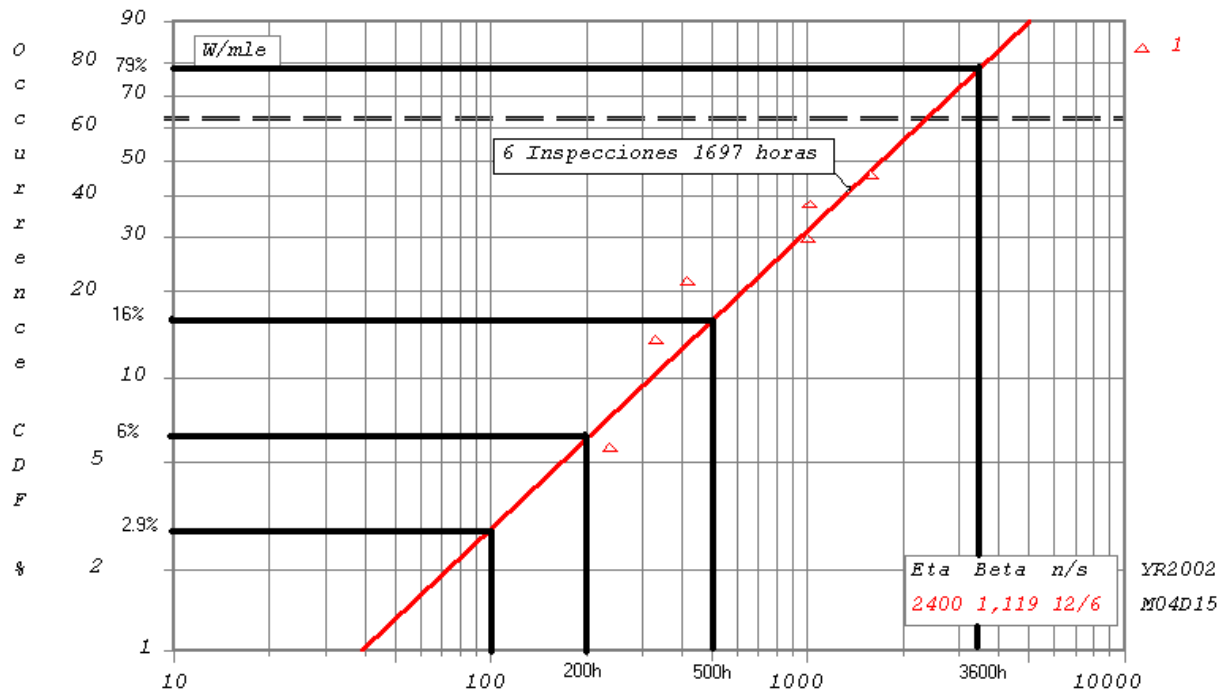


Figura 3.2, Tiempo de Operacion (Horas)

Preguntas acerca del riesgo de diferentes fallas:

1. Cuantas rodamientos podrían fallar antes de 500h.?

Asumiendo que no hay reemplazos entrando por el eje X del grafico Weibull y leyendo el eje Y, aproximadamente el 0.16% de la poblacion de rodamientos podrían fallar. Esto indica:

Rodamientos que podrían fallar a 500h = $(0.16) * 26$ rodamientos = 4 rodamientos podrían ser esperados que fallen.
2. Cuantas fallas podrían esperaren en el próximo año. y cuantas en los próximos 5 años. Usando la metodología y el grafico weibull y la ecuación (F) y una utilización mensual de 50 horas de utilización se tiene:

$60 \text{ h/mes} * 12 \text{ meses} = 720\text{h}$, $F(720\text{h}) = 0.23$, entonces $(0.23)*26 = 6$ rodamientos

$h(5\text{años}) = 5*720 = 3600 \text{ h}$, $F(3600\text{h}) = 0.79$, entonces $(0.79)*26 = 20$ rodamientos.
3. Cuantas fallas se pueden esperar en 500h, si hay reemplazo en 100h y 200h y no reemplazo:
 - a. 100h:

$F(100\text{h}) = 0.029$, aproximadamente es $0.029+0.029+0.029+0.029 = 0.116$, entonces las fallas podrían ser $0.116*26 = 3$ rodamientos
 - b. 200h:

$F(200\text{h}) = 0.06$, $0.06+0.06 = 0.12$ entonces podrían fallar $0.12*26 = 3$ rodamientos.
 - c. No reemplazos:

Se podrían tener $F(500) = 0.16$, entonces $0.16*26 = 4$ rodamientos.

3.7 Intervalo optimo para el mantenimiento vs costo.

El costo de unas fallas sin planeación es grande que el costo de reemplazos planeados. Si el intervalo es muy corto, el costo del reemplazo es muy alto; si este es



RCM INGENIERIA

muy largo, el manejo de la falla no planeada total es muy alta. Weibull tiene una estrategia para encontrar el intervalo del costo efectivo para el reemplazo del componente.

El optimo reemplazo en un intervalo es la edad con el mínimo radio del costo promedio para el MTBF, $C(t)$.

$C(t)$ = Costo por unidad

U = Costo de un reemplazo no planeado.

P = Costo de un reemplazo antes de la falla, $P < U$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Ecuación (I).}$$

El costo por unidad de tiempo es el radio del costo promedio para el MTTF. la función puede ser expresada como sigue en la ecuación (J)

$$C(t) = \frac{PxR(t) + Ux(1 - R(t))}{\int_0^t e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx} \quad \text{ecuación (J)}$$

Cuando t se reemplaza en un periodo x.

El primer termino en el numerador es el costo del reemplazo planeado multiplicado por una fracción del periodo t. Este termino decrementa con el tiempo. el segundo termino en el numerador es el costo del reemplazo no planeado multiplicado por una la inconfiabilidad durante el periodo de tiempo. El termino incrementa a través del tiempo. El denominador es el MTTF (el área bajo la curva de la confiabilidad en un intervalo de tiempo de 0 a t).

Hallando el mínimo de la ecuación se obtiene el tiempo optimo del reemplazo.

Diferencias entre costos de 20:1 hacen que existan tiempos óptimos de reemplazo.

Usando el ejercicio anterior y con costos de reemplazo planeado en 17 dólares y costo por reemplazo no planeado en falla es de 226, el tiempo optimo del reemplazo es en 2200 horas

Weibull Optimum Replacement Interval

Grupo de 20 bombas, 2 fallas y 18 suspensiones Date: M04-D16-YR2002
 Eta = 6538,632 Beta = 2,911958
 Cost / Item [\$] Planned = 17 Cost / Item [\$] Not Planned = 226
 At Optimum (2200) Steady-State: Replacement Rate [/Unit-horas] = 4,358833E-04
 Failure-Rate (FR) [/Unit-horas] = 1,866218E-05 MTBF(1/FR) = 53584,31
 Cost/Time [\$/horas]:

horas.....Cost	horas.....Cost	horas.....Cost	horas.....Cost
100 ,17	1600 ,01283	3100 ,01313	4600 ,01905
200 ,08504	1700 ,01248	3200 ,01342	4700 ,01953
300 ,05676	1800 ,01221	3300 ,01372	4800 ,02002
400 ,04266	1900 ,01201	3400 ,01405	4900 ,02051
500 ,03424	2000 ,01187	3500 ,01439	5000 ,021
600 ,02867	2100 ,01179	3600 ,01475	5100 ,0215
700 ,02474	2200* ,01176	3700 ,01513	5200 ,022
800 ,02184	2300 ,01178	3800 ,01552	5300 ,0225
900 ,01963	2400 ,01184	3900 ,01592	5400 ,023
1000 ,0179	2500 ,01193	4000 ,01634	5500 ,0235
1100 ,01654	2600 ,01206	4100 ,01677	5600 ,02401
1200 ,01545	2700 ,01222	4200 ,0172	5700 ,02451
1300 ,01457	2800 ,01241	4300 ,01765	5800 ,02501
1400 ,01386	2900 ,01262	4400 ,01811	5900 ,0255
1500 ,01329	3000 ,01286	4500 ,01858	6000 ,02599

Figura 3.3 muestra el tiempo optimo del reemplazo para ejecutar el mantenimiento.

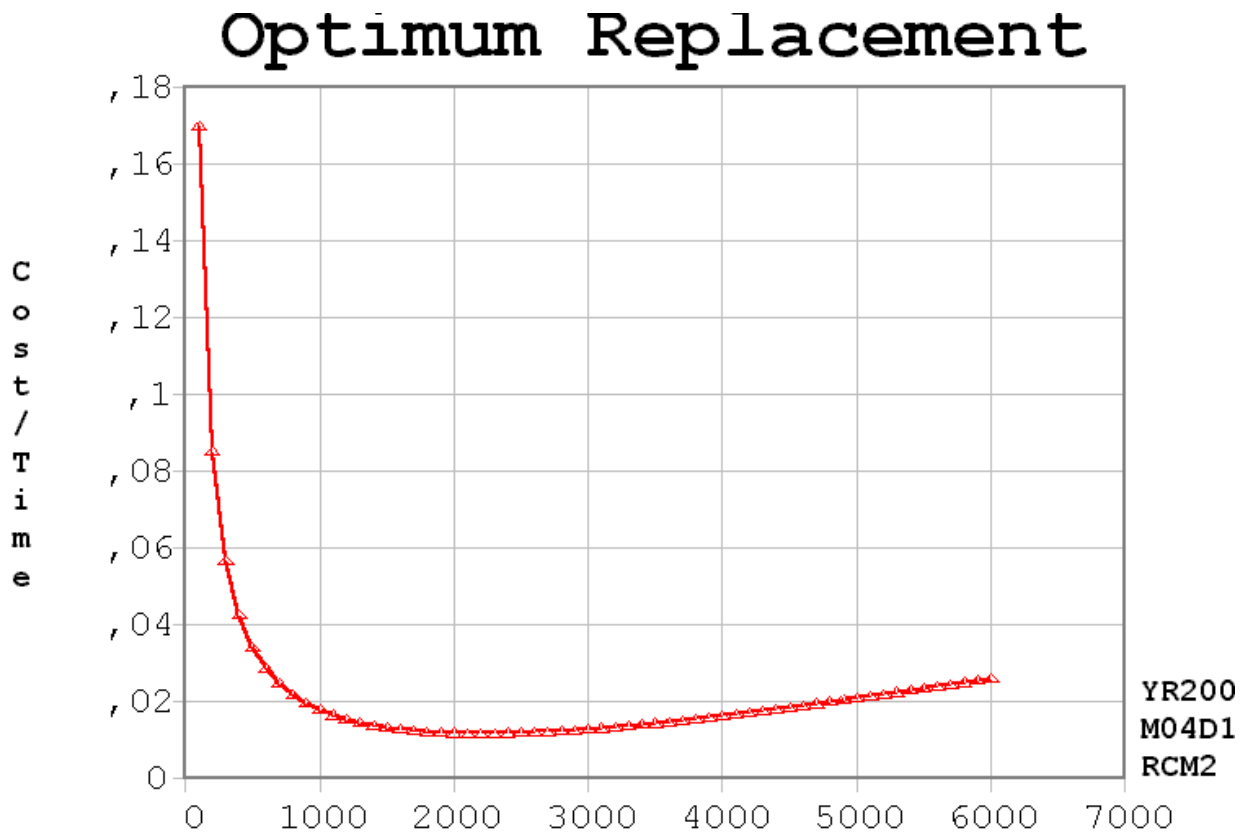


figura 3.4 grafica del tiempo de reemplazo optimo.



RCM INGENIERIA

Bibliografía

R. B. Abernethy, the new Weibull handbook, 4 edición, 1998, USA.

www.barringer1.com, SuperSMITH software

www.weibullnews.com, WinSMITHvisual software.

Hoja de Vida

William M. Murillo:

RCM ingeniería, Gerente

Teléfonos: 092-5586730, 033-5000574

Email: rcmingenieria@emcali.net.co

Ing. electricista Univalle, Especialista en mantenimiento, Especialista en sistemas de transmisión de potencia y generación de Univalle, diplomado en confiabilidad de sistemas cursos en Houston TX en confiabilidad de sistemas (2000), Uniandes. Ha trabajado para Stewart & Stevenson como Operador y mantenedor de Turbinas a Gas (1994-1997); Para Brithis Petroleum Colombia, como supervisor de mantenimiento eléctrico de la planta de Cusiana y Cupigua (1997-2001); Ecopetrol en diseño de procedimientos y estructuración del CMMS (2001); Actualmente gerente de RCM2 ingeniería como especialista en gestión del mantenimiento.