

**MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO GENERAL DE UN NEGOCIO
PRODUCTIVO MEDIANTE EL ASEGURAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD
DE SUS ACTIVOS**

ROGER ANTONIO RIVERA MONDOL

AMARAL MARTINEZ LUGO

MINOR

MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR

CARTAGENA NOVIEMBRE 19 DEL 2004

**MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO GENERAL DE UN NEGOCIO
PRODUCTIVO MEDIANTE EL ASEGURAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD
DE SUS ACTIVOS**

ROGER ANTONIO RIVERA MONDOL

roandlizz@yahoo.es

AMARAL MARTINEZ LUGO

amaralmtnez@yahoo.com

INGENIERO

JULIO BURBANO

MINOR

MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

MONOGRAFIA PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR

CARTAGENA NOVIEMBRE 19 DEL 2004

Nota de Aceptación

Cartagena de indias 19 de Noviembre de 2004

DEDICATORIA

A Dios, gracias a las personas que siempre han tenido Fe en mi, a mis padres Tulio y Myriam, que siempre me apoyaron, a mis hermanos Raúl y Natal y A mi esposa Lizzette que siempre estuvo conmigo en el desarrollo de mi carrera.

ROGER RIVERA MONDOL

DEDICATORIA

A DIOS

A mis padres que siempre me apoyaron
incondicionalmente para lograr esta meta
tan anhelada

AMARAL MARTINEZ LUGO

AGRADECIMIENTOS

Amaral Martínez Lugo y Roger Rivera Mondol autores de esta monografía agradecemos al Ingeniero Julio Burbano por la colaboración prestada y su interés de solucionar las inquietudes que se nos presentaron en el desarrollo de esta investigación

RESUMEN

La creciente necesidad de mejorar la productividad, de tomar decisiones acertadas, de mejorar un amplio volumen de información y de evaluar eficazmente el funcionamiento de los equipos hace que los departamentos de mantenimiento adecuen sus recursos para ampliar programas de optimización cada vez más eficaces.

El objetivo del presente trabajo es estudiar, analizar y aplicar el modelo estadístico de confiabilidad de equipos (Distribución Weibull) con miras al aseguramiento de la confiabilidad de los activos en una planta industrial, cambiando el mantenimiento correctivo, no programado y altamente costoso, por mantenimiento preventivo planeado teniendo en cuenta el estado real de la maquina, su historial de fallas, que permita un adecuado control de costos y utilizando la estadística como una poderosa herramienta de apoyo en la toma de decisiones gerenciales.

Una de las capacidades más importantes de este método de confiabilidad es que previene al ingeniero o jefe de mantenimiento acerca del tiempo de vida de la maquinaria, es una herramienta que nos predice un intervalo de tiempo en el cual la maquinaria no presentará fallas, revelando el margen de operación de la maquinaria y esto se traduce en rendimiento, calidad, costo, y optimización en el proceso de manufactura.

CONTENIDO

INDICE	Página
1- RESUMEN	7
2- INTRODUCCION	11
3- OBJETIVOS	13
3.1- OBJETIVOS GENERALES	13
3.2- OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
4- MANTENIMIENTO BASADO EN CONFIABILIDAD (RCM)	15
4.1.- INTRODUCCIÓN	15
4.2.- La evolución del mantenimiento	16
4.2.1- La Primera Generación	16
4.2.2- La Segunda Generación	16
4.2.3- La Tercera Generación	17
4.3.- Cambio de paradigmas	18
4.4.- RCM	21
4.5.- EL RCM: Siete Preguntas Básicas	24
4.5.1- Funciones y sus Estándares de Funcionamiento	25
4.5.2- Fallas Funcionales	25
4.5.3- Modos de Falla (Causas de Falla)	26
4.5.4- Efectos de los Fallas	26
4.5.5- Consecuencias de las Fallas	26
4.5.6- Tareas de Mantenimiento	28
4.5.7- Acciones a "falta de"	31
4.6.- El personal implicado	33
4.6.1- Los Facilitadores	34

4.6.2- Los Auditores	35
4.7- Los beneficios a conseguir por RCM	35
4.7.1- Mayor seguridad y protección del entorno	35
4.7.2- Mejores rendimientos operativos	36
4.7.3- Mayor Control de los costos del mantenimiento	36
4.7.4 Más larga vida útil de los equipos	37
4.7.5- Una amplia base de datos de mantenimiento	37
4.7.6- Mayor motivación de las personas	37
4.7.7- Mejor trabajo de grupo	38
4.8.- conclusión	39
5.- ANALISIS DE CONFIABILIDAD	40
5.1- Modelos utilizados en confiabilidad	41
5.2- Comportamiento de los equipos	41
5.2.1- Disponibilidad de operación	41
5.2.2- Efectividad	43
5.3- Confiabilidad	46
5.3.1- Función de confiabilidad, vida media y tasa de falla	50
5.4- Consideraciones sobre la tasa de fallos	54
5.4.1- Mecanismos de falla	56
5.4.2- Ley de Falla $f(t)$	62
5.4.2.1- Modelo de Weibull	63
5.4.2.2- Modelo Exponencial	67
5.4.3- Predicción de la Confiabilidad	69

6.0- análisis de confiabilidad de weibull	77
6.1- Otros modelos	88
7- Evaluación del tiempo óptimo de reemplazo de equipos	92
8- APLICACIONES	95
9- BIBLIOGRAFIA	116
10- CONCLUSIONES	117

1.- INTRODUCCION

Un sistema de mantenimiento eficaz incluye todas las actividades dirigidas a conservar las características de diseño de los equipos, para evitar fallas imprevistas, prolongar su ciclo de vida útil y mantener su óptima operación.

En el campo de la industria es muy difícil conocer el tiempo aproximado de vida de un equipo, en la mayoría de las veces esta información viene contenida en los catálogos que acompañan al equipo en el momento de su adquisición, pero resulta que esta información solo fue registrada así, cuando se evaluó el equipo en una situación determinada.

Lo que quiere decir que esta maquinaria esta sometida a factores diferentes a los realizados en su estudio como por ejemplo el ambiente a la cual ella esta expuesta, el rigor de trabajo expuesta, las condiciones de operación y en fin muchos factores los cuales hacen que esta información se tome como una prevención mas que una restricción.

Dado que las fallas de los equipos son eventos aleatorios, es posible estudiarlas con conceptos y modelos estocásticos o estadísticos que permiten controlar y mejorar la probabilidad que un equipo no falle durante un cierto tiempo. Por medio de estas herramientas se pueden estimar el tiempo durante el cual el

equipo no fallará, el número de fallas por horas de funcionamiento y la confiabilidad o probabilidad de que no falle durante un tiempo determinado.

La confiabilidad de un sistema se puede definir como la probabilidad que dicha planta pueda operar normalmente durante un periodo de tiempo determinado sin pérdida de su función. El análisis de confiabilidad de equipos se está utilizando para pronosticar las posibles fallas, así como para mejorar su operabilidad, apoyando la programación eficiente de la gestión del mantenimiento.

El comportamiento histórico de las fallas de los equipos de producción se puede describir por medio del análisis de confiabilidad basado por el método de distribución de WEIBULL. Partiendo de su historia de falla se puede determinar su comportamiento real y proyectar la influencia del mantenimiento preventivo sobre algunos parámetros de control de los equipos tales como la confiabilidad, mantenibilidad y efectividad global.

2.- OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Mejorar el desempeño general de un negocio productivo mediante el aseguramiento de la confiabilidad de sus activos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Utilizar herramientas estadísticas para estimar la confiabilidad de equipos mecánicos en plantas industriales (método de distribución weibull)
- Dividir la Planta en Sectores que Permitan Visualizar la Importancia de los Equipos en el Proceso Productivo.
- Conocer el Funcionamiento de los Equipos y sus Principales Componentes.
- Recopilar y Analizar Información sobre el Comportamiento Histórico de Fallas de los Equipos.
- Analizar la Criticidad de las Fallas, Otorgándoles Índices de Gravedad y Frecuencia que Permitan Jerarquizarlas.

- Analizar Los Modos de Fallas, para Obtener la Frecuencia de las Fallas más Graves y Comunes.
- Introducir Datos de Frecuencias de Fallas más Comunes y Graves al Modelo estadístico de Confiabilidad Basado en Distribución Weibull.
- Definir los Parámetros Theta, Beta y Gama de Acuerdo a la Clasificación de los Equipos (Mecánicos, Eléctricos, Electrónicos, Neumáticos e Hidráulicos).
- Determinar la Ecuación Particular del Modelo de Confiabilidad de Weibull.
- Simular y Graficar el Comportamiento Histórico del Equipo.
- Determinar la Tasa de Falla del Equipo, Tiempo Medio Entre Fallas y Verificar que se Cumpla este Tiempo, para determinar el Tiempo Óptimo de Mantenimiento.
- Interpretar y Registrar Resultados.

4. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)

4.1 INTRODUCCION

La idea del mantenimiento está cambiando. Debido a un aumento de mecanización, mayor complejidad de la maquinaria, nuevas técnicas de mantenimiento y un nuevo enfoque de la organización y de las responsabilidades del mismo. El mantenimiento está reaccionando ante nuevas expectativas. Estas incluyen una mayor importancia a los aspectos de seguridad y del medio ambiente, un conocimiento creciente de la conexión existente entre el mantenimiento y la calidad del producto, y un aumento de la presión ejercida para conseguir una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimizan.

Frente a esta avalancha de cambios, el personal que dirige el mantenimiento está buscando un nuevo camino. Quiere evitar equivocarse cuando se toma alguna acción de mejora. Trata de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente, de forma que puedan evaluarlos racionalmente y aplicar aquellos que sean de mayor valía para ellos y sus compañías. En este primer capítulo de la monografía se introduce una filosofía que provee justamente ese esquema de trabajo.

Llamado ***Reliability Centred Maintenance, o RCM (Mantenimiento centrado en la confiabilidad)***.

Si es aplicado correctamente, el RCM tiene la capacidad de transformar la relación que existe entre el personal involucrado, la operación en sí misma, operadores y mantenedores. También permite poner en funcionamiento nueva maquinaria a gran velocidad, seguridad y precisión.

4.2. LA EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

Como todo proceso en evolución, el dominio del mantenimiento ha seguido una serie de etapas cronológicas que se han caracterizado por una metodología específica.

4.2.1 La Primera Generación

La primera Generación cubre el período hasta la II Guerra Mundial. Es esos días la industria no estaba muy mecanizada, por lo que los períodos de paradas ni importaban mucho. La maquinaria era sencilla y en la mayoría de los casos diseñada para un propósito determinado. Esto hacía que fuera confiable y fácil de reparar. Como resultado, no se necesitaban sistemas de mantenimiento complicados, y la necesidad de personal calificado era menor que ahora.

4.2.2 La Segunda Generación

Durante la Segunda Guerra Mundial las cosas cambiaron drásticamente. Los tiempos de Guerra aumentaron la necesidad de productos de toda clase, mientras que la mano de obra industrial bajó de forma considerable. Esto llevó

a la necesidad de un aumento de mecanización. Hacia el año 1950 se habían construido equipos de todo tipo y cada vez más complejos. Las empresas habían comenzado a depender de ellos.

Al aumentar esta dependencia, el tiempo improductivo de una máquina se hizo más evidente. Esto llevó a la idea de que las fallas se podían y debían de prevenir, lo que dio como resultado el nacimiento del concepto del mantenimiento programado. En los años 60 basándose primordialmente en la revisión completa del material a intervalos fijos.

El costo del mantenimiento comenzó también a elevarse mucho en relación con los otros costos de funcionamiento. Como resultado comenzaron a implantarse sistemas de control y planeación del mantenimiento. Ayudando a poner el mantenimiento bajo control, y se han establecido ahora como parte de la práctica del mismo.

4.2.3 La Tercera Generación

Desde mediados de los años setenta, el proceso de cambio en las empresas ha tomado incluso velocidades más altas. Los cambios pueden clasificarse así:

Nuevas expectativas: El crecimiento continuo de la mecanización significa que los períodos improductivos tienen un efecto más importante en la producción, costo total y servicio al cliente. Esto es visto claramente con el movimiento mundial hacia los sistemas de producción justo a tiempo, en el que los reducidos niveles de inventario en curso hacen que pequeñas averías puedan causar el paro de toda la operación. Creando grandes demandas en la

función del mantenimiento. Una automatización más extensa significa que hay una relación más estrecha entre la condición de la maquinaria y la calidad del producto. Simultáneamente, elevándose los estándares de calidad. El aumento de la mecanización, también produce más serias las consecuencias de las fallas de una instalación para la seguridad y/o el medio ambiente.

Nueva Investigación: Mucho más allá de las mejores expectativas, la nueva investigación está cambiando las creencias más básicas acerca del mantenimiento. En particular, se hace aparente ahora que hay una menor conexión entre el tiempo que lleva un equipo funcionando y sus posibilidades de falla.

4.3. CAMBIO DE PARADIGMAS

En 1978 la aviación comercial en Estados Unidos publicó un estudio de patrones de falla en los componentes de aviones cambiando todas las costumbres que hasta el momento se tenía sobre el mantenimiento. La figura 1. muestra cómo el punto de vista acerca de las fallas en un principio era simplemente que cuando los elementos físicos envejecen tienen más posibilidades de fallar, mientras que un conocimiento creciente acerca del desgaste por el uso durante la Segunda Generación llevó a la creencia general en la "curva de la bañera". Revelándose que en la práctica actual no sólo existe la ocurrencia de un modelo de falla sino seis diferentes.

Ahora, los equipos en general son mucho más complicados de lo que eran hace algunos años. Esto ha llevado a cambios en los modelos de las fallas de los

equipos, mostrado en la figura 1. Puede observarse en el gráfico la probabilidad condicional de falla contra la vida útil para una gran variedad de elementos eléctricos y mecánicos.

PATRONES DE FALLA (INDUSTRIA AERONÁUTICA)

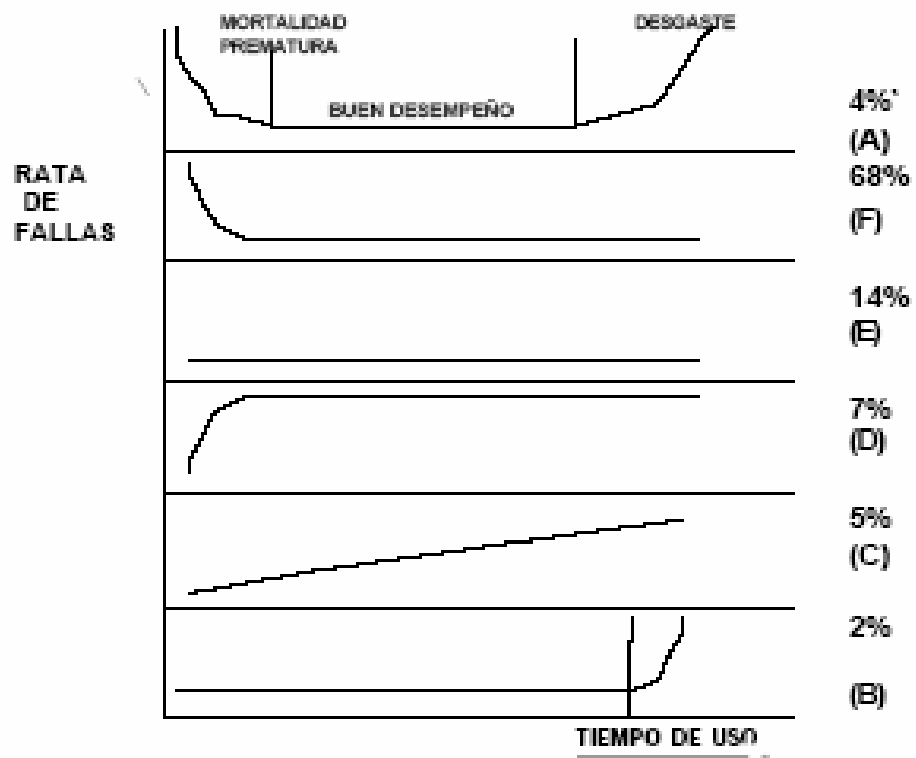


Figura 1. Patrones de Falla

- El modelo A es la conocida "curva de la bañera". Comienza con una incidencia de falla alta (conocida como mortalidad infantil o desgaste de

funcionamiento) seguida por una frecuencia de falla que aumenta gradualmente o que es constante, y luego por una zona de desgaste.

- El modelo B muestra una probabilidad de falla constante o ligeramente ascendente, y termina en una zona de desgaste.
- El modelo C muestra una probabilidad de falla ligeramente ascendente, pero no hay una edad de desgaste definida que sea identificable.
- El modelo D muestra una probabilidad de falla bajo cuando el componente es nuevo o se acaba de comprar, luego un aumento rápido a un nivel constante.
- El modelo E muestra una probabilidad constante de falla en todas las edades (falla aleatoria).
- El modelo F comienza con una mortalidad infantil muy alta, que desciende finalmente a una probabilidad de falla que aumenta muy despacio o que es constante. Como ejemplo, los estudios hechos en la aviación civil mostraron que el 4% de las piezas está de acuerdo con el modelo A, el 2% con el B, el 5% con el C, el 7% con el D, el 14% con el E y no menos del 68% con el modelo F. En general, los modelos de las fallas dependen de la complejidad de los elementos. Cuanto más complejos sean, es más fácil que estén de acuerdo con los modelos E y F. Pero no hay duda de que cuanto más complicados sean los equipos más veces encontraremos los modelos de falla (E y F). Estos hallazgos contradicen la creencia de que siempre hay una conexión entre la

confiabilidad y la edad operacional. Fue esta creencia la que llevó a la idea de que cuanto más a menudo se revisaba una pieza, menor era la probabilidad de falla. Hoy en día, esto es raramente la verdad. A no ser que haya un modo de falla dominante, los límites de edad no hacen nada o muy poco para mejorar la confiabilidad de un equipo complejo. De hecho las revisiones programadas si no son realizadas adecuadamente pueden aumentar las frecuencias de las fallas en general, por medio de la introducción de la mortalidad infantil dentro de sistemas que de otra forma serían estables.

4.4. RCM

En los últimos años el mantenimiento ha recibido brillantes aportes provenientes del campo de la estadística y de la teoría de la confiabilidad. El mantenimiento del motor de combustión interna ha activado los mejores planteamientos dentro del mantenimiento. Estas teorías, que también se ha ampliado con estudios efectuados en grandes flotas de transporte urbano, no pueden aplicarse a la totalidad de una fábrica u otra empresa. Ello es debido a la falta de homogeneidad en los equipos instalados a las grandes diferencias entre fábricas y a la carencia de organismos que regulen, que coordinen y tengan autoridad en lo que respecta a la práctica del mantenimiento.

No es que las bases teóricas globales, estén vedadas a las fábricas u otras empresas, pero a la vista de la situación general y a la necesidad de atender

prioritariamente los problemas inmediatos y de medio plazo, la experiencia es el mejor camino. Ante esta situación, puede ser de primera necesidad el conseguir y seguir un método que pretenda únicamente unificar criterios dentro de una misma organización. Criterios que, como primer caso, se basen en la lógica y el conocimiento de los equipos y de sus misiones. Son los mismos parámetros que se aplican a diario, pero sistematizados para obtener una mayor uniformidad.

El plan así diseñado, puede ser un buen punto de partida para que posteriormente sea afinado y retocado con aportaciones de mayor nivel. Algunos diccionarios definen mantener como la causa para continuar o para mantener en un estado existente. Ambas definiciones ponen de manifiesto que el mantenimiento significa la preservación de algo.

Pero cuando se tiene que tomar la decisión de mantener algo, ¿qué es lo que se desea causar que continúe? ¿Cuál es el estado existente que se desea preservar?

La respuesta a estas preguntas puede encontrarse en el hecho de que todo elemento físico se pone en servicio para cumplir una función o funciones específicas. Por lo tanto, cuando un equipo es mantenido, el estado en que se desea preservarlo debe ser aquel deseado que continúe para cumplir la función determinada.

Mantenimiento: Asegurar que todo elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas.

Claramente, para que esto sea posible, los equipos deben ser capaces de cumplir esas funciones previstas. Esto es porque el mantenimiento - el proceso de "causar que continúe" - solamente puede entregar la capacidad incorporada (confiabilidad inherente) de cualquier elemento. No puede aumentarla. En otras palabras, si cualquier tipo de equipo es incapaz de realizar el funcionamiento deseado en principio, el mantenimiento por sí solo no puede realizarlo. En tales casos, debemos modificar los elementos de forma que pueda realizar el funcionamiento deseado, o por el contrario reducir nuestras expectativas.

RCM, se llama Mantenimiento centrado en la Confiabilidad, porque reconoce que el mantenimiento no puede hacer más que asegurar que los elementos físicos continúan consiguiendo su capacidad incorporada, confiabilidad inherente. La función determinada de cualquier equipo puede definirse de muchas formas, dependiendo exactamente de dónde y cómo se esté usando (el contexto operacional). Como resultado de esto, cualquier intento de formular o revisar las políticas de mantenimiento deberían comenzar con las funciones y los estándares de funcionamiento asociados a cada elemento en su contexto operacional presente. Esto lleva a la siguiente definición formal de RCM:

Reliability Centred Maintenance (RCM): Es un proceso que se usa para determinar los requerimientos del mantenimiento de los elementos físicos en su contexto Operacional

Una definición más amplia de RCM podría ser “un proceso que se usa para determinar lo que debe hacerse para asegurar que un elemento físico continúa desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional presente”.

4.5. EL RCM: Siete Preguntas Básicas

El RCM se centra en la relación entre la organización y los elementos físicos que la componen. Antes de que se pueda explorar esta relación detalladamente, es necesario saber qué tipo de elementos físicos existentes en la empresa, y decidir cuáles son las que deben estar sujetas al proceso de revisión del RCM. En la mayoría de los casos, esto significa que debe realizarse un registro de equipos completo si no existe ya uno. Más adelante, RCM hace una serie de preguntas acerca de cada uno de los elementos seleccionados, como sigue:

- **Cuáles son las funciones?**
- **De qué forma puede fallar?**
- **Qué causa que falle?**
- **Qué sucede cuando falla?**
- **Qué ocurre si falla?**
- **Qué se puede hacer para prevenir los fallas?**
- **Qué sucede si no puede prevenirse el falla?**

4.5.1 Funciones y sus Estándares de Funcionamiento

Cada elemento de los equipos debe de haberse adquirido para unos propósitos determinados. En otras palabras, deberá tener una función o funciones específicas. La pérdida total o parcial de estas funciones afecta a la organización en cierta manera. La influencia total sobre la organización depende de:

- La función de los equipos en su contexto operacional.
- El comportamiento funcional de los equipos en ese contexto.

Como resultado de esto el proceso de RCM comienza definiendo las funciones y los estándares de comportamiento funcional asociados a cada elemento de los equipos en su contexto operacional. Cuando se establece el funcionamiento deseado de cada elemento, el RCM pone un gran énfasis en la necesidad de cuantificar los estándares de funcionamiento siempre que sea posible. Estos estándares se extienden a la operación, calidad del producto, servicio al cliente, problemas del medio ambiente, costo operacional y seguridad.

4.5.2 Fallas Funcionales

Una vez que las funciones y los estándares de funcionamiento de cada equipo hayan sido definidos, el paso siguiente es identificar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones. Esto lleva al concepto de una **falla funcional**, que se define como la incapacidad de un elemento o componente de un equipo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado.

4.5.3 Modos de Falla (Causas de Falla)

El paso siguiente es tratar de identificar los **modos de falla** que tienen más posibilidad de causar la pérdida de una función. Esto permite comprender exactamente qué es lo que puede que se esté tratando de prevenir. En la realización de este paso, es importante identificar cuál es la causa origen de cada falla. Esto asegura no malgastar el tiempo y el esfuerzo tratando los síntomas en lugar de las causas. Al mismo tiempo, cada modo de falla debe ser considerado en el nivel más apropiado, evitando malgastar demasiado tiempo en el análisis de falla en sí mismo.

4.5.4 Efectos de los Fallas

Cuando se identifica cada modo de falla, los **efectos de las fallas** también deben registrarse (en otras palabras, lo que pasaría si ocurriera). Este paso permite decidir la importancia de cada falla, y por lo tanto qué nivel de mantenimiento (si lo hubiera) sería necesario. El proceso de contestar sólo a las cuatro primeras preguntas produce oportunidades sorprendentes y a menudo muy importantes de mejorar el funcionamiento y la seguridad, y también de eliminar errores. También mejora enormemente los niveles generales de comprensión acerca del funcionamiento de los equipos.

4.5.5 Consecuencias de las Fallas

Una vez sean determinadas las funciones, las fallas funcionales, los modos de falla y los efectos de los mismos en cada elemento significativo, el próximo paso en el proceso del RCM es preguntar cómo y (cuánto) importa cada falla.

La razón de esto es porque las consecuencias de cada falla dicen si se necesita tratar de prevenirlos. Si la respuesta es positiva, también sugieren con qué esfuerzo debemos tratar de encontrar las fallas. RCM clasifica las consecuencias de las fallas en cuatro grupos:

1. Consecuencias de las fallas no evidentes:

Las fallas que no son evidentes no tienen impacto directo, pero exponen a la organización a otras fallas con consecuencias serias, a menudo catastróficas. Un punto fuerte del RCM es la forma en que trata las fallas que no son evidentes, primero reconociéndolos como tales, en segundo lugar otorgándoles una prioridad muy alta y finalmente adoptando un acceso simple, práctico y coherente con relación a su mantenimiento.

2. Consecuencias en la seguridad y el medio ambiente:

Una falla tiene consecuencias sobre la seguridad si puede afectar físicamente a alguien. Tiene consecuencias sobre el medio ambiente si infringe las normas gubernamentales relacionadas con el medio ambiente. RCM considera las repercusiones que cada falla tiene sobre la seguridad y el medio ambiente, y lo hace antes de considerar la cuestión del funcionamiento. Pone a las personas por encima de la problemática de la producción.

3. Consecuencias Operacionales:

Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (capacidad, calidad del producto, servicio al cliente o costos industriales en adición al costo

directo de la reparación). Estas consecuencias cuestan dinero, y lo que cuesten sugiere cuanto se necesita gastar en tratar de prevenirlas.

4. Consecuencias que no son operacionales:

Las fallas evidentes que caen dentro de esta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, por lo que el único gasto directo es el de la reparación. Si una falla tiene consecuencias significativas en los términos de cualquiera de estas categorías, es importante tratar de prevenirlas. Por otro lado, si las consecuencias no son significativas, entonces no merece la pena hacer cualquier tipo de mantenimiento sistemático que no sea el de las rutinas básicas de lubricación y servicio. Por eso en este punto del proceso del RCM, es necesario preguntar si cada falla tiene consecuencias significativas. Si no es así, la decisión normal a falta de ellas es un mantenimiento que no sea sistemático. Si por el contrario fuera así, el paso siguiente sería preguntar qué tareas sistemáticas (si las hubiera) se deben de realizar. Sin embargo, el proceso de selección de la tarea no puede ser revisado significativamente sin considerar primero el modo de la falla y su efecto sobre la selección de los diferentes métodos de prevención.

4.5.6 Tareas de Mantenimiento

La mayoría de la gente cree que el mejor modo de mejorar al máximo la disponibilidad de la planta es hacer algún tipo de mantenimiento de forma rutinaria. El conocimiento de la Segunda Generación sugiere que esta acción

preventiva debe de consistir en una reparación del equipo o cambio de componentes a intervalos fijos. Supone que la mayoría de los elementos funcionan con precisión para un período y luego se deterioran rápidamente. El pensamiento tradicional sugiere que un informe histórico y extenso acerca de las fallas anteriores permitirá determinar la duración de los elementos, de forma que se podrían hacer planes para llevar a cabo una acción preventiva un poco antes de que fueran a fallar. Esto es verdad todavía para cierto tipo de equipos sencillos, y para algunos elementos complejos con modos de falla dominantes. En particular, las características de desgaste se encuentran a menudo donde los equipos entran en contacto directo con el producto. El reconocimiento de estos hechos ha persuadido a algunas organizaciones a abandonar por completo la idea del mantenimiento sistemático. De hecho, esto puede ser lo mejor que hacer para fallas que tengan consecuencias sin importancia. Pero cuando las consecuencias son significativas, se debe de hacer algo para prevenir las fallas, o por lo menos reducir las consecuencias. RCM reconoce cada una de las tres categorías más importantes de tareas preventivas, como siguen:

1. Tareas "A Condición": La necesidad continua de prevenir ciertos tipos de falla, y la incapacidad creciente de las técnicas tradicionales para hacerlo, han creado los nuevos tipos de prevención de fallas. La mayoría de estas técnicas nuevas se basan en el hecho de que la mayor parte de las fallas dan alguna advertencia de que están a punto de ocurrir. Estas advertencias se conocen como **fallas potenciales**, y se definen como las condiciones

físicas identificables que indican que va a ocurrir una falla funcional o que está en el proceso de ocurrir. Las nuevas técnicas son usadas para determinar cuando ocurren las fallas potenciales de forma que pueda hacerse algo antes de que se conviertan en verdaderas fallas funcionales. Estas técnicas se conocen como tareas a condición, porque los elementos sigan funcionando a condición de que continúen satisfaciendo los estándares de funcionamiento deseado.

2. Tareas de Reacondicionamiento Cíclico y de Sustitución Cíclica:

Los equipos son revisados o sus componentes reparados a frecuencias determinadas, independientemente de su estado en ese momento. Una gran ventaja del RCM es el modo en que provee criterios simples, precisos y fáciles de comprender para decidir (si hiciera falta) qué tarea sistemática es técnicamente posible en cualquier contexto, y si fuera así para decidir la frecuencia en que se hace y quien debe de hacerlo. Estos criterios forman la mayor parte de los programas de entrenamiento del RCM. El RCM también ordena las tareas en un orden descendiente de prioridad. Si las tareas no son técnicamente factibles, entonces debe tomarse una acción apropiada, descritas en el numeral 5.7.

4.5.7 ACCIONES A "FALTA DE"

Además de preguntar si las tareas sistemáticas son técnicamente factibles, el RCM pregunta si vale la pena hacerlas. La respuesta depende de cómo reaccione a las consecuencias de las fallas que pretende prevenir.

Al hacer esta pregunta, el RCM combina la evaluación de la consecuencia con la selección de la tarea en un proceso único de decisión, basado en los principios siguientes:

A. Una acción que signifique prevenir la falla de una función no evidente sólo valdrá la pena hacerla si reduce el riesgo de una falla múltiple asociado con esa función a un nivel bajo aceptable. Si no se puede encontrar una acción sistemática apropiada, se debe llevar a cabo la **tarea de búsqueda de fallas**.

Las tareas de búsqueda de fallas consisten en comprobar las funciones no evidentes de forma periódica para determinar si ya han fallado. Si no puede encontrarse una tarea de búsqueda de fallas que reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo aceptable, entonces la acción "a falta de" secundaria sería que la pieza debe rediseñarse.

B. Una acción que signifique el prevenir una falla que tiene consecuencias en la seguridad o el medio ambiente merecerá la pena hacerla si reduce el riesgo de esa falla en sí mismo a un nivel realmente bajo, o si lo suprime por completo. Si no puede encontrarse una tarea que reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo aceptable, **el componente debe rediseñarse**.

C. Sí la falla tiene consecuencias operacionales, sólo vale la pena realizar una tarea sistemática si el costo total de hacerla durante cierto tiempo es menor que el costo de las consecuencias operacionales y el costo de la reparación durante el mismo período de tiempo. Si no es justificable, la decisión "a falta de" será el **no mantenimiento sistemático**. (Si esto ocurre y las consecuencias operacionales no son aceptables todavía, entonces la decisión "a falta de" secundaria sería rediseñar de nuevo).

D. De forma similar, si una falla no tiene consecuencias operacionales, sólo vale la pena realizar la tarea sistemática si el costo de la misma durante un período de tiempo es menor que el de la reparación durante el mismo período. Si no son justificables, la decisión inicial "a falta de" sería de nuevo el **no mantenimiento sistemático**, y si el costo de reparación es demasiado alto, la decisión "a falta de" secundaria sería volver a diseñar de nuevo. Este enfoque gradual de "arriba-abajo" significa que las tareas sistemáticas sólo se especifican para elementos que las necesitan realmente. Esta característica del RCM normalmente lleva a una reducción significativa en los trabajos rutinarios. También quiere decir que las tareas restantes son más probables que se hagan bien. Esto combinado con unas tareas útiles equilibradas llevará a un mantenimiento más efectivo. Si esto compara el enfoque gradual tradicional de abajo a arriba. Tradicionalmente, los requerimientos del mantenimiento se evaluaban en términos de sus características técnicas reales o supuestas, sin considerar de nuevo que en diferentes condiciones son aplicadas consecuencias

diferentes. Esto resulta en un gran número de planes que no sirven para nada, no porque sean "equivocados", sino porque no consiguen nada.

El proceso del RCM considera los requisitos del mantenimiento de cada elemento antes de preguntarse si es necesario volver a considerar el diseño. Esto es porque el ingeniero de mantenimiento que está de servicio hoy tiene que mantener los equipos como están funcionando hoy, y no como deberían de estar o pueden que estén en el futuro.

4.6. El personal implicado

El proceso del RCM incorpora siete preguntas básicas. En la práctica el personal de mantenimiento no puede contestar a todas estas preguntas por sí mismos. Esto es porque muchas (si no la mayoría) de las respuestas sólo pueden proporcionarlas el personal operativo o el de producción. Esto se aplica especialmente a las preguntas que conciernen al funcionamiento deseado, los efectos de las fallas y las consecuencias de los mismos.

Por esta razón, una revisión de los requerimientos del mantenimiento de cualquier equipo debería de hacerse por equipos de trabajo reducidos que incluyan por lo menos una persona de la función del mantenimiento y otra de la función de producción. La antigüedad de los miembros del grupo es menos importante que el hecho de que deben de tener un amplio conocimiento de los equipos que se están estudiando. Cada miembro del grupo deberá también haber sido entrenado en RCM.

El uso de estos grupos no sólo permite que los directivos obtengan acceso de forma sistemática al conocimiento y experiencia de cada miembro del grupo, sino que además reparte de forma extraordinaria los problemas del mantenimiento y sus soluciones.

4.6.1 Los Facilitadores

Los grupos de revisión del RCM trabajan bajo la asesoría de un especialista bien entrenado en el RCM, que se conoce como un facilitador. Los facilitadores son el personal más importante en el proceso de revisión del RCM. Su papel es asegurar que:

- A.** Que RCM sea aplicado correctamente (que se hagan las preguntas correctamente y en el orden previsto, y que todos los miembros del grupo las comprendan.)
- B.** Que el personal del grupo (el de operación y mantenimiento) consiga un grado razonable de consenso general acerca de cuales son las respuestas a las preguntas formuladas.
- C.** Que no se ignore cualquier componente o equipo
- D.** Que las reuniones progresen de forma razonable
- E.** Que todos los documentos del RCM sean diligenciados debidamente.

4.6.2 Los Auditores

Luego de terminar la revisión de cada elemento de los equipos importantes, la persona que tenga la responsabilidad total de la operación necesitará comprobar que ha sido hecha correctamente y que está de acuerdo con la evaluación de las consecuencias de las fallas y la selección de las tareas. No tiene que efectuar la intervención personalmente, sino que pueden delegarla en otros que en su opinión estén capacitados para realizarla.

4.7. Los beneficios a conseguir por RCM

El RCM ha sido usado por una amplia variedad de industrias durante los últimos diez años. Cuando es aplicado correctamente produce los beneficios siguientes:

4.7.1 Mayor seguridad y protección del entorno, debido a:

- A.** Mejoramiento en el mantenimiento de los dispositivos de seguridad existentes.
- B.** La disposición de nuevos dispositivos de seguridad.
- C.** La revisión sistemática de las consecuencias de cada falla antes de considerar la cuestión operacional.
- D.** Claras estrategias para prevenir los modos de falla que puedan afectar a la seguridad, y para las acciones "a falta de" que deban tomarse si no se pueden encontrar tareas sistemáticas apropiadas.
- E.** Menos fallas causados por un mantenimiento innecesario.

4.7.2 Mejores rendimientos operativos, debido a:

- A.** Un mayor énfasis en los requisitos del mantenimiento de elementos y componentes críticos.
- B.** Un diagnóstico más rápido de las fallas mediante la referencia a los modos de falla relacionados con la función y a los análisis de sus efectos.
- C.** Menor daño secundario a continuación de las fallas de poca importancia (como resultado de una revisión extensa de los efectos de las fallas).
- D.** Intervalos más largos entre las revisiones, y en algunos casos la eliminación completa de ellas.
- E.** Listas de trabajos de interrupción más cortas, que llevan a paradas más cortas, más fácil de solucionar y menos costosas
- F.** Menos problemas de "desgaste de inicio" después de las interrupciones debido a que se eliminan las revisiones innecesarias.
- G.** La eliminación de elementos superfluos y como consecuencia los fallas inherentes a ellos.
- H.** La eliminación de componentes poco fiables.
- I.** Un conocimiento sistemático acerca de la operación..

4.7.3 Mayor Control de los costos del mantenimiento, debido a:

- A.** Menor mantenimiento rutinario innecesario
- B.** Mejor compra de los servicios de mantenimiento (motivada por el énfasis sobre las consecuencias de las fallas)
- C.** La prevención o eliminación de las fallas costos.

D. Unas políticas de funcionamiento más claras, especialmente en cuanto a los equipos de reserva

E. Menor necesidad de usar personal experto caro porque todo el personal tiene mejor conocimiento de la operación.

F. Pautas más claras para la adquisición de nueva tecnología de mantenimiento, tal como equipos de monitorización de la condición (“condition monitoring”)

4.7.4 Más larga vida útil de los equipos, debido al aumento del uso de las técnicas de mantenimiento “a condición”.

4.7.5 Una amplia base de datos de mantenimiento, que:

A. Reduce los efectos de la rotación del personal con la pérdida consiguiente de su experiencia y competencia.

B. Provee un conocimiento de las instalaciones más profundo en su contexto operacional.

C. Provee una base valiosa para la introducción de los sistemas expertos

D. Conduce a la realización de planos y manuales más exactos

E. Hace posible la adaptación a circunstancias cambiantes (tales como nuevos horarios de turno o una nueva tecnología) sin tener que volver a considerar desde el principio todas las políticas y programas de mantenimiento.

4.7.6 Mayor motivación de las personas, especialmente el personal que está interviniendo en el proceso de revisión. Esto lleva a un conocimiento general de la instalación en su contexto operacional mucho mejor, junto con un “compartir” más amplio de los problemas del mantenimiento y de sus

soluciones. También significa que las soluciones tienen mayores probabilidades de éxito.

4.7.7 Mejor trabajo de grupo, motivado por un planteamiento altamente estructurado del grupo a los análisis de los problemas del mantenimiento y a la toma de decisiones.

Esto mejora la comunicación y la cooperación entre:

A. Las áreas: Operación así como los de la función del mantenimiento.

B. Personal de diferentes niveles: los gerentes los jefes de departamentos, técnicos y operarios.

C. Especialistas internos y externos: los diseñadores de la maquinaria, vendedores, usuarios y el personal encargado del mantenimiento.

Muchas compañías que han usado círculos de calidad y RCM, en mantenimiento y han encontrado que el RCM les permite conseguir mucho más en el campo de la formación de equipos que en la de los círculos de calidad, especialmente en las instalaciones de alta tecnología. Todos estos factores forman parte de la evolución de la gestión del mantenimiento, y muchos ya son la meta de los programas de mejora. Lo importante del RCM es que provee un marco de trabajo paso a paso efectivo para realizarlos todos a la vez, y hace participar a todo el que tenga algo que ver con los equipos de los procesos.

4.8. CONCLUSIÓN

El RCM produce resultados muy rápidos. De hecho, la mayoría de las organizaciones pueden completar una revisión del RCM en menos de un año utilizando el personal existente. La revisión termina con una recopilación de la documentación, fiable y totalmente documentada del mantenimiento cíclico de todos los elementos significativos de cada equipo de la instalación. Si el RCM es usado correctamente para volver a evaluar los requisitos de mantenimiento de los activos existentes, transformará ambos requisitos y la forma en que es percibida la función mantenimiento como operación total. El resultado es un mantenimiento menos costoso, más armonioso y más eficaz.

5. ANALISIS DE CONFIABILIDAD

El análisis de confiabilidad, basado en la distribución de weibull, se obtiene de los datos históricos de fallas de los equipos, con ayuda de diversos programas de software, o mediante procedimientos gráficos, con ayuda de Excel como el descrito en shigley – Mischke. El objetivo final es relacionar la confiabilidad de los equipos y predecir su comportamiento, con estos datos. Si se relacionan muestras grandes y muestras pequeñas para la estimación de las mediciones se tiene: para muestras pequeñas la función de confiabilidad en el tiempo t_i de fallas (t_i) para un tamaño de muestra n se estima por :

$$R(t_i) = [(n - 1) + 0.7] / (n + 0.4)$$

- A. para una muestra grande, si el numero de unidades que sobreviene a un tiempo (t) se define como $N(t)$ y el numero total de unidades como N , entonces la confiabilidad es determinada por:

$$R(t) = N(t) / N$$

El análisis de distribución de las fallas se puede utilizar también para tomar acciones en el equipo, considerando que este conserva su comportamiento en un periodo futuro.

Las otras dos medidas de la tendencia central pueden ser de utilidad. La mediana es el valor de la variable que tiene la posibilidad de ser excedida en partes iguales. Es por tanto:

$$t_{\text{mediana}} = T_0 + (\eta)(\ln 2)^{1/\beta}$$

La moda es la observación con las mas alta posibilidad, con frecuencia es el punto mas estacionario de la función de probabilidades. Para la distribución de weibull es:

$$t_{\text{moda}} = T_0 + (\eta)[(\beta - 1) / \beta]^{1/\beta}$$

5.1. Modelos utilizados en confiabilidad.

El criterio de elección de un modelo se basará en técnicas descriptivas que se estudiarán en la sección correspondiente y especialmente en el conocimiento teórico que tengamos del proceso. Este conocimiento nos permitirá saber en muchas ocasiones que el proceso tiene tasa de fallos creciente, decreciente o en forma de bañera.

5.2-COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS

5.2.1.-Disponibilidad de Operación

Si observamos la situación de un equipo en algún instante cualquiera, podemos reconocer 2 situaciones.

- Equipo disponible para la operación
- Equipo no disponible para la operación

Estas situaciones la podemos representar en la siguiente escala de tiempo.

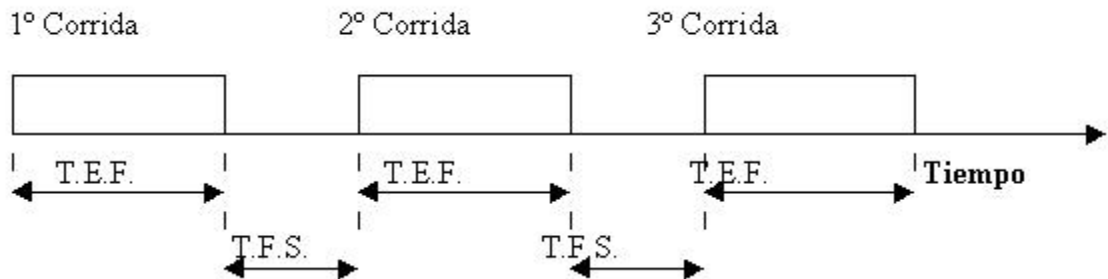


Figura 3.1: Disponibilidad de un equipo en el tiempo

Donde:

T.E.F. = Tiempo entre Fallas.

T.F.S. = Tiempo fuera de Servicio.

Se denomina "corrida" a la condición de servicio sin interrupción (por falla o detención para mantenimiento programada), esto se define para equipos reparables.

El equipo se caracteriza por los tiempos asociados a estos 2 eventos (En servicio y fuera de servicio).

El comportamiento de los equipos (máquina, sistema, etc.) se representa a través del comportamiento de los tiempos disponibles para la operación y el no disponible para ello.

Por otra parte una característica general de los diferentes "Tiempos" que se pueden definir es que ellos son "aleatorios".

Clasificación de los Tiempos según las características definidas.

- T.E.F. = Tiempo entre fallas definidas para elementos reparables.

T.P.E.F = Tiempo promedio entre fallas.

$$T.P.E.F = \frac{\sum Tpo.Servicio.}{N^{\circ}.Corridas} \quad (3.8)$$

- T.A.F. = Tiempo antes de la falla (definido para elementos no reparables)

T.P.A.F = Tiempo promedio hasta la falla.

El equipo se conoce cuando se conocen estos tiempos.

5.2.2.-Efectividad

A partir de estos tiempos se definen algunos conceptos relacionados entre sí, muy importantes en mantenimiento los cuales se definen y visualizan en la siguiente imagen:

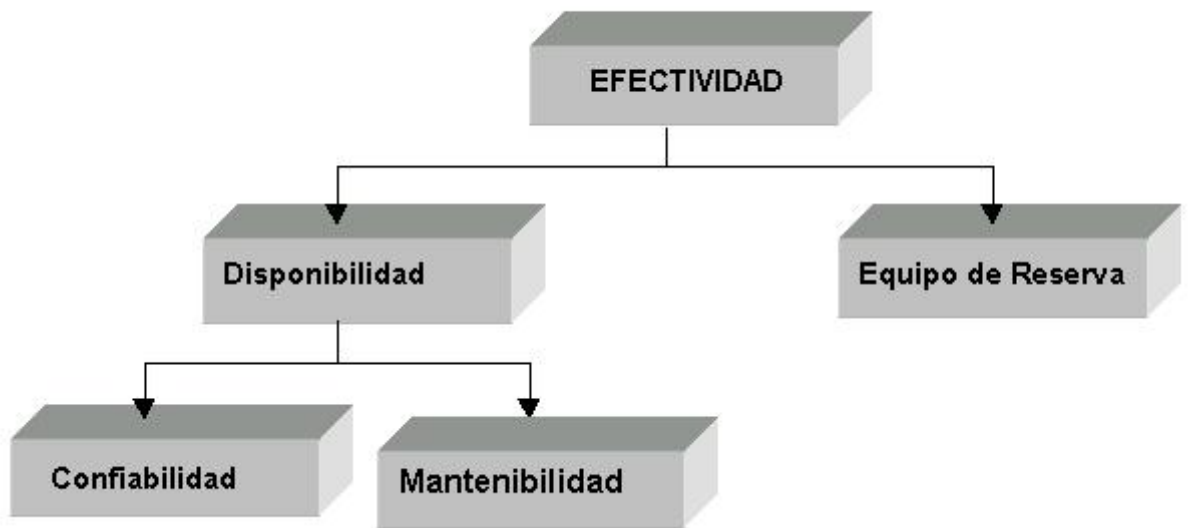


Figura 3.2: Componentes de la Efectividad

Definición de Efectividad

Probabilidad de que el sistema (Maquina o Equipo) realice las funciones requeridas conforme a los estándares establecidos durante un periodo determinado.

Equipo de reserva

Probabilidad de falla inaceptable (muy caro). Falla de alto costo (en los aviones se manejan equipos adicionales" se llaman equipos imposibles")

Disponibilidad

Probabilidad de que una maquina (sistema o elemento) este disponible para la operación (conforme a los estándares requeridos) durante un determinado periodo de tiempo.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\sum \text{Tpo. Servicio}}{\sum \text{Tpo. Servicio} + \sum \text{Tpo. Fuera Servicio}} \quad (3.9)$$

Confiabilidad

“Probabilidad de que una maquina (Sistema o elemento) no falle” durante un periodo de tiempo determinado. Este concepto será analizado con mayor profundidad mas adelante.

Mantenibilidad

Probabilidad de que el sistema (Maquina o equipo) realice las funciones requeridas conforme a los estándares establecidos durante un periodo determinado. Capacidad de volverlo al servicio en caso de falla.

La Mantenibilidad esta para evitar problemas, para esto está la Confiabilidad.

5.3.-CONFIABILIDAD

La confiabilidad se refiere a la permanencia de la calidad de los productos o servicios a lo largo del tiempo. Decimos que un aparato o componente es fiable si desarrolla adecuadamente su labor a lo largo de su vida útil. Un aparato fiable funcionará correctamente durante su vida, mientras que otro que no lo sea dará numerosos problemas. El estudio de la calidad, en una primera etapa, se limita a garantizar que el producto sale de fábrica en buenas condiciones. La confiabilidad intenta garantizar que el producto permanecerá en buenas condiciones durante un periodo razonable de tiempo. Los consumidores actuales exigen calidad/confiabilidad a cualquier bien duradero que adquieran: TV, Electrodomésticos, Automóviles o viviendas deben ser buenos al comprarlos y se les exige que durante un periodo de tiempo funcionen adecuadamente. De hecho la legislación evoluciona otorgando responsabilidad a fabricantes o constructores durante determinados periodos en los que deben hacerse cargo de los fallos de los productos por defectos ocultos que pudieran aparecer tras la adquisición y uso. La competencia en los mercados es tal, que la salida de productos o servicios de baja calidad/confiabilidad es cada vez más difícil y únicamente sobreviven a largo plazo aquellas empresas con una excelente imagen de calidad y confiabilidad. Los costes de no calidad o no confiabilidad son cada vez mayores. Existen sectores en los que la baja confiabilidad es inaceptable por motivos de seguridad:

Aeronáutica, Energía, Sanidad, Militar etc. En estos casos la confiabilidad es un requisito básico de la sociedad que hay que satisfacer.

El concepto más simple de confiabilidad es aquel que comprueba que el producto cumple ciertas especificaciones, y cuando esto ocurre, es enviado al cliente. El cliente por su parte acepta que el producto pueda fallar con el tiempo, y en algunos casos el período de garantía es una forma de prever esta posibilidad a corto plazo. Evidentemente fallos continuados, incluso durante el período de garantía, producen altos costes tanto al proveedor como al comprador, y esto sin considerar la probable pérdida de imagen de la empresa fabricante. Todo esto conduce a la necesidad de considerar un control de calidad basado en el tiempo. El control de calidad habitual, o de inspección, no tiene continuidad temporal: el producto pasa un control o no lo pasa. Pero nada garantiza que vaya a fallar pasado un cierto tiempo. El estudio de fallos de los productos en el dominio del tiempo es el campo de la confiabilidad, que así definida, está relacionada con fallos durante la vida del producto. La confiabilidad es por tanto un aspecto de la incertidumbre en ingeniería, ya que el hecho de que un sistema funcione durante un cierto período de tiempo, sólo puede ser estudiado en términos de probabilidades. De hecho la normativa británica (BS) define confiabilidad como la probabilidad de que un componente o sistema, desarrolle durante un periodo de tiempo dado la tarea que tiene encomendada sin fallos, y en las condiciones establecidas.

La definición de confiabilidad mediante conceptos probabilísticos, indica que cualquier intento de cuantificación pasa por la utilización de técnicas estadísticas que, según el problema, pueden llegar a ser muy sofisticadas. Así, mientras que el análisis de la calidad de los productos, notablemente más sencillo, ha sido bastante desarrollado en los últimos años, y los ingenieros de calidad disponen de una amplia bibliografía para introducirse en el tema, la fiabilidad no es tan fácilmente abordable. Los plazos de tiempo requeridos para realizar análisis de confiabilidad, y las técnicas estadísticas, no sencillas, utilizadas, impiden en la práctica un acercamiento natural al problema.

Debe observarse que hay cuatro atributos específicos de esta definición. Estos son: (1) probabilidad; (2) un funcionamiento adecuado; (3) calificación con respecto al entorno; y (4) tiempo. Los cuatro son importantes. Así los modelos de Confiabilidad serán desarrollados sucesivamente incluyendo secuencialmente en los mismos cada uno de los cuatro atributos.

Probabilidad: El resultado general que buscamos es poder cuantificar la posibilidad de no fallar. Así la probabilidad es la unidad de medida de la confiabilidad. Además sé, espera poder expresar la probabilidad de funcionamiento del sistema en términos de los componentes que lo integran.

Funcionamiento adecuado: El punto de partida para el estudio de la Confiabilidad es el funcionamiento correcto. Anteriormente, no definimos el

correcto funcionamiento. En cambio, señalamos el hecho de que el complemento del funcionamiento correcto es el fallo.

Entorno: Para examinar las relaciones entre el entorno de funcionamiento y la Confiabilidad, comenzamos con la pregunta de por qué fallan los equipos. Una respuesta razonable es que normalmente el fallo de un sistema se debe al fallo o fallos de uno o varios componentes. Esta es una razón por la que los modelos de estructura componentes-sistema son importantes. ¿Entonces por qué fallan los componentes? Una respuesta verosímil es que la operación de un sistema implica la imposición de fuerzas (energía) sobre el sistema y sus componentes. Estas fuerzas inducen y sostienen el progreso de varios tipos de procesos de deterioro, los cuales finalmente tienen como resultado el fallo de componentes.

Tiempo: La confiabilidad es la probabilidad de funcionamiento satisfactorio a lo largo del tiempo. El supuesto subyacente implícito es que en una muestra de dispositivos idénticos, la supervivencia (o duración de vida) se dispersa de una manera que se modela bien con la probabilidad y, por tanto, con una función de distribución. Por tanto, la extensión de las medidas de fiabilidad para incluir el tiempo implica la especificación de las distribuciones de probabilidad, las cuales deben ser modelos razonables de la dispersión de duración de vida. Este es el tema que se trata a continuación

5.3.1.-Función de Confiabilidad, vida media y tasa de falla

Notación: En lo que sigue, se denotará por **T** a la variable aleatoria continua que describe los tiempos de fallo de un determinado sistema, por lo tanto $T =$ "tiempo transcurrido hasta que se produce el fallo". Denotando por $f(t)$ a la función de densidad de probabilidad (f.d.p.) de T , y por $F(t)$ a su función de distribución (f.d.), se cumplirá:

$$P(a \leq T \leq b) = \int_a^b f(t) dt \quad (3.10)$$

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad (3.11)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.12)$$

La función de Confiabilidad $R(t)$, es la complementaria de la f.d.($F(t)$) , nos determina la probabilidad de que el sistema "sobreviva" al instante t (esta función determina la proporción de que el dispositivos inicial siga funcionando correctamente en el instante t) o sea que el lapso de duración del sistema sea mayor que un tiempo t . De acuerdo con lo anterior.

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (3.13)$$

Vida Media

Se llama **vida media** o **tiempo medio hasta el fallo** (*Mean Time To Failure*) de un dispositivo a la esperanza de la v.a. T , la vida media determina el tiempo de duración esperada de un dispositivo:

$$T.M.E.F = E[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (3.14)$$

Cuando se consideren dispositivos reparables (que puedan seguir funcionando tras un fallo), se hablará de "tiempo medio entre fallos" (T.M.E.F).

Tasa de Falla (Índice de Riesgo)

Con respecto a la tasa de falla se puede decir lo siguiente:

Es un indicador de cuan correlacionado con el tiempo en operación está la condición del equipo. Es una cantidad que permite determinar mayor o menor predictibilidad del tiempo de falla. Es una magnitud interesante en el ámbito o propósito del mantenimiento "basado en tiempo". Probabilidad de tener una falla (del sistema o elemento) entre los instantes "t" y "t+dt", en condiciones de que el sistema no haya fallado antes de "t". Se define la **tasa de fallo media** en el intervalo (t_1, t_2) como:

$$\lambda(t_1, t_2) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)}$$

Observar que $R(t_1) - R(t_2)$ representa la proporción de dispositivos totales que, habiendo sobrevivido al instante t_1 , han fallado en el intervalo (t_1, t_2) . Al dividir esta diferencia por $R(t_1)$ se obtiene la proporción de dispositivos supervivientes a t_1 que han fallado en (t_1, t_2) .

$$\frac{R(t_1) - R(t_2)}{R(t_1)} \quad (3.15)$$

Es la probabilidad condicional de que un dispositivo que haya sobrevivido al instante t_1 falle en el intervalo (t_1, t_2) . Finalmente, al dividir por la longitud del intervalo, obtenemos la proporción anterior (su media) por unidad de tiempo.

Haciendo tender t_2 a t_1 , obtenemos la llamada **tasa de fallo** o **tasa de riesgo**:

$$\lambda(t_1) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} = \frac{-R'(t_1)}{R(t_1)} = \frac{f(t_1)}{R(t_1)} \quad (3.16)$$

De lo anterior podemos expresar matemáticamente la tasa de falla como:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.17)$$

Demostración:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta F(\bar{t}) / \Delta t}{R(t)}; \quad \Delta F(t) = F(t + \Delta t) - F(t)$$

$$\bar{\lambda}(\bar{t}) = \frac{\Delta F / \Delta t}{1 - F(\bar{t})} = \frac{\Delta F / \Delta t}{R(\bar{t})} = \frac{f(\bar{t})}{R(\bar{t})} \quad \text{donde} \quad R(t) + F(t) = 1$$

Para datos discretos se puede calcular conforme a la expresión aproximada siguiente:

$$\bar{\lambda}(\bar{t}_i) = \frac{u_i}{N_g(s)} * \frac{1}{\Delta t_i} \quad (3.18)$$

Donde:

$\bar{\lambda}(\bar{t}_i)$ = Tasa de falla promedio en el intervalo de tiempo Δt_i

u_i = N° de fallas producidas en el intervalo de tiempo Δt_i

N_g = N° de sobrevivientes al comienzo del intervalo Δt_i

La tasa de fallo puede pues interpretarse como la "velocidad" a la cual se producen los fallos, es una medida de lo propenso que resulta el dispositivo a fallar en función de su edad. Observar que, a partir de la última ecuación, es posible expresar $R(t)$ como $(t):\lambda$ función de

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\left(\frac{dF(t)}{dt}\right)}{R(t)} = \frac{-1}{R(t)} * \frac{dR(t)}{dt} \Rightarrow \lambda(t)dt = \frac{-dR(t)}{R(t)}$$

Si ahora tomamos integrales a ambas partes:

$$\int_0^t h(u)du = \int_0^t \frac{dR(u)}{R(u)}du = -[\log R(u)]_0^t = -\log R(t)$$

De donde:

$$R(t) = e^{\left[-\int_0^t h(u)du\right]} \tag{3.19}$$

5.4 CONSIDERACIONES SOBRE LA TASA DE FALLOS

La evolución de la tasa instantánea de fallo, es decir la probabilidad de que un elemento que no ha fallado todavía en el instante t , falle en el instante siguiente $t+\Delta t$, es de suma importancia en el estudio de la fiabilidad de componentes, o en general en el análisis de cualquier fenómeno evolutivo. Su especificación va a constituir, por tanto, la piedra angular del modelo. En principio cualquier tasa de fallos puede ser adecuada dependiendo del modelo a estimar.

En la práctica suele ser habitual encontrar funciones constantes, crecientes o decrecientes dependiendo del tipo de fenómeno estudiado. De hecho los distintos procesos se van a definir según su tasa de fallos sea creciente (IFR o Increasing Failure Rate), decreciente (DFR o Decreasing Failure Rate) o Constante.

Tasa de fallos constante:

Indica que la probabilidad de fallo instantáneo es la misma en cualquier momento y consecuentemente el proceso no tiene memoria, ya que la posibilidad de fallo estando funcionando, es idéntica en cualquier momento de la vida del componente. A pesar de que esto pueda parecer irreal, este tipo de modelo es muy utilizado en la práctica, tanto por su sencillez como por el hecho de que representa bien los periodos intermedios de vida de muchos productos. Por ejemplo si se tienen componentes electrónicos cuya vida es muy larga instalados en sistemas que cuentan con elementos mecánicos de vida útil muy inferior, el modelo de tasa de fallos constante es perfectamente adecuado.

Cabe esperar tasas de fallo constantes cuando el fallo se produce por cargas excesivas que se producen aleatoriamente en el tiempo.

Tasa de fallos creciente:

Surge, en la mayoría de los casos por desgastes y fatigas, es decir por un proceso de envejecimiento. La tasa de fallos creciente indica que la probabilidad de fallo inmediato, teniendo en cuenta que el componente está funcionando, se

incrementa a medida que pasa el tiempo. Evidentemente a medida que un componente se hace más viejo, su tasa de fallos tenderá a crecer.

Tasa de fallos decreciente:

Se observa en productos cuya probabilidad de fallo es menor cuando aumenta el tiempo de supervivencia. Esto aparece a menudo en cualquier tipo de materiales: al principio de su funcionamiento la probabilidad de fallo es alta debido a la existencia de posibles defectos ocultos. A medida que transcurre el tiempo esta probabilidad se estabiliza a un nivel más bajo, pues si el elemento ha sobrevivido será porque no tenía ese defecto oculto. En este caso es conveniente realizar un control de calidad bajo stress a los elementos, ya que los que fallen se pueden eliminar desde el principio.

5.4.1.- Mecanismos de Falla

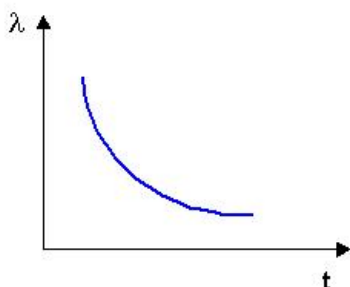
Los mecanismos de falla es una información interesante para poder determinar la forma (tendencia) de la tasa de falla para así poder predecir la falla a partir del tiempo de operación.

Estos mecanismos incluyen:

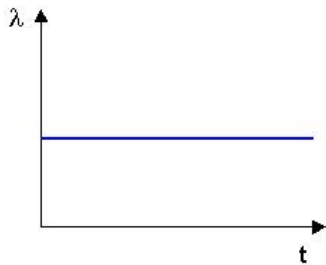
- **Fatiga:** el material es sujeto a esfuerzos alternados y las fallas son progresivas y ocurre como una extensión de grietas en pequeños incrementos.

- **Desgaste:** es el daño superficial en la cual hay una pérdida progresiva de material debida a contacto mecánico. El desgaste puede ser abrasivo, oxidativo, corrosivo.
- **Esfuerzos,** son fallas que se producen por sobrecarga.
- **Erosión,** destrucción del material por acción abrasiva de fluidos o partículas en movimiento.
- **Corrosión,** la reacción química o electromecánica entre un material y su medio ambiente. La erosión-corrosión, acción conjunta de erosión y corrosión en la presencia de un fluido en movimiento ya sea líquido o gas.
- **Cavitación,** degradación superficial debido a la implosión de gas o burbujas de vapor.
- **Corrosión acuosa,** ocurre a temperaturas relativamente bajas en la presencia de agua líquida. El comportamiento de la tasa de falla nos permite "observar" en que medida el tiempo en operación influye sobre la acción de los mecanismos de fallas. Respecto de los mecanismos de tasa de falla v/s tiempo, se tienen los siguientes casos.

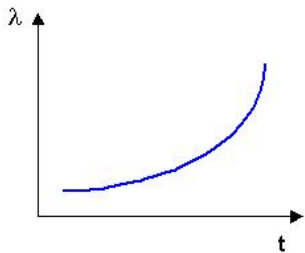
Caso1 Figura 3.3: Tasa de falla descendiente



Caso 2 Figura 3.4: Tasa de falla Constante



Caso 3 Figura 3.5: Tasa de Falla ascendente



Los mecanismos señalados en el caso 1 y caso 2 no tienen nada que ver con el tiempo en operación. En el caso 3 la falla está vinculada con el tiempo de operación. Importante: El comportamiento de la tasa de falla está determinado por los mecanismos de falla. En relación con esto, parece razonable el comportamiento siguiente:

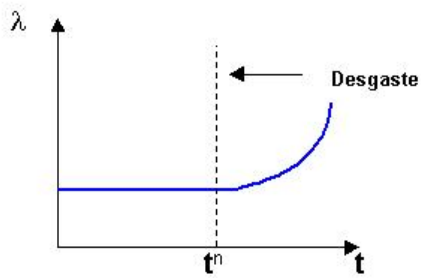


Figura 3.6: Desgaste de un Equipo

Esto implica que el equipo funciona "bien" durante el periodo $(0-t^n)$ y después se "desgasta". Esto es verdad para ciertos tipos de equipos sencillos y para algunos elementos complejos con modos de fallo dominante. En particular las características de desgaste se encuentran a menudo donde los elementos están en contacto directo. También las fallas son debidas a la corrosión o fatiga. ¿Cuál es el comportamiento de la tasa de falla para los distintos elementos? Se han hecho estudios que permiten reconocer la existencia de los siguientes modelos.

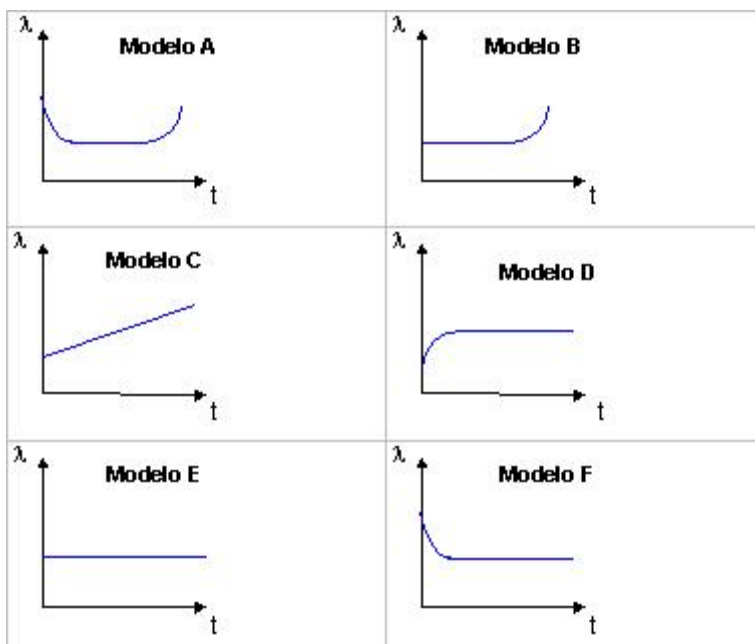


Figura 3.7: Comportamientos de la tasa de falla

De estos modelos, el modelo tradicionalmente se ha reconocido como válido para sistemas mecánicos es el A, conocido como "curva de la bañera"

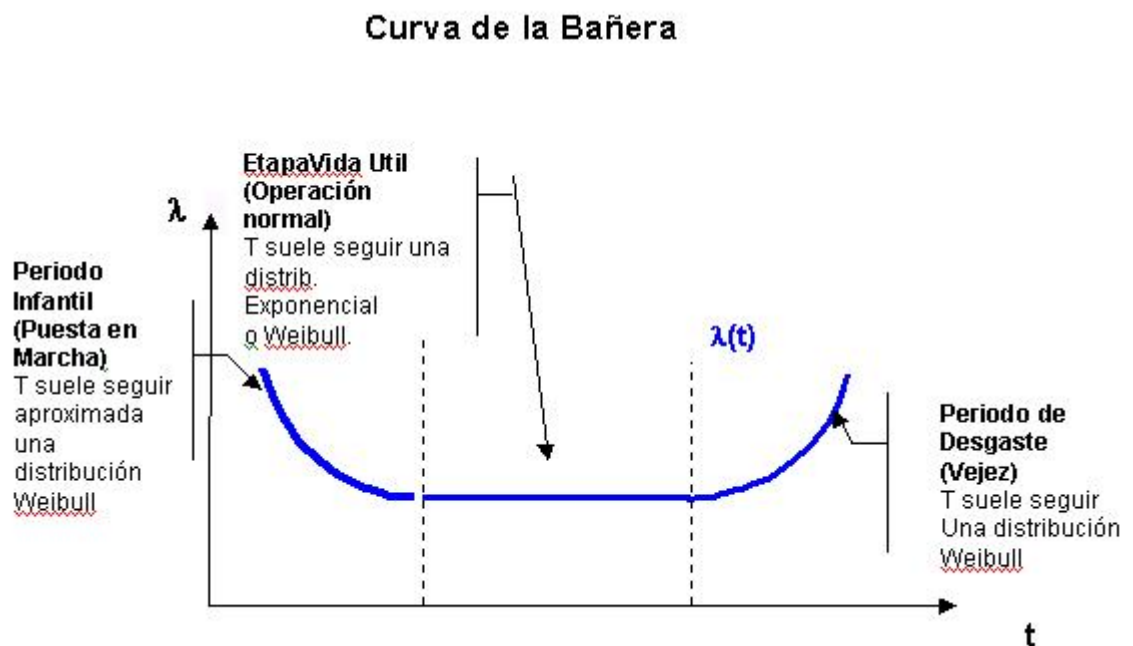


Figura 3.8: Curva de la Bañera

En la etapa de periodo infantil o puesta en marcha (tasa de falla decreciente) no es el desgaste el causante principal de las falla sino mas bien son los errores humanos los causantes de estas, mal montaje, fallas de diseños (es importante la supervisión y procedimientos claramente establecidos). En la etapa de vida útil o operación normal (tasa de falla constante), el mecanismo de falla no tiene nada que ver con el tiempo de operación, son fallas =1. El avión choca con un pájaro, son α que se producen por sobrecarga absolutamente aleatorios,

piedrazo a un auto. Uno no puede establecer un tiempo entre falla y el tiempo de operación. En el periodo de vejez o desgaste (tasa de falla creciente), el deterioro esta vinculado con el tiempo, antes de que falle se debería arreglar.

En la mayoría de los dispositivos electromecánicos, la función tasa de fallo tiene forma de bañera: cuando se inicia la vida de un aparato, la tasa de fallo instantánea resulta ser relativamente alta (es lo que se denomina "mortalidad infantil"); una vez que los componentes y partes electromecánicas se han acoplado, la tasa de fallo es relativamente constante y baja (etapa de "vida útil"); más adelante, tras un tiempo de funcionamiento, la tasa de fallo vuelve a incrementarse hasta que, finalmente, todos los dispositivos habrán fallado ("efecto envejecimiento").

Así, por ejemplo, muchos automóviles nuevos suelen presentar pequeños defectos de funcionamiento al poco de comprarse (elevada tasa de fallos inicial). Una vez solventados tales defectos, es de esperar que el vehículo proporcione un largo y complaciente período de funcionamiento (baja tasa de fallos intermedia. Mas tarde, conforme pasan los años, el automóvil se vuelve más propenso a sufrir averías hasta que, finalmente, después de 15 o 20 años, prácticamente todos los vehículos están inservibles (elevada tasa de fallos final). El mecanismo de falla está vinculado con el tiempo de operación para la etapa de desgaste no así para el periodo infantil y la etapa de vida útil.

5.4.2.- Ley de Falla $f(t)$

Es el modelo probabilístico asociado al comportamiento del tiempo entre fallas. Las leyes de falla que mejor parecen reflejan el comportamiento del T.E.F. son la "exponencial" y la "Weibull". La ley exponencial resulta particularmente adecuada para el estudio de la confiabilidad de sistemas eléctricos, en tanto que la ley de Weibull, lo es para sistemas mecánicos.

5.4.2.1.- Modelo de Weibull

Es una distribución probabilística versátil que permite modelar el cambio de la probabilidad en función del tiempo y que permite representar varios modelos estadísticos según sea el valor de alguno de sus parámetros.

Teniendo en cuenta la importancia del mantenimiento de los equipos, la utilización de la función de distribución de fallas se amplía, para predecir la influencia de las actividades del mantenimiento preventivo sobre su confiabilidad y disponibilidad. De esta forma la función de distribución de weibull, deja de ser una función que solo describe el comportamiento histórico de las fallas de un equipo para pasar a ser una herramienta que permite predecir la influencia del mantenimiento preventivo en el equipo.

El método propuesto, se inicia tomando un periodo donde se contabiliza el número de fallas que han ocurrido en un equipo (o una línea de producción),

este periodo de tiempo debe ser lo mas amplio, de forma que permita obtener un numero de datos de fallas que se puedan ajustar a una función de distribución. La totalidad de las fallas (N) que han sucedido en el periodo en estudio se analizan para identificar las causas de cada una de ellas, y de esta forma ubicar que tipo de falla es la que está ocurriendo con mayor frecuencia. De las (N) fallas se selecciona un subgrupo, de aquellas fallas que por su frecuencia y características se pueden controlar por medio del mantenimiento preventivo, a este grupo se les designa como fallas prevenibles.

Con los datos del momento en el cual ocurren las fallas, se procede a calcular el Tiempo Entre Fallas (TBF) que es el tiempo transcurrido entre dos fallas consecutivas. Con los datos de TBF se realiza un ajuste a la distribución de probabilidad, para lo cual se hace necesario calcular los parámetros β , η y T_0 de la distribución Weibull. Como resultado se obtiene la distribución $F(t)$ construida con la totalidad de las fallas durante el periodo de estudio, y con esta función se calcula la probabilidad de falla del equipo en un instante t .

A partir de los parametros de la función ajustada se obtiene el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), con el cual se puede predecir cuando se podrá presentar la siguiente falla si se mantienen las condiciones de operacion del equipo.

Su f.d.p es:

$$f(t; \alpha, \beta) = \frac{\alpha(t - \delta)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha} \quad x - \delta > 0, \quad t = \text{Tiempo en operación} \quad (3.20)$$

α = Parámetro de forma: Depende del mecanismo de desgaste.

β = Parámetro de escala (tpo) o también denominado característica de falla.

δ = Parámetro de posición.

Según la evidencia empírica se ha podido hacer una estimación del parámetro de forma para la distribución Weibull, para distintos mecanismos de falla.

Estas estimaciones se muestran a continuación en la siguiente tabla:

MECANISMO DE FALLA	α
Esfuerzo	1
Fatiga	1.3
Corrosión	2.5
Desgaste	3.5
Paradas Adm.	0.5

Tabla 3.1

Importante:

$\alpha < 1$, tasa de falla, descendente.

$\alpha = 1$, tasa de falla, constante.

$\alpha > 1$, tasa de falla, ascendente.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.21)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3.22)$$

$$\text{Si } \delta = 0 \Rightarrow F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}$$

$$E(t) = T.P.E.F. = \delta + \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad \Gamma(x) = \text{Función gamma} \quad (3.23)$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} \quad (3.24)$$

Para $\delta=0$ y $\beta=10$

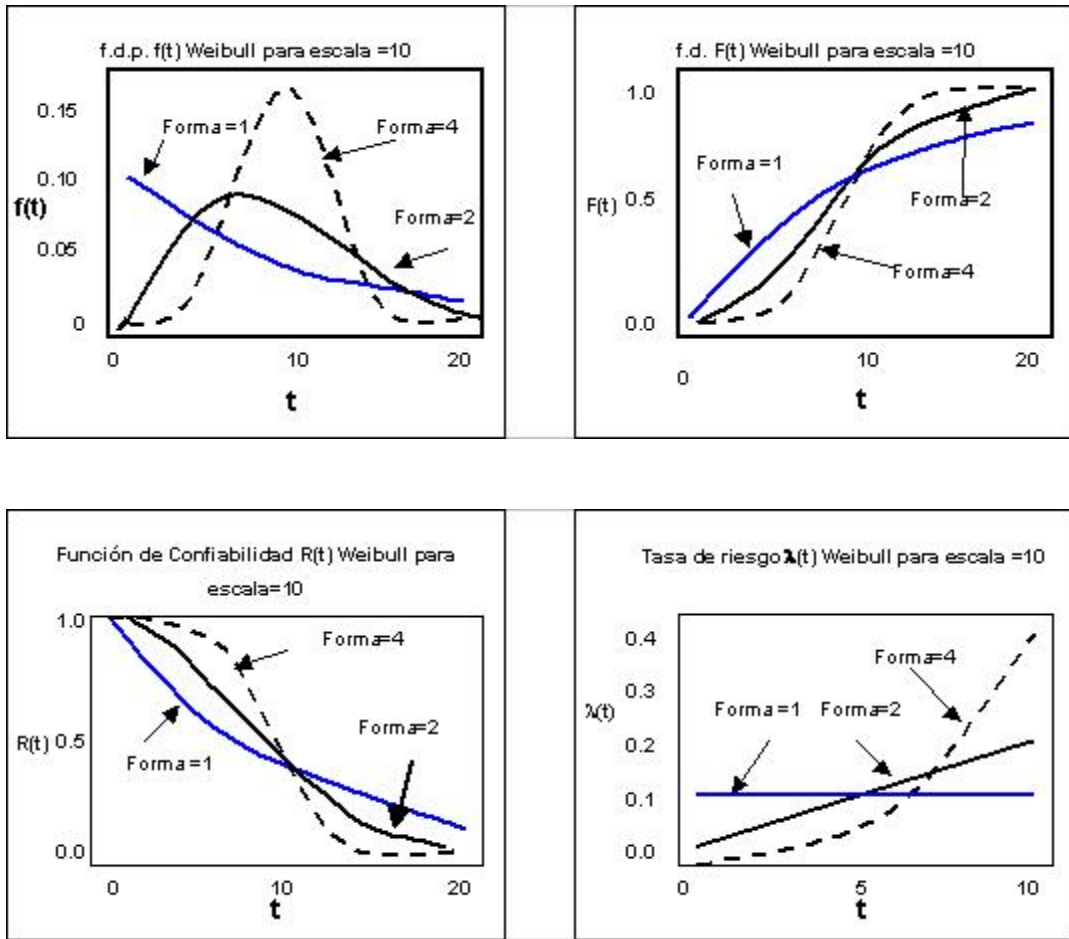


Figura 3.9: Relación entre la función de densidad de Probabilidad, y su Función de Distribución de Probabilidad, Confiabilidad y Tasa de Falla, para una distribución Weibull.

Si $\beta=1$ y $\delta=0$, corresponde a la Ley de fallas Exponencial.

5.4.2.2.- Modelo Exponencial

El modelo exponencial es el único que tiene tasa de fallos constante: la probabilidad de fallar condicionada a que el elemento esté en uso no varía con el tiempo. Esta propiedad se denomina falta de memoria.

Es una distribución que se utiliza para modelar el tiempo transcurrido entre dos sucesos aleatorios no muy frecuentes cuando la tasa de ocurrencia se supone constante. Una tasa de fallo constante significa que, para un dispositivo que no haya fallado con anterioridad, la probabilidad de fallar en el siguiente intervalo infinitesimal es independiente de la edad del dispositivo (ver figura)

Su f.d.p es.

$$f(t) = \frac{e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)}}{\beta} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \quad (3.25)$$

Como $\beta = 1/\lambda$, reemplazamos y obtenemos:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.26)$$

donde λ representa la tasa de falla y como además:

$$T.P.E.F = 1/\lambda \quad \text{se tiene que } T.P.E.F. = \beta \quad (3.27)$$

Por lo tanto lo práctico de la ley exponencial es que la tasa de falla es constante.

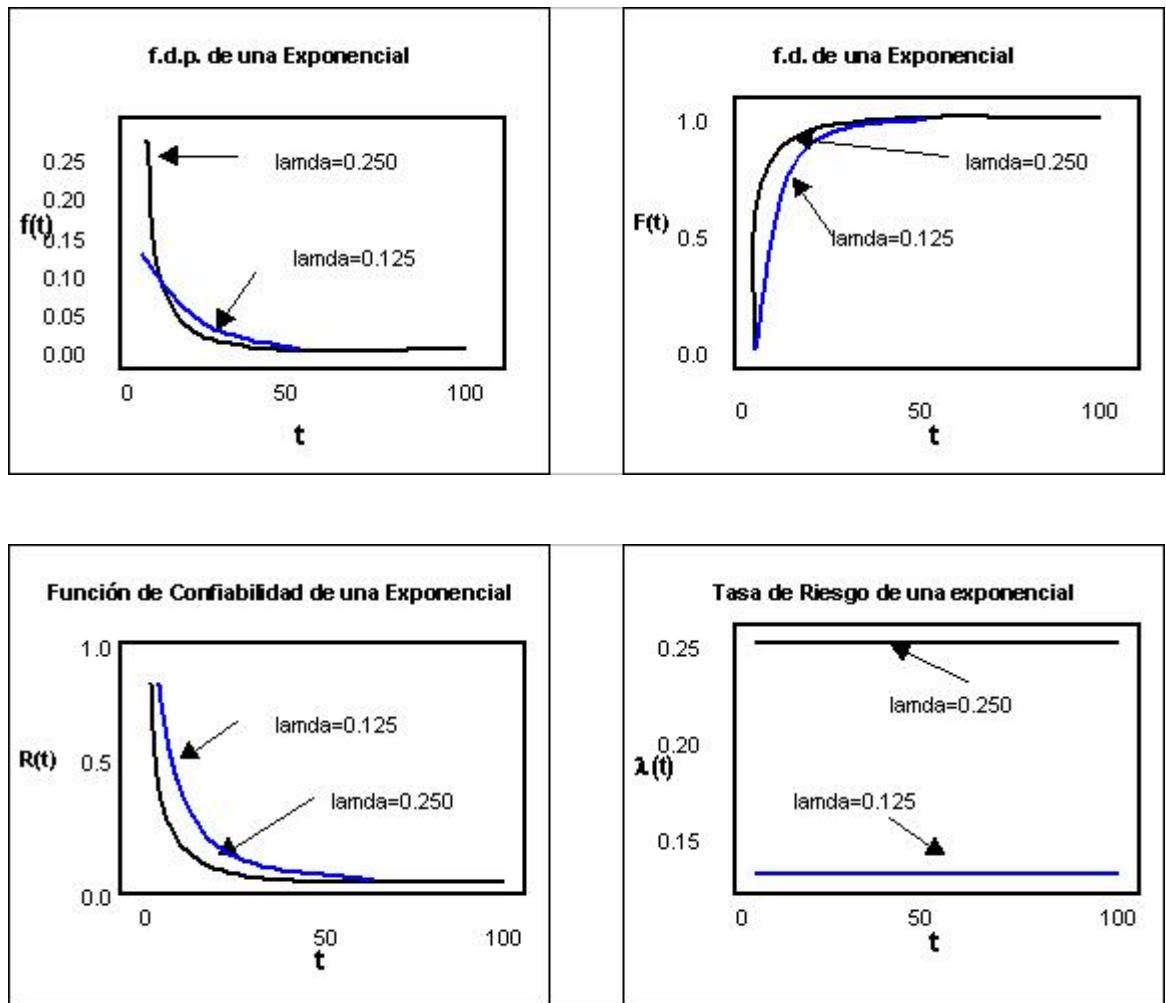


Figura 3.10: Relación entre la funciones de densidad de Probabilidad, y su función de distribución de Probabilidad de Falla, Confiabilidad y Tasa de Falla, para una distribución Exponencial.

5.4.3.- Predicción de la Confiabilidad

En el capítulo anterior definimos las funciones relacionadas con la Confiabilidad de una pieza o componente. La prevención de pérdidas o seguridad industrial aplicada con rigor científico está basada, en gran parte, en la aplicación de los

métodos probabilísticos a los problemas de fallos en los procesos industriales. Todo ello se ha llevado a cabo a través de una disciplina denominada **ingeniería de fiabilidad**, para la cual se disponen de las adecuadas técnicas de predicción, que han sido fundamentales para el aseguramiento de la calidad de productos y procesos.

La distribución de Weibull complementa a la distribución exponencial y a la normal, que son casos particulares de aquella, como veremos. A causa de su mayor complejidad sólo se usa cuando se sabe de antemano que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallos o cuando se han producido muchos fallos (al menos 10) y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple. En general es de gran aplicación en el campo de la mecánica.

Aunque existen dos tipos de soluciones analíticas de la distribución de Weibull (método de los momentos y método de máxima verosimilitud), ninguno de los dos se suele aplicar por su complejidad. En su lugar se utiliza la resolución gráfica a base de determinar un parámetro de origen (t_0). Un papel especial para gráficos, llamado papel de Weibull, hace esto posible. El procedimiento gráfico, aunque exige varios pasos y una o dos iteraciones, es relativamente directo y requiere, a lo sumo, álgebra sencilla.

La distribución de Weibull nos permite estudiar cuál es la distribución de fallos de un componente clave de seguridad que pretendemos controlar y que a través de nuestro registro de fallos observamos que éstos varían a lo largo del tiempo y dentro de lo que se considera tiempo normal de uso. El método no determina cuáles son las variables que influyen en la tasa de fallos, tarea que quedará en manos del analista, pero al menos la distribución de Weibull facilitará la identificación de aquellos y su consideración, aparte de disponer de una herramienta de predicción de comportamientos. Esta metodología es útil para aquellas empresas que desarrollan programas de mantenimiento preventivo de sus instalaciones.

Características generales

Sabemos que la tasa de fallos se puede escribir, en función de la fiabilidad, de la siguiente forma:

$$\lambda(t) = - \frac{\frac{d[R(t)]}{dt}}{R(t)}$$

$$Ó R(t) = \exp. [- \int \lambda(t) dt]$$

Siendo:

$\lambda(t)$ - Tasa de fallos

R (t) -confiabilidad

F (t) - Infiabilidad o Función acumulativa de fallos

t - Tiempo

En 1951 Weibull propuso que la expresión empírica más simple que podía representar una gran variedad de datos reales podía obtenerse escribiendo:

$$\int \lambda(t) dt = \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta$$

Por lo que la fiabilidad será:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Siendo:

t_0 - parámetro inicial de localización

η - parámetro de escala o vida característica

β - parámetro de forma

Se ha podido demostrar que gran cantidad de representaciones de fiabilidades reales pueden ser obtenidas a través de ésta ecuación, que como se mostrará,

es de muy fácil aplicación. La distribución de Weibull se representa normalmente por la función acumulativa de distribución de fallos $F(t)$:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

Siendo la función densidad de probabilidad:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

La tasa de fallos para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

Las ecuaciones (1), (2) y (3) sólo se aplican para valores de $(t - t_0) \geq 0$. Para valores de $(t - t_0) < 0$, las funciones de densidad y la tasa de fallos valen 0. Las constantes que aparecen en las expresiones anteriores tienen una interpretación física:

- t_0 es el parámetro de posición (unidad de tiempos) 0 vida mínima y define el punto de partida u origen de la distribución.
- η es el parámetro de escala, extensión de la distribución a lo largo, del eje de los tiempos. Cuando $(t - t_0) = \eta$ la fiabilidad viene dada por:
 $R(t) = \exp - (1)^\beta = 1/\exp 1^\beta = 1 / 2,718 = 0,368$ (36,8%)

Entonces la constante representa también el tiempo, medido a partir de $t_0 = 0$, según lo cual dado que $F(t) = 1 - 0,368 = 0,632$, el 63,2 % de la población se espera que falle, cualquiera que sea el valor de β ya que como hemos visto su valor no influye en los cálculos realizados. Por esta razón también se le llama usualmente vida característica.

- β es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta describiendo el grado de variación de la tasa de fallos. Las variaciones de la densidad de probabilidad, tasa de fallos y función acumulativa de fallos en función del tiempo para los distintos valores de β , están representados gráficamente en la Figura 1.

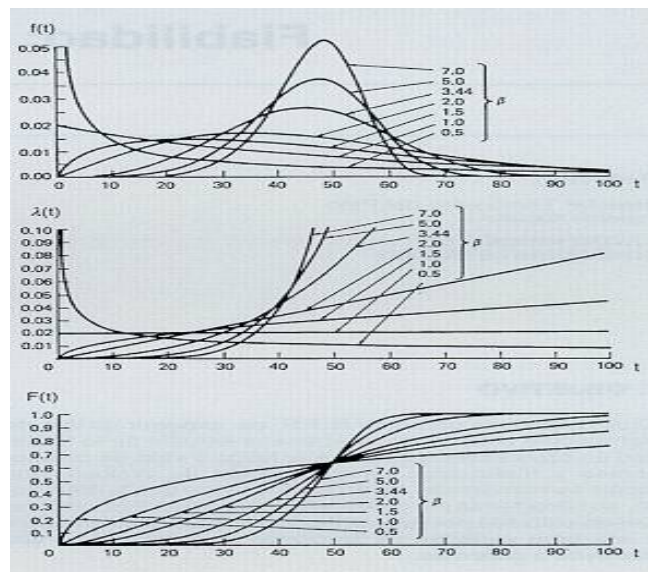


Fig. 1: Variación de la densidad de probabilidad $f(t)$, tasa de fallos $\lambda(t)$ y la función acumulativa de fallos $F(t)$ en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma β

Representación de los modos de fallo mediante la distribución de weibull

En el estudio de la distribución se pueden dar las siguientes combinaciones de los parámetros de Weibull con mecanismos de fallo particulares:

- a. $t_0 = 0$: el mecanismo no tiene una duración de fiabilidad intrínseca, y:
 - si $\beta < 1$ la tasa de fallos disminuye con la edad sin llegar a cero, por lo que podemos suponer que nos encontramos en la juventud del componente con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura.
 - si $\beta = 1$ la tasa de fallo se mantiene constante siempre lo que nos indica una característica de fallos aleatoria o pseudo-aleatoria. En este caso nos encontramos que la distribución de Weibull es igual a la exponencial.
 - si $\beta > 1$ la tasa de fallo se incrementa con la edad de forma continua lo que indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.
 - si $\beta = 3,44$ se cumple que la media es igual a la mediana y la distribución de Weibull es sensiblemente igual a la normal.
- b. $t_0 > 0$: El mecanismo es intrínsecamente fiable desde el momento en que fue puesto en servicio hasta que $t = t_0$, y además:
 - si $\beta < 1$ hay fatiga u otro tipo de desgaste en el que la tasa de fallo disminuye con el tiempo después de un súbito incremento

hasta t_0 ; valores de β bajos ($\sim 0,5$) pueden asociarse con ciclos de fatigas bajos y los valores de b más elevados ($\sim 0,8$) con ciclos más altos.

- si $\beta > 1$ hay una erosión o desgaste similar en la que la constante de duración de carga disminuye continuamente con el incremento de la carga.

c. $t_0 < 0$. Indica que el mecanismo fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar la toma de datos, de otro modo

- si $\beta < 1$ podría tratarse de un fallo de juventud antes de su puesta en servicio, como resultado de un margen de seguridad bajo.
- si $\beta > 1$ se trata de un desgaste por una disminución constante de la resistencia iniciado antes de su puesta en servicio, por ejemplo debido a una vida propia limitada que ha finalizado o era inadecuada.

6.0 ANALISIS DE CONFIABILIDAD DE WEIBULL

Uno de los problemas fundamentales de la distribución de Weibull es la evaluación de los parámetros (t_0, η, β) de esta distribución. Para ello se dispone de dos métodos: a través únicamente del cálculo mediante el método de los momentos o el de máxima verosimilitud, en el que intervienen ecuaciones diferenciales difíciles de resolver, por lo que se utilizan poco, y mediante la resolución gráfica, que utiliza un papel a escala funcional llamado papel de Weibull o gráfico de Allen Plait que es el que vamos a desarrollar.

Resolución gráfica

El papel de Weibull (fig. 2 y 3) está graduado a escala funcional de la siguiente forma:

En el eje de ordenadas se tiene: $\ln \ln [1 / 1 - F(t)]$ (Doble logaritmo neperiano)

En el eje de abscisas, tenemos: $\ln (t - t_0)$

Existen tres casos posibles en función del valor de t_0

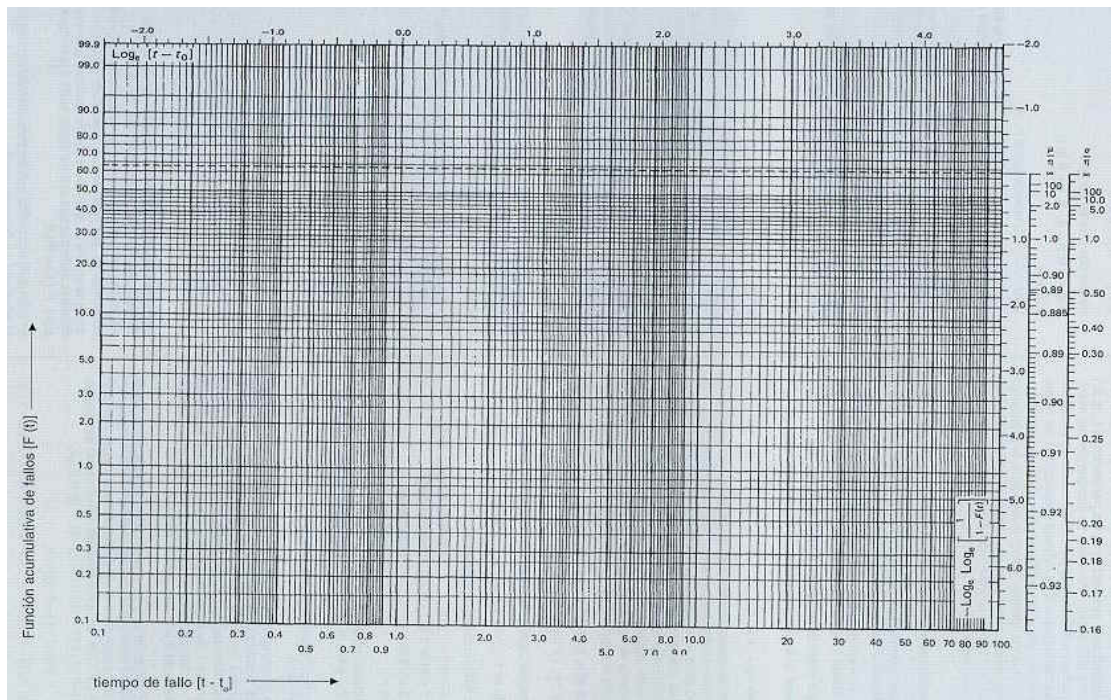


Fig. 2: Muestra del papel de Weibull

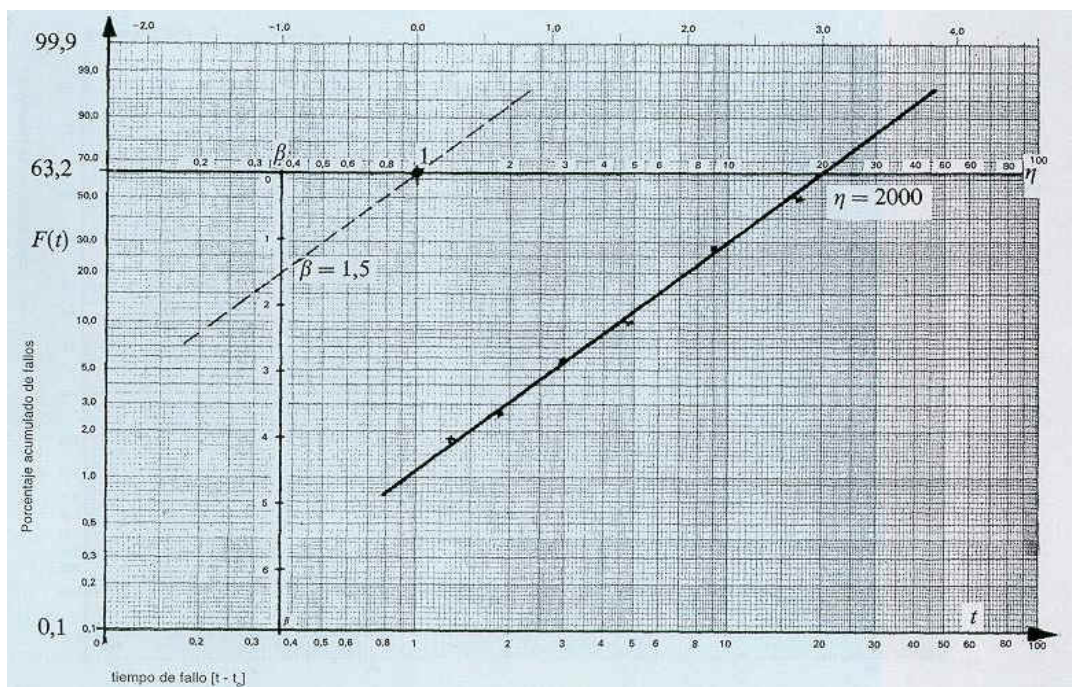


Fig. 3: Lectura de los parámetros h y β en el papel de Weibull

Caso de $t_0 = 0$

Demostramos que cualquier grupo de datos que sigan la distribución de Weibull se pueden representar por una línea recta en el papel de Weibull. Partimos de la hipótesis de que el origen es perfectamente conocido y que coincide con los datos experimentales. Desde el punto de vista matemático partimos de la fórmula que nos relaciona la fiabilidad con la in fiabilidad y teniendo en cuenta la expresión (1):

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp - (t / \eta)^\beta$$

$$1 / [1 - F(t)] = \exp (t / \eta)^\beta$$

Tomando logaritmos neperianos por dos veces:

$$\ln \ln 1 / [1 - F(t)] = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

Si a esta igualdad le aplicamos

$$X = \ln t \text{ (variable función de } t)$$

$$Y = \ln \ln 1 / [1 - F(t)] \text{ (función de } t)$$

$$B = - \beta \ln \eta \text{ (constante)}$$

$$A = \beta \text{ (coeficiente director)}$$

De donde tenemos:

$$Y = AX + B \text{ (ecuación de una recta) (4)}$$

Para determinar los parámetros β y η se utiliza el papel de Weibull.

- Cálculo de β : β es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta. Para calcularlo, se hace pasar una recta paralela a la recta obtenida con la representación gráfica de los datos de partida por el punto 1 de abscisas y 63,2 de ordenadas pudiendo leer directamente el valor de β en una escala tabulada de 0 a 7. Ver gráfico en fig. 3.
- Cálculo de η : η es el parámetro de escala y su valor viene dado por la intersección de la recta trazada con la línea paralela al eje de abscisas correspondiente al 63,2 % de fallos acumulados. En efecto se demuestra que para la ordenada $t_0 = 0$, $F(t) = 63,2$.

$$Y = \ln \ln 1 / [1 - F(t)] = 0$$

$$\ln 1 / [1 - F(t)] = 1; 1 / [1 - F(t)] = e; 1 - F(t) = 1/e;$$

$$F(t) = 1 - [1/e] = 1 - [1/2,7183] = 1 - 0,3679 = 0,6321 \text{ (63,21 \%)}$$

De donde para $t_0 = 0$ tendremos que $AX + B = 0$; como según hemos visto anteriormente:

$$A = \beta B = -\beta \ln \eta$$

Tendremos que se cumple:

$$\beta X - \beta \ln \eta = 0; \beta X = \beta \ln \eta;$$

$$X = \ln \eta$$

Como $X = \ln t$, tenemos que $t = \eta$.

η es el valor leído directamente en el gráfico de Allen Plait para la ordenada 63,2, ya que la escala de abscisas está como ya se ha indicado en $\ln t$.

- Tiempo medio entre fallos (MTBF) o media: el tiempo medio entre fallos o vida media se calcula con la ayuda de la tabla 1, que nos da los valores de gamma y vale: $E(t) = \text{MTBF} = \eta \Gamma(1 + 1/\beta)$
- Desviación estándar o variancia σ : se calcula también con la ayuda de la tabla 1 y vale: $(\sigma/\eta)^2 = \Gamma(1 + 2/\beta) - [\Gamma(1 + 1/\beta)]^2$

Tabla 1: confiabilidad

LEY DE WEIBULL:

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$$MTBF = m = E(t) = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \qquad \sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]$$

β	$m/\eta = \Gamma(1+1/\beta)$	σ/η	β	$m/\eta = \Gamma(1+1/\beta)$	σ/η
0	∞	∞	2,0	0,8862	0,463
0,1	101	$\sqrt{201 - (101)^2}$	2,1	0,8857	0,44
0,2	120	1901	2,2	0,8856	0,42
0,3	9,2605	47	2,3	0,8859	0,41
0,4	3,3234	10,43	2,4	0,8865	0,39
0,5	2,0000	4,472	2,5	0,8873	0,38
0,6	1,5046	2,645	2,6	0,8882	0,37
0,7	1,2658	1,851	2,7	0,8893	0,36
0,8	1,1330	1,428	2,8	0,8905	0,34
0,9	1,0522	1,171	2,9	0,8917	0,33
1,0	1,0000	1,000	3,0	0,8938	0,32
1,1	0,9649	0,878	3,1	0,8943	0,315
1,2	0,9407	0,785	3,2	0,8957	0,31
1,3	0,9235	0,716	3,3	0,8970	0,30
1,4	0,9114	0,659	3,4	0,8984	0,29
1,5	0,9028	0,613	3,5	0,8998	0,28
1,6	0,8966	0,594	3,6	0,9011	0,27
1,7	0,8922	0,580	3,8	0,9038	0,26
1,8	0,8893	0,512	4,0	0,9064	0,25
1,9	0,8874	0,486			

Ejemplo

La información disponible acerca de la duración de 10 sistemas mecánicos de detectores de presencia sometidos a funcionamiento continuo hasta que se produce un fallo, da los siguientes resultados, expresados por su duración en meses y ordenados : 1,7; 3,5 ; 5; 6; 8; 11; 13; 18 y 22.

Calcular las probabilidades acumuladas o valores medios clasificados, los parámetros de Weibull, tipo de fallo, la fiabilidad de forma general, fiabilidad para 12 meses, la duración media de vida y la desviación tipo.

Solución: Con la ayuda de la tabla 2, que nos da directamente los valores medios clasificados de los fallos o probabilidades acumuladas según el tamaño de la muestra que en este caso es $n = 10$, tendremos:

Tiempo de fallo	Valores medios clasificados [F (t)]
1,7	0,0670
3,5	0,0163
5	0,2594
6	0,3557
8	0,4519
9	0,5481
11	0,6443
13	0,7406
18	0,8368
22	0,9330

Tabla 2: Valores medios clasificados de fallos en función del tamaño de la muestra (columnas) y del número medio de fallos acumulados (filas)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0,5000	0,2929	0,2063	0,1591	0,1294	0,1091	0,0943	0,0830	0,0741	0,0670	0,0611	0,0561	0,519	0,0483	0,0452	1
2		0,7071	0,5000	0,3864	0,3147	0,2655	0,2295	0,2021	0,1806	0,1632	0,1489	0,1368	0,1266	0,1178	0,1101	2
3			0,7937	0,6136	0,5000	0,4218	0,3648	0,3213	0,2871	0,2594	0,2366	0,2175	0,2013	0,1873	0,1751	3
4				0,8409	0,6853	0,5782	0,5000	0,4404	0,3935	0,3557	0,3244	0,2982	0,2760	0,2568	0,2401	4
5					0,8706	0,7345	0,6352	0,5596	0,5000	0,4519	0,4122	0,3789	0,3506	0,3263	0,3051	5
6						0,8909	0,7705	0,6787	0,6065	0,5481	0,5000	0,4596	0,4253	0,3958	0,3700	6
7							0,9057	0,7979	0,7129	0,6443	0,5878	0,5404	0,5000	0,4653	0,4350	7
8								0,9170	0,8194	0,7406	0,6756	0,6211	0,5747	0,5347	0,5000	8
9									0,9259	0,8368	0,7634	0,7018	0,6494	0,6042	0,5650	9
10										0,9330	0,8511	0,7825	0,7240	0,6737	0,6300	10
11											0,9389	0,8632	0,7987	0,7432	0,6949	11
12												0,9439	0,8743	0,8127	0,7599	12
13													0,9481	0,8822	0,8249	13
14														0,9517	0,8899	14
15															0,9548	15

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1	0,0424	0,0400	0,0378	0,0358	0,0341	0,0330	0,0315	0,0301	0,0288	0,0277	0,0266	0,0256	0,0247	0,0239	0,0231	1
2	0,1034	0,09775	0,0922	0,0874	0,0831	0,0797	0,0761	0,0728	0,0698	0,0670	0,0645	0,0621	0,0599	0,0579	0,0559	2
3	0,1644	0,1550	0,1465	0,1390	0,1322	0,1264	0,1207	0,1155	0,1108	0,1064	0,1023	0,0986	0,0951	0,0919	0,0888	3
4	0,2254	0,2125	0,2009	0,1905	0,1812	0,1731	0,1653	0,1582	0,1517	0,1457	0,1402	0,1351	0,1303	0,1259	0,1217	4
5	0,2865	0,2700	0,2553	0,2421	0,2302	0,2198	0,2099	0,2009	0,1927	0,1851	0,1781	0,1716	0,1655	0,1599	0,1546	5
6	0,3475	0,3275	0,3097	0,2937	0,2793	0,2665	0,2545	0,2437	0,2337	0,2245	0,2159	0,2081	0,2007	0,1939	0,1875	6
7	0,4085	0,3850	0,3641	0,3453	0,3283	0,3132	0,2992	0,2864	0,2746	0,2638	0,2538	0,2445	0,2359	0,2279	0,2204	7
8	0,4695	0,4425	0,4184	0,3968	0,3774	0,3599	0,3438	0,3291	0,3156	0,3032	0,2917	0,2810	0,2711	0,2619	0,2533	8
9	0,5305	0,5000	0,4728	0,4484	0,4264	0,4066	0,3884	0,3718	0,3566	0,3425	0,3295	0,3175	0,3063	0,2959	0,2862	9
10	0,5915	0,5575	0,5272	0,5000	0,4755	0,4533	0,4330	0,4145	0,3975	0,3819	0,3674	0,3540	0,3415	0,3299	0,3191	10
11	0,6525	0,6150	0,5816	0,5516	0,5245	0,5000	0,4776	0,4572	0,4385	0,4212	0,4053	0,3905	0,3767	0,3639	0,3519	11
12	0,7135	0,6725	0,6359	0,6032	0,5736	0,5466	0,5223	0,5000	0,4795	0,4606	0,4431	0,4270	0,4119	0,3979	0,3848	12
13	0,7746	0,7300	0,6903	0,6547	0,6226	0,5933	0,5669	0,5427	0,5204	0,5000	0,4810	0,4635	0,4471	0,4319	0,4177	13
14	0,8356	0,7875	0,7447	0,7063	0,6717	0,6400	0,6115	0,5854	0,5614	0,5393	0,5189	0,5000	0,4823	0,4659	0,4506	14
15	0,8966	0,8450	0,7991	0,7579	0,7207	0,6867	0,6561	0,6281	0,6024	0,5787	0,5568	0,5364	0,5176	0,5000	0,4835	15
16	0,9576	0,9025	0,8535	0,8095	0,7698	0,7334	0,7007	0,6708	0,6433	0,6180	0,5946	0,5729	0,5528	0,5340	0,5164	16
17		0,9600	0,9078	0,8610	0,8188	0,7801	0,7454	0,7135	0,6843	0,6574	0,6325	0,6094	0,5880	0,5680	0,5493	17
18			0,9622	0,9126	0,8678	0,8268	0,7900	0,7562	0,7253	0,6967	0,6704	0,6459	0,6232	0,6020	0,5822	18
19				0,9642	0,9169	0,8735	0,8346	0,7990	0,7662	0,7361	0,7082	0,6824	0,6584	0,6360	0,6151	19
20					0,9659	0,9202	0,8792	0,8417	0,8072	0,7754	0,7461	0,7189	0,6936	0,6700	0,6480	20
21						0,9669	0,9238	0,8844	0,8482	0,8148	0,7840	0,7554	0,7288	0,7040	0,6808	21
22							0,9684	0,9271	0,8891	0,8542	0,8218	0,7918	0,7640	0,7380	0,7137	22
23								0,9698	0,9301	0,8935	0,8597	0,8283	0,7992	0,7720	0,7466	23
24									0,9711	0,9329	0,8976	0,8648	0,8344	0,8060	0,7795	24
25										0,9722	0,9354	0,9013	0,8696	0,8400	0,8124	25
26											0,9733	0,9378	0,9048	0,8740	0,8453	26
27												0,9743	0,9400	0,9080	0,8782	27
28													0,9752	0,9420	0,9111	28
29														0,9760	0,9440	29
30															0,9768	30

La representación de estos puntos en el gráfico de Weibull nos dá prácticamente una recta (fig. 4). La pendiente de esta recta es 1,5 valor que corresponde al parámetro β ; por otro lado se puede ver gráficamente que η es igual a 12, que es el valor de la abscisa en el punto donde la recta trazada con los datos corta a la horizontal para $F(t) = 63,2$.

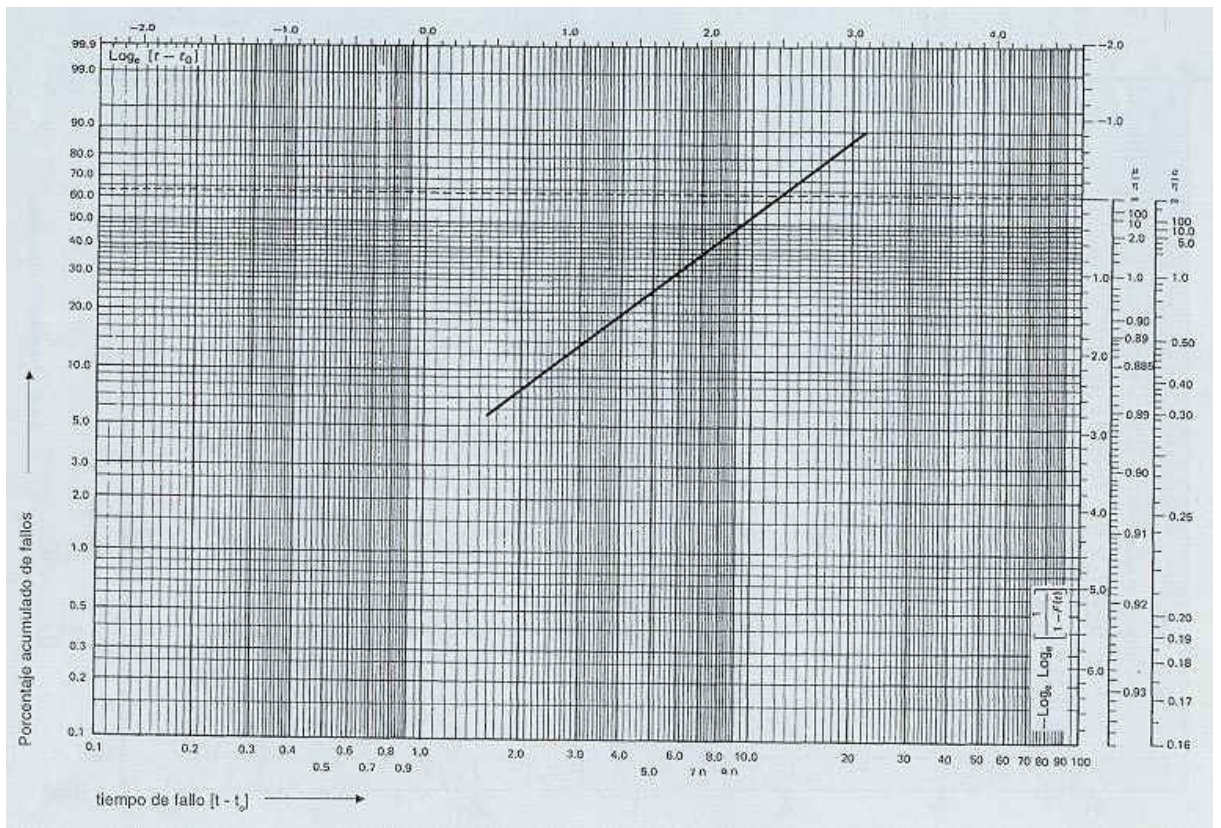


Fig. 4: Resolución gráfica del ejemplo

El valor de β nos indica que los tipos de fallo son debidos al desgaste. La fiabilidad será:

$$R(t) = \exp - (t / 12)^{1,5}$$

La fiabilidad para 12 meses será:

$$R(t) = \exp - (12/12)^{1,5} = \exp - 1 = 0,3679 \text{ (36,79\%)}$$

Gráficamente vemos que para $t = 12$ la probabilidad acumulada de fallos $F(t) = 63,2$ por lo que $R(12) = 1 - F(12) = 1 - 0,632 = 0,368$ (36,8 %) valor sensiblemente igual al calculado.

La duración de vida media será:

$$E(t) = \text{MTBF} = \eta \Gamma(1 + 1/\beta)$$

$$\text{MTBF} = 12 \Gamma(1 + 1/1,5) = 12 \cdot 0,9028 = 10,83 \text{ meses}$$

La desviación tipo será:

$$\sigma^2 = \eta^2 [\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)]$$

Para $\beta = 1,5$ y según las tablas nos da el valor de $\sigma / \eta = 0,613$ que como

$$\eta = 12 \text{ tenemos que: } \sigma = 12 \cdot 0,613 = 7,356 \text{ meses.}$$

Caso de $t_0 > 0$

Para este caso los datos no se alinean adoptando la forma indicada en el gráfico de la fig. 5. Los datos tienen forma de curva que admite una asíntota vertical; la intersección de la asíntota con la abscisa nos permite obtener una primera estimación de t_0 . En efecto, tenemos que:

$$F(t) = 0 = 1 - \exp - \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta$$

$$\text{de donde } 1 = \exp - \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta$$

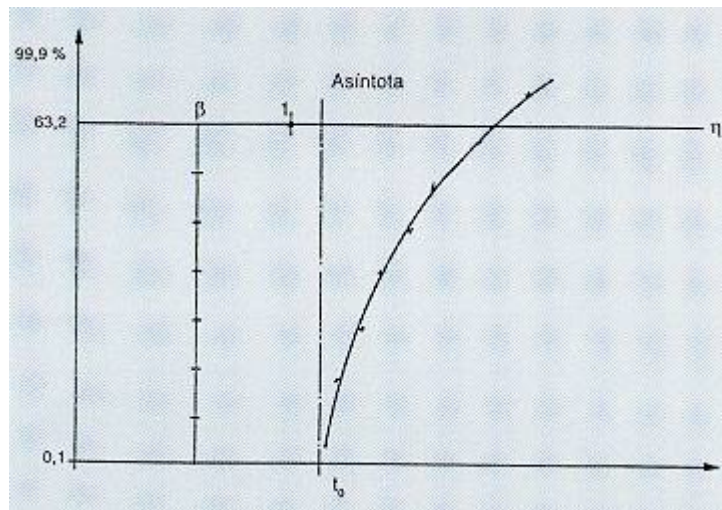


Fig. 5: Representación gráfica para el caso de $t_0 > 0$

Sacando logaritmos neperianos:

$$\ln 1 = 0 = - \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta$$

y elevando a $1/\beta$ tendremos:

$$\left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta = 0^{1/\beta} = 0; \quad t - t_0 = 0; \quad t - t_0$$

De donde se obtiene la evaluación de t_0 . Cuando se ha evaluado t_0 , se lleva a cabo la corrección:

$$t' = t - t_0$$

t' = nuevo tiempo

t = antigua estimación

A continuación se trasladan los nuevos valores, debiéndose obtener algo parecido a una recta; si no es así, se comenzará de nuevo la operación y esto hasta un máximo de tres veces; si se sigue sin obtener una recta, podemos deducir que no se aplica la ley de Weibull o que podemos tener leyes de Weibull con diferentes orígenes, o mezcladas.

Caso de $t_0 < 0$

En este caso, se obtiene una curva que admite una asíntota inclinada u horizontal. Una manera de calcular t_0 es mediante ensayos sucesivos, hasta que se pueda dibujar la curva.

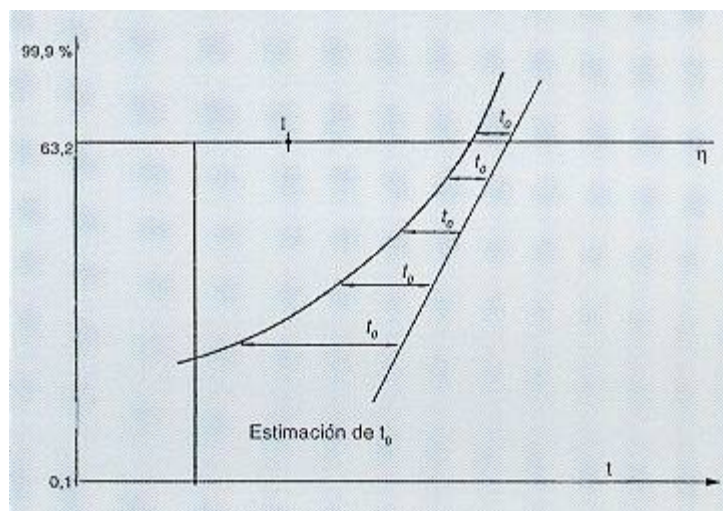


Fig. 6: Representación gráfica para el caso de $t_0 > 0$

Otro método de cálculo cuando $t_0 \neq 0$

Dada la complejidad que representa lo descrito con anterioridad existen otras formas más sencillas de calcular t_0 mediante la estimación.

Método de estimación o de los rangos medianos (Fig. 7): el método se inicia, una vez dibujada la curva, seleccionando un punto arbitrario Y_2 aproximadamente en la mitad de la curva, y otros dos puntos Y_1 e Y_3 equidistantes del primero una distancia d según el eje de las Y.

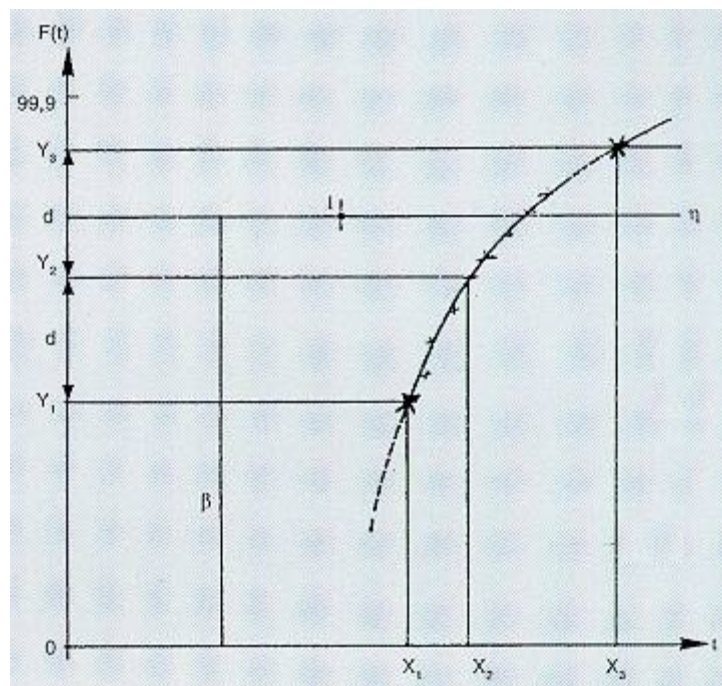


Fig. 7: Cálculo de t_0 por medio de transformaciones funcionales

Lógicamente se cumplirá la igualdad:

$$Y_2 - Y_1 = Y_3 - Y_2$$

De la ecuación anterior y si los tres puntos son colineales tendremos por otra parte:

$$X_2 - X_1 = X_3 - X_2$$

y como $X = \ln(t - t_0)$ tendremos:

$$\ln(t_2 - t_0) - \ln(t_1 - t_0) = \ln(t_3 - t_0) - \ln(t_2 - t_0)$$

$$(t_2 - t_0)^2 = (t_3 - t_0)(t_1 - t_0)$$

$$\text{de otra forma } t_0 = t_2 \frac{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2) - (t_2 - t_1)}$$

De esta forma el valor de t_0 puede ser calculado y los datos representados utilizando $(t - t_0)$ como variable. Si los datos siguen la distribución de Weibull los puntos deberán quedar alineados.

Como variante de lo anterior se puede proceder de la siguiente forma: asignar los puntos según el siguiente criterio:

$Y_{\text{máx}}$ es el valor máximo al cual se asocia $X_{\text{máx}}$.

$Y_{\text{mín}}$ es el valor mínimo al cual está asociado $Y_{\text{mín}}$.

Y_m . es el punto medio (medido con una regla lineal) de $Y_{m\acute{a}x}$ e $Y_{m\acute{i}n}$

X_m . es X medio asociado al Y_m . Obtenido.

De esta forma el valor de t_0 sera:

$$t_0 = X_m \frac{(X_{m\acute{a}x} - X_m)(X_m - X_{m\acute{i}n})}{(X_{m\acute{a}x} - X_m) - (X_m - X_{m\acute{i}n})}$$

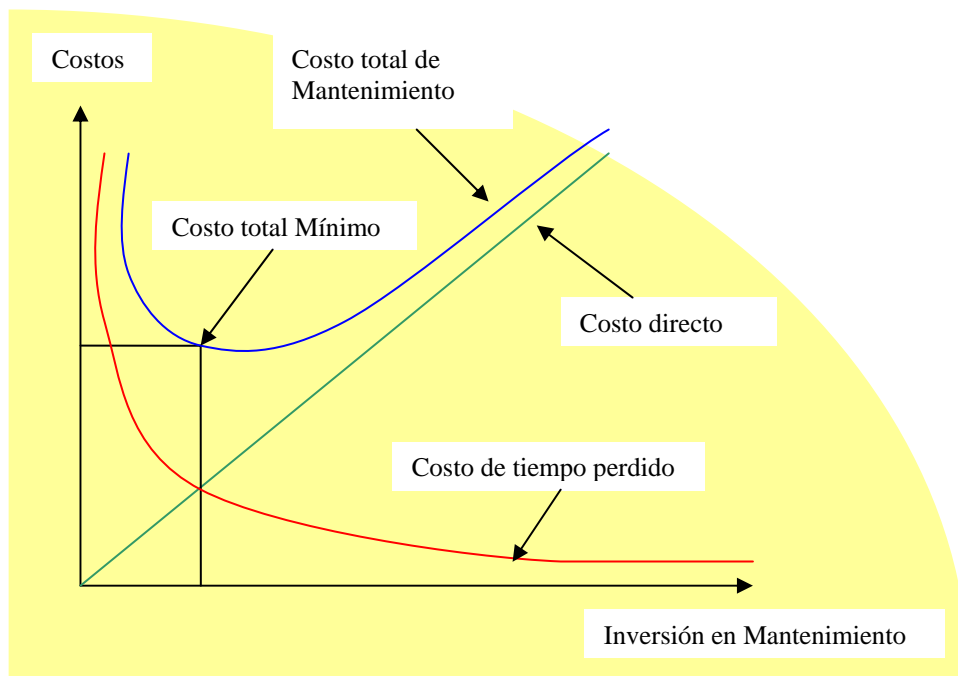
6.1 Otros Modelos

Otros modelos habitualmente utilizados en el estudio de duraciones de vida son:

- _ Distribución Gamma
- _ Distribuciones Normal y Lognormal
- _ Distribuciones con tasa de fallos polinómicas.
- _ Distribución de Gompertz.

7- Evaluación del tiempo óptimo de reemplazo de equipos

El objetivo del proceso de optimización de los costos del mantenimiento, es determinar los intervalos óptimos de mantenimiento, para aumentar la productividad de los equipos y minimizar el costo total del departamento, ahora bien el nivel óptimo es el punto en el que los costos totales, que combinan costos directos, tiempo perdido y deterioro excesivo, son mínimos, como se muestra en la figura, lo cual se presenta cuando el costo directo se aproxima al costo indirecto.



El análisis de los costos del mantenimiento programado y no programado, sirve para resolver el problema optimizar el proceso de mantenimiento, cuando se utiliza un sistema asistido por computador.

El costo del mantenimiento programado $C_s(t)$ en un tiempo dado t_0 se expresa como:

$$C_s(t) = t_0 \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{t_i} \right)$$

Donde t_i es el termino i del tiempo medio para fallas, y el C_i es el termino i de la acción de mantenimiento.

El costo de mantenimiento no programado $C_u(t)$ se estima por

$$C_u(t) = t / t_0 \sum_{i=1}^n (f_i C_i)$$

Donde el termino f_i es el termino i del periodo de acción de mantenimiento no programada durante el tiempo t_0 .

Ambos la probabilidad de supervivencia de un equipo y la probabilidad de ocurrencias de fallas se presenta en el mismo tiempo. Con base en esta consideración, el costo total de mantenimiento $C_m(t)$ asociando los dos tipos de mantenimiento puede determinarse por:

$$C_m(t) = C_s(t) + C_u(t)$$

El problema es minimizar $C_m(t)$ para calcular el ciclo óptimo de mantenimiento t^*

Este problema se puede solucionar diferenciando $C_m(t)$ con respecto a t , e igualando a cero. Esta ecuación para un periodo de estudio dado se puede generalizar, planteando que el ciclo de mantenimiento óptimo es igual a la frecuencia seleccionada por la raíz cuadrada de la razón de costo de mantenimiento programado sobre costo de mantenimiento no programado.

$$t^* = t_0 (C_s / C_u)^{0.5}$$

El análisis de costo permite adicionalmente, realizar el estudio técnico – económico de los demás índices de gestión y determinar el nivel de mantenimiento óptimo para la operación económica de los equipos.

APLICACIONES

Uno de los problemas más representativos en la industria de nuestro país es la mala implementación de planes de mantenimientos a las maquinarias industriales, lo que se refleja directamente en la eficiencia, tiempo y calidad en la producción.

Una de los objetivos del minor de *Mantenimiento de Maquinaria*, corresponde al desarrollo de un proyecto final, en el cual se analizará un sistema mecánico en particular para aplicar los conocimientos y herramientas adquiridas durante el periodo pedagógico.

La presente monografía tiene relación con el mantenimiento de un compresor de aire perteneciente a la empresa AGRECON. Con este trabajo se pretende complementar los conocimientos adquiridos durante el curso, lográndose un conocimiento más complejo del equipo en estudio y una aplicación práctica de los tópicos vistos en clase.

A continuación se describe el estudio y el diseño de un sistema de mantenimiento preventivo basado en el método estadístico de weibull a un compresor de la empresa AGRECON

Contenido

El objetivo de este trabajo es analizar el mantenimiento mecánico de un equipo y proponer un programa de mantenimiento preventivo conveniente desde el punto de vista económico. La máquina elegida corresponde a un compresor de aire marca COMPAIR BROOMWADE LTD., de tipo tornillo perteneciente a la empresa AGRECON. Ésta actualmente realiza solo un mantenimiento correctivo, la cual consiste en esperar que el equipo falle o que funcione deficientemente para solicitar el servicio de mantenimiento a un contratista especializado. Este en su visita, determina los componentes defectuosos y, según las horas de servicio que tenga el equipo, recomienda un mantenimiento correspondiente a su estado actual.

Para realizar el análisis, se debió conocer el funcionamiento del compresor y cada uno de sus componentes más importantes, además de recopilar información necesaria para saber el estado actual de operación y las fallas que haya tenido en el pasado (historial de fallas). Con estos antecedentes se pudo

dividir el equipo en sistemas y subsistemas que permitieran analizar los posibles y más frecuentes modos de fallar de la máquina, necesario para proponer un plan de mantenimiento técnico adecuado para la máquina y a un costo conveniente.

Para determinar este plan se ocuparon los pasos propuestos en el método de mantenimiento basada en la confiabilidad (RBM) cuyo objetivo es elaborar un programa de mantenimiento preventivo que garantice la seguridad de funcionamiento, teniendo en cuenta las restricciones económicas. Para lograr dicho objetivo, se dividió la fábrica en sectores que permitieran visualizar la importancia de la máquina para el proceso productivo, luego se hizo una clasificación de fallas, otorgándoles índices de gravedad y frecuencia que permitieran jerarquizarlas, junto con esto se realiza un análisis de fallas, a través del cual se obtienen las fallas más graves y comunes que necesitan la atención de la empresa para hacerles un mantenimiento preventivo.

Para el análisis de fallas, se llenan tablas con las causas y efectos que originan estas, se hacen diagramas de bloques funcionales de la máquina y árboles de fallas que permiten identificar de mejor forma, los componentes y sistemas funcionales más importantes para realizarles mantenimiento periódico y planificado a través de un plan técnico de mantenimiento. Para saber si dicho plan es el más conveniente desde el punto de vista económico, se realiza un estudio del costo total involucrado, comparado con la política actual de la empresa. Como resultado se obtiene el plan de mantenimiento más adecuado.

Un estudio complementario se realiza en el tema de la tasa de fallas de los distintos componentes, para establecer el tiempo en que el equipo está disponible y, en que momento o con que periodicidad, se le debe realizar la intervención preventiva del equipo. Para esto se ocupa el modelo de confiabilidad de Weibull, donde se determinan los parámetros necesarios para establecer la tasa de falla en función del tiempo, el tiempo medio entre fallas y la probabilidad o confiabilidad de que éstas ocurran en el intervalo de tiempo especificado.

Para verificar la hipótesis de que la distribución de los tiempos entre fallas siguen una distribución de Weibull, se realiza el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov, el cual arrojó como resultado que la hipótesis está correcta con un nivel de significancia de 5%. Además se abordaron algunos tópicos de Mantenimiento Productivo Total (TPM) e indicadores asociados, los cuales definen un programa para mejorar la efectividad de los equipos con la participación activa de los operadores de las máquinas de producción. Se realizó una evaluación del tiempo óptimo para reemplazar el equipo, un análisis de criterios de selección de estrategias más adecuadas de mantenimiento y un

cálculo de número de inspecciones óptimo para realizar mantenimiento preventivo.

Por último, se estudió las decisiones a tomar al inicio de cada período tiempo, para minimizar el costo esperado de mantenimiento, sobre los costos límites para realizar overhaul y se planificó un mantenimiento de 8000 hrs.

3.- ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

El compresor de aire escogido pertenece a la empresa **AGREGADOS Y CONCRETOS S.A.**, Empresa Líder en la costa atlántica de Colombia en la producción de concreto.

Dedicada al suministro de concreto en todas sus presentaciones para toda la costa atlántica. Dicha empresa se encuentra ubicada en Mamonal entrada a Arroz Barato L-1

4.- DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo mecánico escogido es un compresor de aire de las siguientes características:

Fabricante: COMPAIR BROOMWADE LTD.
Modelo: 6025E
Tipo: Compresor de tornillo
Potencia: 19 [kW]
Presión: 8 [bar]
Caudal: 2.83 [m³/min]

5.- FUNCIONAMIENTO DEL COMPRESOR

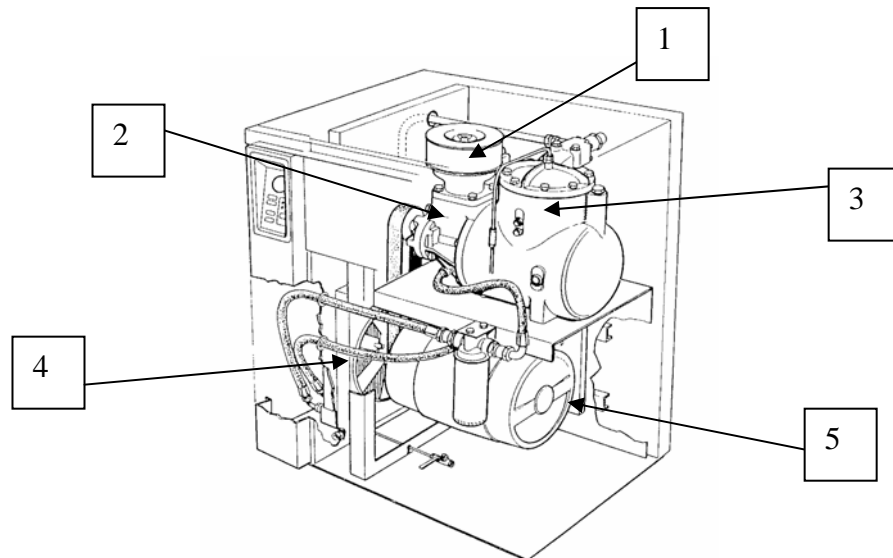


Figura 1. Partes del Compresor

PARTES DEL COMPRESOR

En la figura 1, se muestra un dibujo esquemático del compresor de aire y se indican algunas de sus principales partes.

1 ® Sistema de admisión de aire

Componentes: Filtro de Aire

2 ® Unidad Compresora

Componentes: tornillos compresores, más rodamientos de apoyo.

3 ® Unidad Separadora

Componentes: elemento separador, línea de barrido, depósito de aceite.

4 ® Sistema Refrigeración

Radiador, mangueras, filtro de aceite, ventilador.

Radiador de aire.

5 ® Motor Eléctrico

FUNCIONAMIENTO

El aire entra por la unidad de admisión, luego es comprimido por los tornillos compresores en la unidad compresora, el aire comprimido pasa a la unidad separadora la cual separa el aceite del aire. Posteriormente el aire sale a la línea. El aceite que queda en el compresor pasa a través del filtro y se dirige al radiador enfriador para seguir su camino nuevamente hacia la unidad compresora.

6.- CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL COMPRESOR

Debido a las características propias de funcionamiento de la fábrica, los compresores deben suministrar un caudal de aire continuo a la línea que alimenta las máquinas que funcionan con aire comprimido. Los compresores están regulados de tal forma, que unos trabajan *en punta* y otros funcionan como *respaldo*, lo que depende principalmente de la demanda de aire comprimido. Algunos de ellos trabajan hasta 24 horas seguidas.

Las horas de trabajo de los compresores varían entre 270 horas mensuales aproximadamente. Estas dependen de la temporada, demanda de trabajos, etc. El compresor está aislado, fuera del área de producción. No necesita de un operario durante su funcionamiento, sin embargo hay un encargado de encenderlo y apagarlo.

7. Condiciones Actuales de Mantenimiento

La empresa en estos momentos solo realiza un mantenimiento correctivo debido a que cuentan con equipos en stanbay. Este mantenimiento consiste en esperar que el equipo falle o que el equipo funcione deficientemente para solicitar el servicio de mantenimiento a un contratista especializado, este en su visita determina los componentes defectuosos y, según las horas de servicio que tenga el equipo, recomendará un mantenimiento correspondiente a su estado actual

Para este tipo de equipo, el fabricante recomienda mantenciones cada 1000 horas de trabajo, 4000 horas de trabajo, 8000 horas y un mantenimiento completa denominada *overhaul*, pasada las 25000 horas de trabajo. La empresa Agrecon, al no realizar las mantenciones preventivas del equipo, recomendadas por el proveedor, provoca que al momento de solicitar el servicio de mantenimiento, el contratista tenga que proponer una mantenimiento equivalente, que considere todas las mantenciones que no fueron realizadas a su debido tiempo.

7.1- Los mantenimientos por horas de servicio según proveedor

El detalle de las actividades propuestas por el proveedor se mencionan a continuación:

a) Mantenimiento de 1000 hrs.

Cambio filtro de aire

Cambio filtro de aceite

Cambio de aceite

Costo de referencia incluyendo mano de obra e insumos necesarios:\$127.000

b) Mantenimiento de 4000 hrs.

Cambio filtro de aire

Cambio filtro de aceite

Cambio de aceite

Cambio de elemento separador

Cambio de empaquetadura

Cambio de anillo Oring

Prueba de equipo en operación

Costo de referencia incluyendo mano de obra e insumos necesarios:\$235.000

c) Mantenimiento de 8000 hrs.

Filtro de aire

Filtro de aceite

Elemento separador

Kit válvulas Succión

Kit válvulas Presión mínima

Kit sellos

Kit filtro regulador

Correa transmisión

Cambio aceite

Costo de referencia incluyendo mano de obra e insumos necesarios:\$387.000

d) Mantenimiento Overhaul

· *Reparación de unidad compresora*

Desmontaje de unidad

Desarme y evaluación de daños

Cambio de rodamientos en general
Cambio de sellos y empaquetaduras
Cambio de reten
Pulir carcazas y rotores
Ajuste de tolerancias
.

e) Reparación del resto del equipo

Barnizar bobinas
Cambio de rodamientos de motor eléctrico
Cambio de flexibles
Cambio filtros de aire y aceite
Cambio filtro separador de aceite
Cambio de aceite
Desmontaje y limpieza de enfriador
Cambio de correa
Cambio de aspas de ventilador
Limpieza de línea de barrido
Desarme y mantenimiento de válvulas de:
Admisión
Corte de aceite
Reguladora de presión mínima
Chequeo de relee térmico
Limpieza de contactores
Chequeo de sistema eléctrico
Armado general
Montaje y puesta en marcha

Costo de referencia incluyendo mano de obra e insumos necesarios:\$1.380.000

Nota: Se deben considerar estos valores (precios al 2001) solamente como estimaciones que pueden variar por diversos factores.

7.2- Historial Equipo Broomwave 6025E

11 abril 1996

Horas Acumuladas: 14656 hrs.

Trabajo efectuado: Reemplazo termistores del motor principal por un relé térmico con regulación de 24 amperes.

23 mayo 1997

Horas Acumuladas:18554 hrs.

Trabajo efectuado: Relleno aceite

Reapriete solenoide de carga

Presenta pequeña fuga por junta de cilindro válvula de succión, entonces se solicita cotización kit válvula.

10 febrero 1999

Horas acumuladas: 23912 hrs.

Trabajo efectuado: Mantenimiento equivalente a 4000 hrs.

Se detectó que el compresor está presentando problema en el motor eléctrico, al probarlo éste desprende chispas de su interior. Se traslada a taller para su reparación. Se retira radiador para su lavado en talleres.

3 septiembre 1999

Horas acumuladas: 25637 hrs.

Trabajo efectuado: Mantenimiento 4000 hrs.

Se efectuó : Cambio de Elemento Separador y Empaquetadura

Cambio de Aceite y Filtro de Aceite

Cambio del Filtro de Aire

Sopleteo Externo de Enfriadores Aire -Aceite

Limpieza del Tamiz de Barrido y Drenaje automático

Reapriete de Conexiones Eléctricas

Limpieza General del equipo.

Obs.: Para el próximo mantenimiento solicitar cambio de filtro de línea.

Nota: Se revisará hoja de vida del equipo y si fuese necesario se presupuestará overhaul, por la cantidad de horas que tiene la máquina.

2 diciembre 1999

Horas Acumuladas: 26448 hrs.

Trabajo efectuado: Asistencia por fuga de aceite. Se revisa equipo y se detecta fuga por válvula de succión (a través de O "Ring" y sellos) Válvula bleed, se encuentra con el asiento de goma en malas condiciones, lo que genera una pérdida constante de aire a través de ella hacia la atmósfera. Elemento separador, se encuentra en buenas condiciones, 0,3 bar. Se cotizará reparación de válvula de succión y vaso de filtro de línea, ya que se encuentra quebrado, además el manómetro está descalibrado.

7 diciembre 1999

Horas Acumuladas : 26448 hrs.

Trabajo efectuado: Cambio de kit válvula de succión, filtro de línea y manómetro.

Cambio de kit de reparación de válvula de succión

Cambio del filtro de línea (completo con vaso) de entrada a válvula de succión

Cambio de manómetro

Limpieza gral. del equipo

Medición del desplazamiento del separador indica 0,5 bar

Cliente suministró filtro de aire para cambiarlo, ya que estaba mojado con aceite.

Nota: Para el próximo mantenimiento cotizar el cambio de la manguera de salida filtro de aceite a entrada de unidad, ya que una sección de su cuerpo se humedece de aceite.

17 marzo 2000

Visita técnica

Horas Acumuladas: 28058 hrs.

Trabajo efectuado: Se revisa equipo por detenciones de sobret temperatura de aceite, se detecta roce en forma interna de la unidad, por lo que hay que retirar la unidad compresora para revisarla. Se retira unidad compresora y se lleva a taller.

21 julio 2000

Horas acumuladas: 28058 hrs.

Trabajo efectuado: Puesta en marcha equipo reparado.

Se instaló Unidad Compresora reparada (overhaul)

Limpieza de equipo

Cambio de Elemento Separador y Junta

Cambio de Aceite; Filtro de Aceite; Filtro de Aire

Montaje Correa

Cambio de terminal y manguera de señal de control a válvula de admisión

Regulación del presostato.

Mediciones eléctricas:

Tensión Consumo

L1 - L2 = 394 [V] L1 = 37,9 [A]

L2 - L3 = 396 [V] L2 = 36,6 [A]

L1 - L3 = 393 [V] L3 = 36,5 [A]

10 de agosto 2001

Horas Acumuladas: 31443 hrs.

Trabajo efectuado: Mantenimiento 4000 hrs.

Cambio de Elemento Separador, Empaquetadura, Filtro de Aceite, Aire.

Cambio de O'Ring de acople de Unidad Compresora.

Limpieza Enfriador Aire Aceite

Limpieza Filtro de Línea de Barrido

Limpieza de Equipo en General

Mediciones eléctricas:

Consumo

L1 =34, 9 [A]

L2 =35,8 [A]

L3 =34,7 [A] Voltaje promedio= 392 [V]

Diferencia DP =0,1 [bar] aprox.

Próximo mantenimiento de 4000 hrs. Corresponde reparación de válvulas (8000 hrs.)

8.- MANTENCION BASADA EN LA CONFIABILIDAD (RCM)

Las etapas involucradas en el desarrollo de un plan técnico de mantenimiento basado en la confiabilidad, son las siguientes:

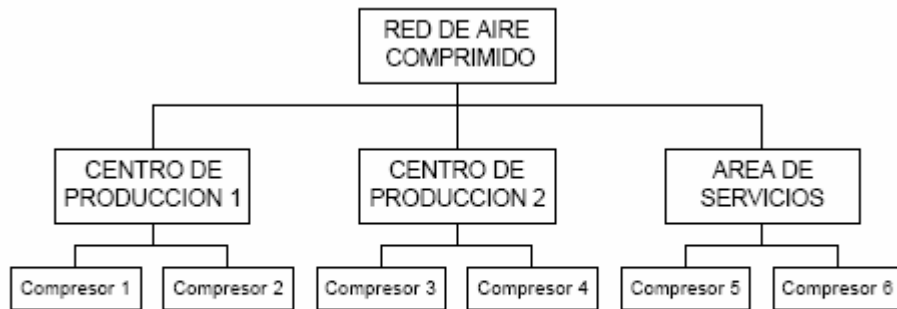
- Descomposición geográfica de la empresa
- Análisis de criticidad e índices de criticidad
- Análisis de fallas
- Análisis ABC
- Proposición de Plan de Mantenimiento Técnico
- Análisis del Costo Global de Mantenimiento

8.1. Distribución de la Fábrica

Una forma de visualizar la importancia de los equipos analizados dentro de la fábrica, se presentan los siguientes esquemas de distribución de fábrica y red de aire comprimido:



Esquema 1. Distribución de Geográfica



Esquema 2. Red de aire comprimido

Los centros productivos 1 y 2 consumen la mayor parte del aire comprimido, debido al proceso de producción ocupado en ellos. Como se puede observar en el esquema 2, la línea de aire comprimido de la fábrica, es alimentada por seis compresores, en donde tres de ellos funcionan en *punta* y los otros tres, funcionan como *respaldo*. Los compresores de respaldo cumplen la tarea de absorber los peaks o de reemplazar a los que se encuentran en punta cuando estos fallen, en la demanda de aire que se producen. Por lo tanto, cuando la alimentación de aire comprimido entregada por los compresores que funcionan en *punta* no es suficiente para satisfacer la demanda de aire, entran en funcionamiento los compresores de *respaldo*. En el momento que la demanda de aire comprimido disminuye, entonces dejan de funcionar los compresores de *respaldo* y quedan operando solo los de *punta*.

De acuerdo con la información entregada por el área de producción, la fábrica puede trabajar como mínimo con tres compresores operativos, sin perjuicio de su producción. En el caso extremo de quedar solamente con dos de ellos, se puede continuar con la producción, *sectorizando* el uso del aire comprimido. Esta *sectorización* es posible debido que, la línea de alimentación de aire comprimido, está formada por redes que permiten, mediante el cierre y aperturas de algunas llaves de paso, la alimentación preferencial de los sectores que representen un mayor costo por concepto de retraso en la producción. Esta situación no genera efectos mayores según informó el área de producción, pues a los sectores más críticos, desde el punto de vista del proceso productivo, se les suministraría el aire comprimido requerido.

8.2 . Clasificación de las Fallas

A través de índices de importancia de fallas, es posible clasificar la criticidad de éstas, de tal manera de jerarquizarlas y seleccionar las que tendrán más incidencia en una parada total del equipo. Se toman como criterios la duración

de la detención del equipo y la frecuencia con que ocurre. Los índices considerados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 1. Índice de Gravedad

Índice de Gravedad Criterio

1 Despreciable Detención < ½ día

2 Marginal Detención <1 día

3 Preocupante Detención < 1 semana

4 Peligroso Detención > 1 semana

Índice de gravedad

Índice de Gravedad	Criterio
1 Despreciable	Detención < ½ día
2 Marginal	Detención <1 día
3 Preocupante	Detención < 1 semana
4 Peligroso	Detención > 1 semana

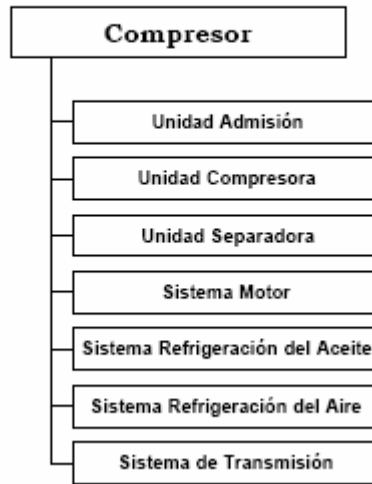
Índice de frecuencia

Índice de Frecuencia	Criterio
1 Poco frecuente	<1 vez/año
2 Ocasional	<1 vez /mes
3 Frecuente	<1 vez/semana
4 Muy frecuente	> 1 vez/semana

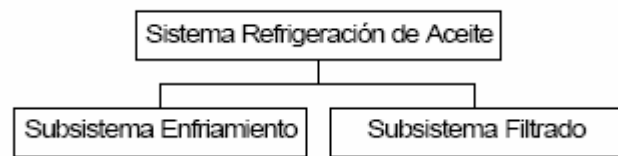
8.3. Análisis de fallas

En esta etapa se asocian las funciones de los componentes principales del equipo con los diferentes modos de falla. Se determinan los efectos sobre el equipo, su detección y acciones correctivas. Finalmente se pondera su gravedad.

DIAGRAMA FUNCIONAL DE BLOQUES



Sistema funcional del compresor



Subsistema unidad de refrigeración de aceite

Con la información recogida, se elaboró la siguiente ficha del equipo compresor de aire:

Análisis femeca o análisis de fallas

Sistemas	Subsistemas	Funciones	Modos de Falla	Daños	Efecto	Método	Acciones	Clasificación
Compresor			y causas	Efectos	Final	Detección	Correctivas	de Gravedad
Unidad Admisión		Aspirar y Filtrar el aire atmosférico	Aspiración deficiente: filtro está tapado	Mala Calidad aire(sucio), golpes de vacío	Funcionamiento defectuoso	Visual	Soplar o Cambiar Filtro	Despreciable, muy frecuente 4
Unidad Compresora		Comprimir el Aire	Compresión deficiente: desalineación ejes, desgaste rodamiento, falta sellado unidad.	Presión deficiente (baja)	Detención del equipo	Ruido	Reparación y alineamiento	Preocupante, poco frecuente 3
Unidad Separadora		Separar el aceite del aire	Exceso de Aceite en el aire de salida: saturación del filtro, filtro en mal estado, no se ha realizado mantención de recambio, aceite muy sucio, filtro de aceite saturado, filtro de aire sucio.	Paso de aceite a la unidad de secado	Aire comprimido de mala calidad	Aceite en la línea	Limpieza y cambio de filtro separador, limpieza línea de barrido.	Marginal, ocasional 3
Motor Eléctrico		Dar Torque a los tornillos compresores	Potencia baja, motor no parte: Sobrecalentamiento, termistor no funciona, cables cortados.	Calentamiento, quema del motor	Detención del equipo	Chequeo de sensor de temperatura	Revisión y reparación. Reemplazo de sensor	Peligroso, poco frecuente 4
Sistema Refrigeración de Aire		Enfriar el Aire	Aire demasiado caliente: Radiador obstruido y sucio, ventilador no funciona	Perdidas de carga más altas en la línea de aire comprimido	Condensado en la línea.	Inspección visual de presencia de agua	Limpiar radiador, limpiar cañerías.	Despreciable, poco frecuente 1
Sistema Refrigeración de Aceite	Enfriamiento del Aceite	Refrigerar el Aceite	Sobrecalentamiento, aire de salida demasiado caliente: termistor no funciona, radiador sucio.	Mal funcionamiento y sobrecalentamiento, aire caliente, pérdidas de carga en la línea.	Detención del equipo	Chequeo de sensor de temperatura	Limpieza	Despreciable, Poco Frecuente 1
	Filtrado	Filtrar el Aceite	Aceite se ensucia muy rápido.	Desgaste prematuro de piezas lubricadas, aire comprimido sucio		Inspección visual	Cambiar Filtro	Despreciable, ocasional 2
Sistema de Transmisión		Transmite la potencia desde el Motor Eléctrico al eje tornillos compresores	No hay compresión de aire: Correa se rompe, desalineación de poleas:desgaste correas	Trasmisión deficiente, desgaste prematuro de componentes	Detención del equipo	Ruido y disminución de la presión	Cambio de correa y alineamiento de poleas	Despreciable, ocasional 2

Como resultado de este análisis (Tabla 3) es posible identificar las fallas más críticas y cuáles deberán recibir la mayor atención en el plan de mantenimiento. Éstas son:

1. Aspiración Deficiente
2. Compresión Deficiente
3. Motor Eléctrico no funciona
4. Exceso de Aceite en el Aire Comprimido

9.- MODELOS MATEMÁTICOS DE CONFIABILIDAD

Dado que las fallas de los equipos son eventos aleatorios, es posible estudiarlas con conceptos y modelos estadísticos que permiten controlar y mejorar la probabilidad que un equipo no falle durante un cierto tiempo. Por medio de estas herramientas se pueden estimar el tiempo durante el cual el equipo no fallará, el número de fallas por horas de funcionamiento y la confiabilidad o probabilidad de que no falle durante un tiempo determinado.

· *Tasa de Fallas*

Para la tasa de falla global (número de fallas en un tiempo finito), del historial del compresor, se tienen 16787 horas de funcionamiento con 26 fallas en total, lo que da una tasa de falla de:

$$\lambda_{\text{global}} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ fallas/hr}$$

Del historial del compresor se tiene el tiempo entre fallas (TBF) o tiempo entre mantenimientos correctivos lo cual se muestra en la tabla . Cabe destacar que en el TBF, se han considerado un conjunto de fallas, debido a la poca información manejada por la empresa sobre los mantenimientos realizados a sus compresores.

Tiempo entre fallas

Falla i	TBF
1	811
2	1610
3	1725
4	3385
5	3898
6	5358

Sacando la media y la desviación estándar, se tiene:

$$m=2797,83$$

$$s=1710$$

Para estimar el tiempo medio entre fallas (MTBF), la confiabilidad y la tasa de fallas es necesario suponer, en primera instancia, que la tasa de falla sigue alguna distribución de probabilidades conocida y luego verificar si la cumple por medio de un test de comprobación estadístico.

· **Modelo de Weibull**

Se considera una tasa de falla que sigue una distribución de Weibull, con parámetros g, b y h a determinar. =

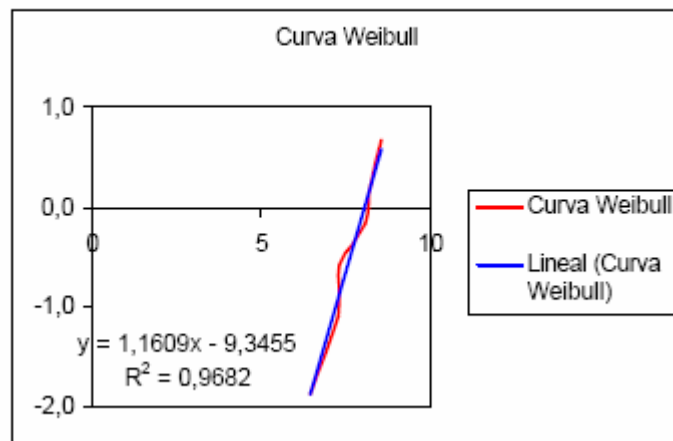
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-g}{h}\right)^b} \rightarrow \text{Distribución de Weibull}$$

Ocupando el método numérico de estimación de los parámetros (detalles en anexo B), se obtienen los siguientes valores:

$b = 1,16$

$h = 3134,14$

$g = 186,6$



Curva de weibull TBF

· **Test Verificación del Modelo**

Para verificar que la tasa de fallas sigue la distribución propuesta, se procede a realizar el test que corroborará dicha hipótesis dentro de cierta confiabilidad. Como el número de observaciones es bajo se ocupa el test de Kolmogorov-

Smirnov. Para un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ y $n=6$ (número de observaciones), se comprueba que el tiempo entre fallas sigue una distribución de Weibull. Verificada la distribución, para el modelo de Weibull, se tiene que la confiabilidad, el tiempo medio entre fallas y la tasa de fallas, en función de los parámetros γ , β y η , son:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \rightarrow \text{Confiabilidad}$$

$$MTBF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad \rightarrow \text{Tiempo medio entre fallas}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad \rightarrow \text{Tasa de falla en función del tiempo}$$

Reemplazando los valores queda:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-186,6}{3134,14}\right)^{1,16}} \quad \rightarrow \text{Confiabilidad en función del tiempo}$$

$$\lambda(t) = 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{t-186,6}{3134,14}\right)^{0,16} \quad \rightarrow \text{Tasa de fallas en función del tiempo}$$

$$MTBF = 3161,3 \text{ HRS.} \quad \rightarrow \text{Tiempo medio entre fallas}$$

$$R(t=MTBF) = 39 \% \quad \rightarrow \text{Confiabilidad en } t = \text{tiempo medio entre fallas.}$$

10.- MANTENCION PRODUCTIVA TOTAL (TPM)

Antecedentes

Este programa pretende mejorar la efectividad global de los equipos, considerando una participación activa de los operadores. El objetivo inmediato del TPM es eliminar totalmente las pérdidas de producción. Los sistemas productivos se consideran como combinaciones de hombres y máquinas (sistemas hombre-máquina) que se deben optimizar como conjunto, al mínimo

costo. El equipo que se está analizando es un compresor de aire que no requiere de un operador y trabaja según la demanda de aire. Por lo tanto, la mayoría de los conceptos que involucra el método TPM no son aplicables a este caso. Sin embargo, se tratará de aplicar los conceptos que vengan al caso.

10.1 Evaluación de los indicadores

9 horas de trabajo al día

- Tiempo de trabajo: $RT = 9 \text{ horas/día}$
- Disponibilidad teórica: $PA = (RT - \text{tiempo de configuración}) / RT = 100 \%$

El tiempo de configuración es despreciable (5 minutos como máximo).

- Utilización del equipo: $EU = (\text{tiempo de los turnos} - \text{tiempo de paradas programadas})$

Tiempo total

No hay turnos ni paradas programadas $\Rightarrow EU = 100 \%$

- Eficiencia de la operación: $PE = (\text{tiempo operativo usable} / \text{tiempo operativo neto})$

No hay tiempo perdido, trabaja sólo bajo demanda de aire $\Rightarrow PE = 100 \%$

- Tiempo de operación efectivo: UT

No hay registros de horas/día de detenciones del equipo por fallas.

- Disponibilidad: $A = UT * PA$
- Razón de calidad: $RQ = \text{unidades producidas con calidad nominal} / \text{unidades producidas}$. No viene al caso, pues entrega aire comprimido para el funcionamiento de otras máquinas.
- Efectividad global del equipo: $OEE = A * PE * RQ$
- Productividad total efectiva: $TEEP = EU * OEE$
- Efectividad neta del equipo: $NEE = UT * PE * RQ$

En general, estos parámetros no son aplicables al caso de estudio.

11.- EVALUACION DEL TIEMPO ÓPTIMO DE REEMPLAZO DE EQUIPOS

Antecedentes

El objetivo es determinar el tiempo óptimo de reemplazo de los equipos, debido al incremento en los costos de mantenimiento y de operación. Se utilizará el criterio de minimización del costo medio, considerando depreciación del equipo y la inflación.

11.1 Reemplazo de equipos considerando inflación.

En el cálculo de reemplazo de equipos, por motivos de información insuficiente, se tomaron las siguientes consideraciones:

- El historial del compresor se encuentra incompleto, por lo tanto, no se consideraron los datos desde el año 1993 hasta 1998 referentes a los mantenimientos del equipo .

- Los datos sobre los mantenimientos desde el 2002 en adelante, son los que corresponderían a mantenimientos preventivos realizados según el plan de mantenimientos preventivos propuesto anteriormente.
 - Como el análisis no se comenzó desde el año de compra del equipo (1993), su precio de compra se tomó como el valor libro del año 1998.
 - La depreciación se consideró lineal y está basada en los datos de un compresor de similares características, perteneciente a la misma empresa.
- Se tiene que:

Precio de compra del equipo : A

Costo total en el periodo i : Ci

Precio de reventa al final del periodo n : Rn

Costo medio total por unidad de tiempo : Cu

Conversión a unidades del año 0 : Cu,0

$$\bar{C}_u(n) = \frac{(1+r)^n \cdot A + \sum_{i=1}^n (1+r)^{i-1} C_i - R_n}{n} \qquad \bar{C}_{u,0} = \frac{\bar{C}_u(n)}{(1+r)^n}$$

A = \$ 3.688.884 (valor libro en el año 1998)

(1+r) = (1+0,14) = 1,14

Los cálculos se encuentran en la siguiente tabla:

Año		Ci	Ri	$\sum_{i=1}^n (1+r)^{i-1} C_i$	Cu (i)	Cu,0
1999	1	597000	4598412	597000	203916	178873
2000	2	1507000	4446824	2314980	1331115	1024250
2001	3	400000	4295236	2834820	1334943	901048
2002	4	453400	4143648	3506552	1398321	827918
2003	5	99600	3992060	3674772	1357069	704819
2004	6	301400	3840472	4255092	1418603	646297
2005	7	453400	3688884	5250293	1541713	616126
2006	8	301400	3537296	6004477	1623755	569222

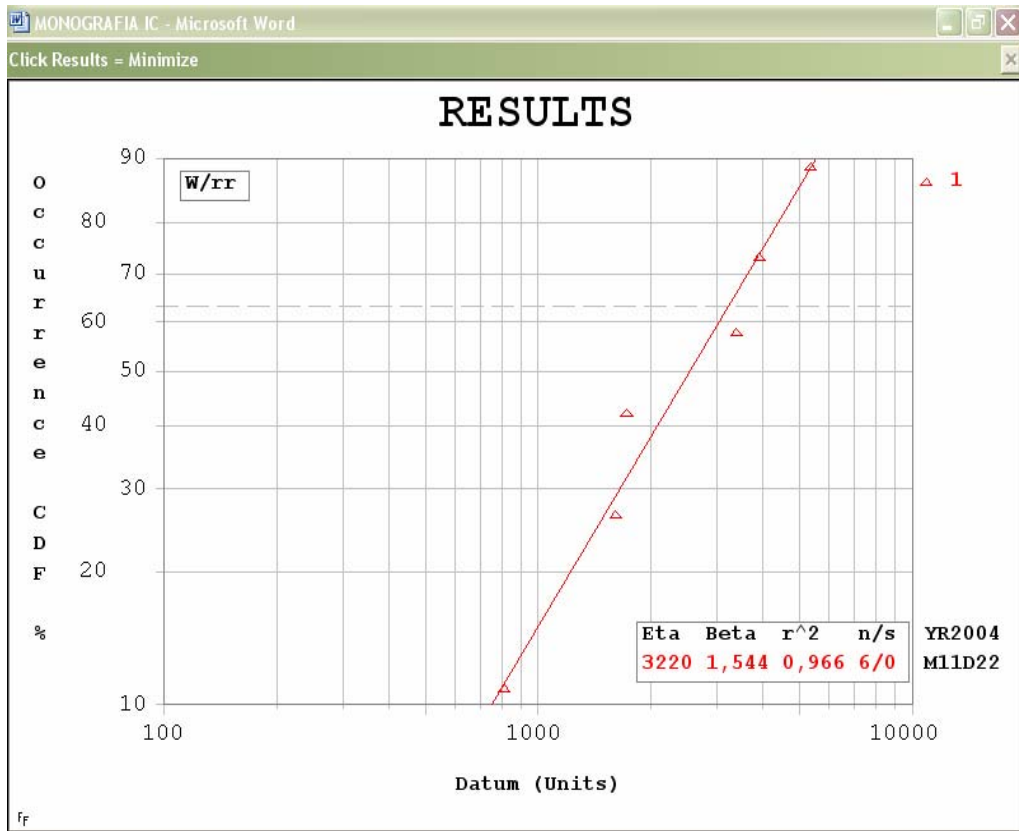
Como se puede observar, los resultados indican que el periodo óptimo de reemplazo del equipo corresponde al año 2003. Sin embargo, cabe destacar que el hecho de que se realizase un overhaul, que es un mantenimiento completa que se debe realizar pasadas las 25.000 horas de operación, tiene una influencia directa sobre los costos, pues es un mantenimiento bastante

costoso. Por otro lado, al ser un mantenimiento completo, el equipo queda en muy buen estado, por lo que se podría continuar operando un buen tiempo más con relativa seguridad.

12. MODELAMIENTO SEGÚN EL PROGRAMA WEIBULL V 3.0

Datos suministrados al programa

1	811
2	1610
3	1725
4	3385
5	3898
6	5358



Weibull Analysis Report

Set 1 - 1

Date: M11-D23-YR2004

RESULTS

Correlation(r)=,982853 r²=,966 ccc²=,8313 r²-ccc²= ,1347 (Okay)

Characteristic Value=3220 Weibull Slope=1,544 Method=rr

Mean=2897 Std. Deviation=1916

Point Quantity=6 (susp=0)

B%	Datum (Units)
1	163,6
2	257,1
5	470,2
10	749,5
20	1219
50	2539



Optimum Replacement Interval	
A.	Analysis Parameter: Eta = 3219,765 Beta= 1,543826
B.	Block Replacement = No
L.	View Length (Units) = 3000
P.	Cost Each Replacement (\$) - Planned = 1
U.	Cost Each Replacement (\$) - Not Planned = 10

Weibull Optimum Replacement Interval

RESULTS Date: M11-D23-YR2004
 Eta = 3219,765 Beta = 1,543826
 Cost / Item [\$] Planned = 1 Cost / Item [\$] Not Planned = 10
 At Optimum (1200) Steady-State: Replacement Rate [/Unit-Units] = 6,70174E-04
 Failure-Rate (FR) [/Unit-Units] = 1,631593E-04 MTBF (1/FR) = 6128,979
 Cost/Time [\$/Units]:

Units.....Cost	Units.....Cost	Units.....Cost	Units.....Cost
50 ,02032	800 ,0026119	1550 ,0025561	2300 ,0027402
100 ,01046	850 ,0025823	1600 ,0025661	2350 ,0027534
150 ,0072281	900 ,0025595	1650 ,0025767	2400 ,0027666
200 ,0056531	950 ,0025423	1700 ,0025878	2450 ,0027798
250 ,004735	1000 ,0025299	1750 ,0025993	2500 ,0027928
300 ,004143	1050 ,0025213	1800 ,0026112	2550 ,0028058
350 ,003736	1100 ,0025161	1850 ,0026234	2600 ,0028188
400 ,0034435	1150 ,0025136	1900 ,0026359	2650 ,0028316
450 ,0032268	1200* ,0025136	1950 ,0026485	2700 ,0028443
500 ,0030624	1250 ,0025155	2000 ,0026614	2750 ,002857
550 ,0029357	1300 ,0025192	2050 ,0026744	2800 ,0028695
600 ,0028369	1350 ,0025244	2100 ,0026874	2850 ,0028819
650 ,0027593	1400 ,0025308	2150 ,0027006	2900 ,0028941
700 ,0026981	1450 ,0025383	2200 ,0027138	2950 ,0029063
750 ,0026498	1500 ,0025468	2250 ,002727	3000 ,0029183

BIBLIOGRAFÍA

GARCIA PALENCIA, Oliverio. "Administración de Mantenimiento y Sistemas de Control". Predicción. UTPC. Duitama, 1992

SHIGLEY, J. y MISCHKE, Charles. Diseño en Ingeniería Mecánica. Quinta Edición. Mc Graw – Hill. México 2000.

LEWIS, E.E. "Introduction to Reliability Engineering". Jhon Wiley & Sons. New York. 1991

GEITNER, Fred Machinery Reliability Assessment. The Center for Professional Advancement. 1996

Abernethy, Robert. The New Weibull Handbook... Cuarta Edition. 2000

Manual de Compresores *Serie 6000* CompAir BroomWade

PAGINAS WEB VISITADAS

www.confabilidad.com

* Mantenimiento Basado en Confiabilidad (RCM)

* Mantenimiento Productivo Total

www.confabilidad.net

* Estrategias para Confiabilidad de Equipos

CONCLUSIONES

El área de la ingeniería de confiabilidad y la metodología estadística relacionada han estado creciendo continuamente durante los últimos 50 años. Sin embargo, se necesita desarrollar más métodos estadísticos, procedimientos de recolección de información, planes de ensayo y herramientas enfocadas a la confiabilidad de sistemas y componentes. Con el cambio continuo de la tecnología, el conocimiento científico creciente y las nuevas fuentes de información y datos, surgen nuevos problemas y retos de gran interés. La estadística continuará desempeñando un papel fundamental en el área de la confiabilidad.

El RCM produce resultados muy rápidos. De hecho, la mayoría de las organizaciones pueden completar una revisión del RCM en menos de un año utilizando el personal existente. La revisión termina con una recopilación de la documentación, fiable y totalmente documentada del mantenimiento cíclico de todos los elementos significativos de cada equipo de la instalación. Si el RCM es usado correctamente para volver a evaluar los requisitos de mantenimiento de los activos existentes, transformará ambos requisitos y la forma en que es percibida la función mantenimiento como operación total. El resultado es un mantenimiento menos costoso, más armonioso y más eficaz.

Del modelamiento por software de weibull podemos concluir que de la grafica observamos que su parámetro beta es >1 lo que quiere decir que la mayoría de fallas del compresor son por vejez o uso, que la regresión ranqueada es $r^2=0.966$ y la correlación fue de $r=0.98$ nos revela que weibull fue aplicado correctamente porque entre mas este parámetro se acerque a 1 nos indica que el ajuste fue menor, y por ultimo su tiempo medio entre falla fue de $MTBF=6128.979$ y que después de las 1200 horas de servicio este compresor presentara alguna falla.