



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**METODOLOGÍAS Y CRITERIOS DE MANTENIBILIDAD
APLICADOS A LA ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN
DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO
ELECTRÓNICO DE IMPRESIÓN**

Juan Francisco Catalán Gudiel

Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez

Guatemala, febrero de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍAS Y CRITERIOS DE MANTENIBILIDAD
APLICADOS A LA ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN
DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO
ELECTRÓNICO DE IMPRESIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN FRANCISCO CATALAN GUDIEL
ASESORADO POR EL ING. BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Dr. Juan Carlos Cordova Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Manuel Fernando Barrera Perez
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

METODOLOGÍAS Y CRITERIOS DE MANTENIBILIDAD APLICADOS A LA ORGANIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO ELECTRÓNICO DE IMPRESIÓN,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha treinta y uno de mayo de 2005.

Juan Francisco Catalán Gudiel

AGRADECIMIENTOS

A Dios por el don de la vida y permitirme disfrutar de este momento. A mis Padres José Gonzalo Catalán y Leonor Gudiel Robles, por el gran amor que me tienen. A mis hermanos Sandra, Gabriela y Rene, a mi sobrino Julio, y a mi novia Maria Eugenia, por su apoyo incondicional. A mis padrinos Rudy y Regina, por estar siempre pendientes de mi. A mis abuelos Armando Gudiel y Ethelvina Robles de Gudiel, a mis tíos, primos y demás familiares por su cariño sincero.

A la Gloriosa Universidad de San Carlos de Guatemala, a mis compañeros Obed, Francisco, Víctor, Héctor Ovalle, Ferdy, Iván Morales, Keneth y a todos con quienes tuve la dicha de compartir estos años de estudio. A mi asesor, Ing. Byron Arrivillaga por la dedicación y el tiempo empleado en la revisión de este trabajo. Al Ing. Enrique Núñez (Q.E.P.D.).

A Representaciones Comerciales F. Mansilla y Cía., S.A. por brindarme la oportunidad de trabajo.

DEDICATORIA

A mi mamá, principal responsable y merecedora de este momento, por su apoyo, y guiarme con amor y dedicación por el camino correcto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
OBJETIVOS	IX
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. HISTORIA Y FUNDAMENTOS DE MANTENIBILIDAD	
1.1 Antecedentes Históricos	1
1.2 Fundamentos de Mantenibilidad	2
1.2.1 Medidas de mantenibilidad	5
1.2.1.1 Tiempo de recuperación TTR	6
1.2.1.2 Tiempo medio de recuperación MTTR	6
1.2.1.3 Tiempo medio entre falla MTBF	7
1.2.1.4 Función de mantenibilidad	8
1.2.1.5 Realización de la recuperación	8
1.2.1.6 Disponibilidad	9
1.2.1.7 Tiempo porcentual de recuperación TTR%	10
1.3 Fundamentos de Fiabilidad	10
1.3.1 Estructura de sistemas	12
1.3.1.1 Fiabilidad en sistemas de estructura serie	13
1.3.1.2 Fiabilidad en sistemas de estructura paralela	14

1.3.2	Fiabilidad en función del tiempo	16
1.3.2.1	Función de fiabilidad	18
1.3.2.2	Curva de la bañera	18
2	FUNDAMENTOS ESTADÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DE MEDIDAS DE MANTENIBILIDAD	21
2.1	Medidas de Posición	22
2.1.1	Media de la muestra	22
2.1.2	Mediana de la muestra	22
2.2	Medidas de Variabilidad o Dispersión	23
2.2.1	Rango de la muestra	24
2.2.2	Desviación estándar	24
2.3	Variables Aleatorias	25
2.3.1	Distribución discreta de probabilidad	25
2.3.1.1	Medida de posición esperanza	28
2.3.1.2	Medida de variabilidad varianza	28
2.3.2	Distribuciones continuas de probabilidad	29
2.3.2.1	Distribución normal	31
2.3.2.2	Distribución exponencial	33
2.3.2.3	Distribución de Weibull	35
3	EL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO ELECTRÓNICO	37
3.1	Clasificación de las Tareas de Mantenimiento	39
3.1.1	Tareas de mantenimiento preventivo	40
3.1.2	Tareas de mantenimiento correctivo	42
3.1.3	Tareas de mantenimiento predictivo	44
3.2	La Administración del Mantenimiento	46
3.2.1	Los recursos de mantenimiento	47

3.2.2	La carga de trabajo	50
3.2.2.1	Trabajos programados	50
3.2.2.2	Trabajos no programados	52
3.2.3	Planificación del trabajo de mantenimiento	53
3.2.3.1	Mantenimiento en la propia empresa y Mantenimiento en el exterior	54
3.3	Mantenimiento de Equipo Electrónico	55
3.3.1	Efectos de la temperatura	56
3.3.2	Efectos de la humedad	56
3.3.3	Efectos de las vibraciones	57
3.3.4	Efectos de la interferencia electromagnética	58
4	METODOLOGÍAS PARA ESTIMACIÓN DE MANTENIBILIDAD	59
4.1	Método Paramétrico	59
4.2	Método de Ajuste de la Distribución	64
4.3	Método de Aprovisionamiento de Repuestos	77
4.4	Comentarios Finales	79
5	ANÁLISIS DE CRITERIOS DE MANTENIMIENTO	81
5.1	Criterios de Mantenimiento Basado en las Fallas	81
5.1.1	Ventajas y desventajas del mantenimiento basado en las fallas	82
5.2	Criterios de Mantenimiento Basado en la Duración de Vida del Sistema	84
5.2.1	Ventajas y desventajas del mantenimiento basado en la duración de vida del sistema	85
5.3	Criterios de Mantenimiento Basado en la Inspección	86
5.3.1	Ventajas y desventajas del mantenimiento	87

	basado en la inspección	
5.4	Criterios de Mantenimiento Basado en la Oportunidad	88
5.4.1	Ventajas y desventajas del mantenimiento basado en la oportunidad	88
6	CASO PRÁCTICO	91
6.1	Registro de Datos Empíricos	91
6.2	Cálculo y Análisis de las medidas de Mantenibilidad.	92
6.3	Resultados	99
6.4	Comentarios finales	101
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA	107
	ANEXOS	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

- 1 Gráfica de funcionabilidad de un sistema recuperable
- 2 El enfoque de mantenibilidad basado en el tiempo empleado en la tarea de mantenimiento
- 3 Sistema serie de tres componentes
- 4 Sistema paralelo de tres componentes
- 5 Duración de vida de componentes idénticos
- 6 La curva de la bañera
- 7 Gráfica de barras de una distribución discreta de probabilidad
- 8 Histograma de probabilidad de una distribución discreta de probabilidad
- 9 Funciones de densidad típicas
- 10 Probabilidad de que T tome un valor entre a y b
- 11 Gráficas de curvas normales
- 12 Gráfica de distribución exponencial
- 13 Gráfica de la función de distribución de weibull
- 14 Representación gráfica de una tarea típica de mantenimiento preventivo
- 15 Representacion gráfica de una tarea típica de mantenimiento correctivo
- 16 Representación gráfica de datos exponenciales
- 17 Gráfico de datos con distribución de Weibull
- 18 Muestra del papel de Weibull
- 19 Ploteo de puntos y trazos para el calculo de α y β
- 20 Gráfica con ecuación para datos Weibull
- 21 Gráfica exponencial para datos del caso práctico

- 22 Gráfica weibull para datos del caso práctico
- 23 Introducción de datos en MiniTab
- 24 Selección de la opción para la regresión
- 25 Asignación de ejes X y Y en MiniTab
- 26 Resultado de la regresión con MiniTab

TABLAS

- I Registro de operación de equipo X
- II Cálculo de la función empírica para $n = 20$
- III Datos del método de ajuste de la distribución
- IV TTR para tarea de mantenimiento tipo 100K
- V Cálculo de la función empírica para $n = 10$
- VI Datos completos del caso práctico

GLOSARIO

SoFu	<i>State of fuction.</i> Estado de funcionamiento.
SoFa	<i>State of failure.</i> Estado de falla o parada.
TTR	<i>Time to Restore.</i> Tiempo de recuperación.
MTBF	<i>Mean Time Between Failure.</i>
MTTR	<i>Mean Time to Restore.</i> Tiempo medio de recuperación
M(t)	Función de mantenibilidad
A₀	<i>Availability.</i> Disponibilidad
TTR_%	Tiempo de recuperación porcentual
Φ	Estado del sistema
r(p)	Fiabilidad del sistema
S	Desviación estándar
μ	Esperanza o valor medio
σ	Varianza

PRT	<i>Preventive Task.</i> Tareas de mantenimiento preventivo.
DMT^P	Duración de la tarea de mantenimiento preventivo.
CRT	<i>Corrective Task.</i> Tarea de mantenimiento correctivo.
DMT^C	Duración de la tarea de mantenimiento correctivo.
T_{SoFu}	Tiempo en estado de funcionamiento.
T_{SoFa}	Tiempo en estado de parada.
MTTR^U	Límite superior del tiempo medio de recuperación.
MTBM	<i>Mean Time Between Maintenance.</i> Tiempo medio entre acciones de mantenimiento.
F_i	Función de distribución empírica.
α	Parámetro de escala.
β	Parámetro de forma.

RESUMEN

La Ingeniería de Mantenibilidad es la disciplina encargada del estudio de la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades del mantenimiento de los equipos, en este trabajo se analiza desde un punto de vista basado en el tiempo empleado en las actividades de mantenimiento necesarias tanto para mantener un equipo en funcionamiento, como para recuperarlo luego de una falla, para ello se presentan inicialmente los fundamentos conceptuales y estadísticos que permitan el análisis del tiempo empleado en mantenimiento, como una variable aleatoria que solo puede ser tratada de forma probabilística.

Para este análisis se utilizan dos métodos: (1) El método paramétrico y (2) El método de ajuste de la distribución. En ambos el punto de partida son los datos recabados referentes al tiempo empleado en mantenimiento, sin embargo, en el método paramétrico los datos se analizan suponiendo que se distribuyen según un patrón de probabilidad previamente establecido, mientras que en El método de ajuste de la distribución se utilizan estos datos para determinar exactamente a que tipo de distribución de probabilidad corresponden, encontrándose como principal diferencia entre ambos métodos, la cantidad de información que se puede obtener y en nivel de exactitud de los resultados, quedando a criterio del lector el método a aplicar, pues según el tipo de equipos la eficacia del método elegido para el análisis de mantenibilidad, jugará un papel importante en la organización y planificación de los recursos para la operación y mantenimiento de los mismos.

Las metodologías para estimación de las medidas de mantenibilidad se ponen en práctica en el último capítulo, mostrando el procedimiento completo aplicado a un caso práctico, el cual se realizó, en el departamento de servicio técnico de una empresa dedicada a la distribución de equipo electrónico de impresión, con lo cual el lector podrá involucrarse en los cálculos y análisis hechos en base a los conceptos de los capítulos anteriores, y fijar los conocimientos adquiridos sobre cada uno y su interrelación.

OBJETIVOS

- **General**

Efectuar un estudio de las metodologías y criterios de mantenibilidad, que incluya los fundamentos que permitan comprender su importancia en la organización y planificación de todo proceso de mantenimiento, y enfocar su aplicación al mantenimiento de equipo electrónico de impresión.

- **Específicos**

1. Presentar los conceptos fundamentales de mantenibilidad.
2. Exponer los fundamentos estadísticos necesarios para el cálculo de las medidas que definen cuantitativamente la mantenibilidad.
3. Que el lector pueda identificar los recursos necesarios para facilitar la organización y planificación del proceso de mantenimiento, así como las diferentes clasificaciones de las tareas de mantenimiento en cualquier aplicación.
4. Exponer las metodologías para la estimación de las medidas de mantenibilidad.
5. Presentar algunos criterios de mantenibilidad basados en diferentes condiciones del sistema con énfasis en las principales ventajas y desventajas de cada uno.

6. Presentar al lector un caso práctico para que visualice la importancia de las medidas de mantenibilidad en todo proceso de mantenimiento, para que pueda usar estos conceptos en cualquier aplicación.

INTRODUCCIÓN

La funcionabilidad es la característica más importante de cualquier sistema, toda persona es consciente de que, independientemente del diseño, tecnología o materiales de fabricación, cualquier sistema se encuentra propenso a la aparición de fallas durante su operación, estas fallas pueden ser provocadas por procesos como desgaste, corrosión, calentamiento etc., históricamente se han ignorado los aspectos de la recuperación de los equipos tras una falla, sin embargo en la actualidad debido al creciente desarrollo de las industrias y la automatización de los procesos, surge una disciplina conocida como Ingeniería de Mantenibilidad, encargada del estudio de la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades mantenimiento.

Este trabajo esta desarrollado de manera que el lector se introduzca gradualmente dentro del ámbito de la mantenibilidad, al inicio se presentan la historia y los fundamentos teóricos que dan al lector una visión general del tema. Posteriormente, se detallan los fundamentos estadísticos que sirven de base para el cálculo de las medidas que definen cuantitativamente la mantenibilidad. Se dedica un capítulo al estudio del proceso de mantenimiento de equipo electrónico y de los efectos de ciertas condiciones del entorno en los mismos. Además, se presentan los principales criterios de mantenimiento basados en diferentes condiciones del sistema, así como las ventajas y desventajas de la aplicación de cada uno de ellos.

Todo este contenido sirve de preámbulo a la presentación y análisis de los métodos paramétrico y de ajuste de la distribución para el cálculo de las

medidas de mantenibilidad, presentados en el capítulo IV de este trabajo de graduación.

También se detalla el proceso de medición, y registro de los datos necesarios para la cuantificación de la mantenibilidad en el proceso de mantenimiento de equipo electrónico de impresión, presentado en el capítulo VI un caso práctico con datos reales, de manera que esto permita al lector cerrar el círculo de conocimientos que este trabajo le brinda.

1. HISTORIA Y FUNDAMENTOS DE MANTENIBILIDAD

1.1. Antecedentes históricos

Durante varios años, después de la Segunda Guerra Mundial, la tarea principal del Japón fue elevar el estándar de vida de su población mediante la revitalización de su economía.

Al final de la Segunda Guerra Mundial el Japón se encontraba en una situación de precariedad económica, aunque existía un magnifico potencial en cuanto a capacidad productiva y mano de obra, a diferencia de los Estados Unidos, la carencia de materia prima era el gran problema que limitaba su desarrollo industrial.

Esta fue una de las razones principales que impulsó a los empresarios japoneses a evitar el despilfarro, y los motivó a esforzarse en la mejora del diseño de sus productos, antes de comenzar su proceso de fabricación, así como a incursionar en nuevas metodologías de administración del mantenimiento de los sistemas.

Es por ello que durante los años 60 y coincidiendo con la expansión de la electrónica, se produce el despliegue e implantación de las técnicas de "mantenibilidad y fiabilidad ", con el fin de conseguir reducir al mínimo en un sistema el " tiempo fuera de servicio " y el " costo de las reparaciones ", Dando como resultado con el desarrollo de una nueva ciencia, conocida como Ingeniería de mantenibilidad, que estudia las actividades, factores y recursos relativos a la recuperación de la funcionabilidad de un sistema, mediante la realización de las tareas de mantenimiento específicas.

1.2. Fundamentos de mantenibilidad

La característica más importante de todo sistema es sin duda su capacidad para satisfacer una necesidad, cumpliendo ciertos requisitos y funciones específicas, los cuales suelen estar bien definidos y requeridos. A esta característica tan importante en un sistema se le conoce como Funcionabilidad, y esta definida como, la capacidad de un sistema de desempeñar una función requerida con unas prestaciones especificadas, cuando es usado bajo las condiciones establecidas por el fabricante.

Es importante hacer notar la diferencia entre los términos Funcionalidad y Funcionabilidad, pues el primero considera que un equipo funcione adecuadamente y el segundo toma en cuenta el nivel de prestaciones obtenido del mismo.

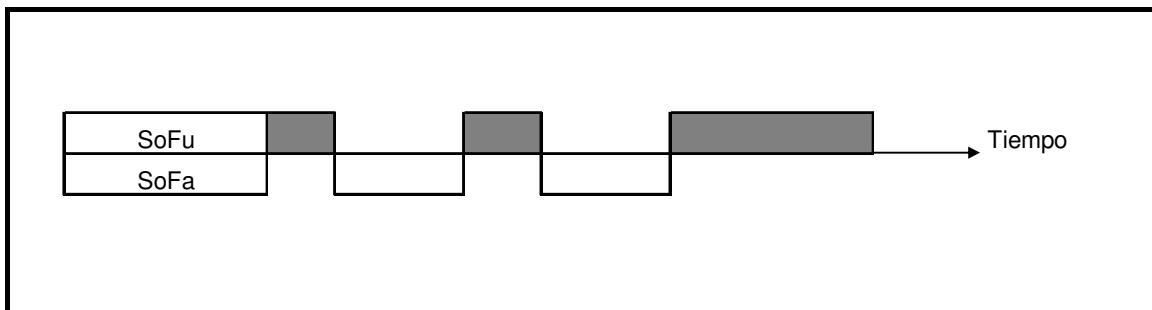
A pesar de que un sistema sea funcional al comienzo de su vida operativa e independientemente del diseño, tecnología, y materiales de fabricación, sin duda durante su operación se producirán algunos cambios irreversibles. Estos cambios son comúnmente resultado de procesos tales como corrosión, sobrecalentamiento, fatiga, deformación, desgaste etc. A menudo estos procesos causan cambios en las características de actuación del sistema, considerándose a estos cambios una falla del sistema.

La falla de un sistema, provoca la pérdida de la capacidad para realizar la función requerida, o bien la pérdida de la capacidad para satisfacer los requisitos específicos. Independientemente de las razones por las cuales se de la falla del sistema, esta causa una transición del sistema desde un estado de funcionamiento satisfactorio hasta un estado de funcionamiento insatisfactorio, conocidos como, SoFu (State of Fuction) y SoFa (State of Failure).

Existen dos tipos de sistemas conocidos como: Sistemas Recuperables y Sistemas no Recuperables. Como su nombre lo indica un Sistema Recuperable es aquel en el que se puede recuperar su funcionalidad, después de ocurrida una falla; y un Sistema no Recuperable es aquel en el que después de ocurrida una falla es imposible recuperar su condición de funcionalidad normal.

En la figura 1, se muestra la gráfica de funcionalidad de un Sistema Recuperable, donde se puede observar que desde el inicio de su vida operativa hasta su baja, el sistema fluctúa entre los estados SoFu y SoFa.

Figura 1. Gráfica de Funcionabilidad de un Sistema Recuperable



Fuente: Mantenibilidad. Isdefe España.

La gráfica de la figura 1 es conocida como gráfica de funcionalidad, porque en ella se muestran los estados del sistema durante su vida operativa, siendo estos: el tiempo en el cual el sistema se encuentra en SoFu, el tiempo en el cual el sistema estará disponible o "Tiempo Operativo", el tiempo en el cual el sistema se encuentra en SoFa, y el tiempo de parada del equipo.

Para que un sistema recupere la capacidad de realizar una función es necesario realizar unas tareas específicas conocidas como, tareas de

mantenimiento. Además de las tareas de mantenimiento requeridas por la falla durante la operación, un sistema puede requerir tareas adicionales para mantenerlo en estado de funcionamiento. El proceso durante el cual se mantiene la capacidad del sistema para realizar una función, es conocido como proceso de mantenimiento. Del proceso de mantenimiento, depende la disponibilidad del sistema, pues en él están enmarcadas todas las actividades necesarias para conservar la funcionabilidad.

La disponibilidad puede considerarse la característica mas importante de un sistema, pues el usuario no tolerará que este se encuentre fuera de servicio. Hay varias formas en las que los diseñadores pueden lograr altos niveles de disponibilidad; la primera es construir sistemas sumamente fiables y por lo mismo extremadamente costosos; la segunda forma de lograr altos niveles de disponibilidad es construir sistemas que cuando fallen sean fáciles de recuperar.

Puesto que lo principal es el logro de la funcionabilidad y disponibilidad, es la segunda opción la elegida por los diseñadores, para obtener altos niveles de disponibilidad operativa, es decir debe diseñarse para la mantenibilidad de los sistemas.

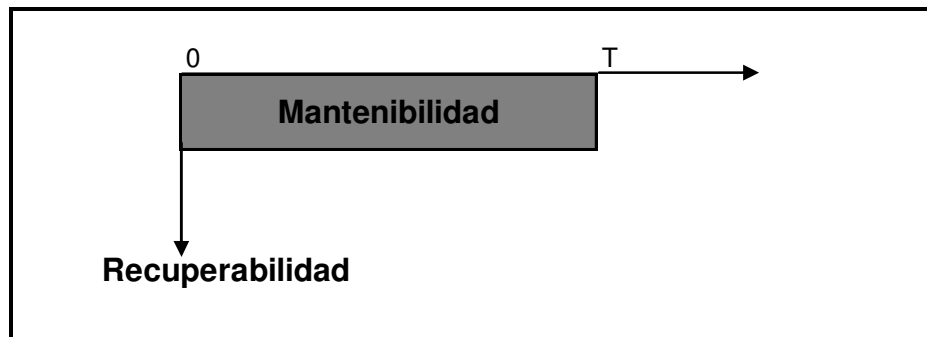
La ingeniería de mantenibilidad es una disciplina científica que estudia la complejidad, factores y los recursos relacionados con las actividades que se deben realizar para mantener la funcionabilidad de un sistema. Por ello la ingeniería de mantenibilidad esta creciendo rápidamente, debido a su considerable contribución a reducir los costos de mantenimiento, además un claro conocimiento de las metodologías y criterios de mantenibilidad permitirá calcular las medidas de mantenibilidad necesarias para lograr los altos niveles de disponibilidad requeridos.

2.1.1 Medidas de mantenibilidad

Para poder aplicar la mantenibilidad en el campo de la ingeniería, es necesario poder cuantificarla. Hay varias maneras de poder cuantificar la mantenibilidad sin embargo, en la práctica de ingeniería, el enfoque basado en el tiempo empleado en las tareas de mantenimiento, es el más utilizado y es el que aquí se estudiará, pues con este método lograremos a través de diversos parámetros medir la capacidad del sistema de ser recuperado para su función, mediante la realización de tareas de mantenimiento.

Es importante entender la relación entre mantenibilidad y el “tiempo empleado” en las tareas de mantenimiento. Como se puede observar en la figura 2, la mantenibilidad está directamente relacionada con el área de la parte inferior de la gráfica de funcionamiento de un sistema, es decir con el estado SoFa, donde **T** representa el tiempo empleado para la acertada realización de la tarea de mantenimiento que permite la recuperación del sistema.

Figura 2. El Enfoque de Mantenibilidad Basado en el Tiempo Empleado en la Tarea de Mantenimiento.



Fuente: Mantenibilidad. Isdefe España.

Las medidas mediante las cuales se puede describir la mantenibilidad están relacionadas con el tiempo en el cual el sistema se encuentra en SoFa y debido a que este tiempo no es constante se utilizan medidas tales como: Tiempo medio entre fallas (MTBF), Tiempo de recuperación (TTR), Tiempo medio de recuperación MTTR etc. y son consideradas variables aleatorias y sólo pueden ser descritas de forma probabilística.

1.2..1 Tiempo de recuperación TTR

El lapso de tiempo comprendido desde el instante en que ocurre una falla en el sistema, que imposibilite su funcionalidad, hasta el instante en el cual se logre recuperar el sistema, es conocido como Tiempo de recuperación TTR (*Time to Restore*), como mencionamos en la sección anterior, diversos factores involucrados en el proceso de mantenimiento o de recuperación del sistema, provocaran que TTR sea variable, incluso para sistemas idénticos con fallas idénticas.

De la variabilidad de TTR se deduce que el proceso de recuperación del sistema solo puede describirse en términos probabilísticos, siendo TTR una variable aleatoria.

1.2..2 Tiempo medio de recuperación MTTR

Lo definimos como la media de la variable aleatoria TTR o la media de la distribución de probabilidad de TTR. También es común referirse a esta media como la esperanza matemática o el valor esperado, en este caso de la variable TTR y denotada por MTTR, es importante hacer énfasis que éste es un valor promedio del tiempo de recuperación, pero que no necesariamente tiene que ser el resultado de algunos de los tiempos que tome recuperar el sistema.

Sabemos que la media o valor esperado de cualquier variable aleatoria discreta, se puede obtener al multiplicar cada uno de los valores de la variable aleatoria por su correspondiente probabilidad y sumar los productos. Sin embargo, en este caso TTR es una variable aleatoria continua, por lo cual utilizamos integrales para reemplazar a las sumatorias, de este modo:

$$MTTR = \int_0^{\infty} tm(t)dt$$

Donde $m(t)$ es la función de densidad de probabilidad de la variable TTR.

1.2.3 Tiempo medio entre fallas MTBF

El tiempo medio entre fallas MTBF, se utiliza en sistemas cuya funcionalidad puede ser recuperada y se establece, como el valor medio entre fallas, luego de fallas consecutivas durante un periodo determinado.

$$MTBF = \frac{n.T}{K}$$

Donde:

n = Número de componentes objeto del análisis de fallas.

T = Tiempo analizado.

K = Cantidad de fallas durante el tiempo analizado.

1.2..4 Función de mantenibilidad

Dado que la función de distribución de cualquier variable aleatoria representa la probabilidad de que tenga un valor igual o menor que algún valor particular, podemos definir a $M(t)$ como la función de distribución de la variable TTR, o Función de Mantenibilidad así:

$$M(t) = P(TTR \leq t)$$

$$M(t) = \int_0^t m(t)dt$$

Donde $m(t)$ es la función de densidad de TTR.

La función de mantenibilidad $M(t)$ indica la probabilidad de que el sistema sea recuperado en el momento “t” o antes.

1.2..5 Realización de la recuperación

La realización de la recuperación RS, es la medida de mantenibilidad con la que podemos conocer la probabilidad de que el elemento que no ha sido recuperado en un tiempo t_1 , sea recuperado en un tiempo t_2 o antes, es decir:

$$RS(t_1, t_2) = P(TTR \leq t_2 \mid TTR > t_1)$$

Aplicando el concepto de probabilidad condicional

$$RS(t_1, t_2) = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)}$$

Donde $M(t_1)$ y $M(t_2)$ son las funciones de mantenibilidad para t_1 y t_2 .

La ecuación anterior nos da la realización de la recuperación, medida muy importante en mantenibilidad, pues nos indica la probabilidad de que el sistema que no haya sido recuperado en t_1 , sea recuperado en t_2 , o antes.

1.2.6 Disponibilidad

La disponibilidad es una medida de que tan frecuente el sistema esta bien y listo para operar, frecuentemente se expresa en función del tiempo en funcionamiento y tiempo en parada, factores como el incremento de tiempo para fallar y la reducción de paradas por reparaciones o mantenimiento afectan notablemente la disponibilidad del sistema.

A medida que la disponibilidad crece, la capacidad para producir se incrementa, debido a que el equipo estará en funcionamiento un mayor porcentaje de tiempo, la expresión para el cálculo de la disponibilidad es la siguiente:

$$A_o = \frac{T_{Total\ SoFu}}{T_{Total\ SoFu} + T_{Total\ SoFa}}$$

1.2.7 Tiempo porcentual de recuperación $TTR_{\%}$

El tiempo porcentual de recuperación, es el tiempo para el cual se logra finalizar con éxito cierto porcentaje de la tarea de mantenimiento analizada, por ejemplo TTR_{90} corresponde al tiempo para el cual se realizaron con éxito el 90% de las pruebas.

Dado que la función de mantenibilidad $M(t)$, de un sistema es la probabilidad de que el mismo sea recuperado para su funcionamiento en un tiempo t , para el cálculo de el tiempo porcentual de recuperación es necesario contar con la función de mantenibilidad del sistema, de esta despejamos t , y valuamos la expresión para el porcentaje de $M(t)$ deseado.

1.3. Fundamentos de fiabilidad

La duración de un sistema esta determinada en gran medida por su diseño, los métodos modernos de diseño están basados en la evaluación de la fiabilidad de los sistemas, es por ello que actualmente se suele decir que se diseña para la fiabilidad, sin embargo hay otras medidas que se pueden implementar para lograr altos niveles de fiabilidad, como lo son las medidas de mantenibilidad adecuadas para cada sistema.

La fiabilidad la definimos como *“la probabilidad de que un sistema o dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado”*.¹

Otra forma para aumentar la fiabilidad del sistema es mediante la introducción de redundancias en ubicaciones de componentes específicos. Es

¹ Joel A. Nachlas, Fiabilidad, Isdefe., 1ra. Edición, Madrid 1995, Pág. 18

decir, alterando la configuración del sistema sustituyendo un solo componente con dos o más copias del mismo en paralelo. Los problemas en este caso podrían ser un aumento de peso o cualquier otra consecuencia física de asignar el componente extra o talvez el mas importante el aumento del costo o precio del sistema debido al costo de cada copia del componente incluido en el mismo.

Según lo anterior, se puede entonces decir que un sistema tiene un estado Φ donde:

$$\Phi = \begin{cases} 1 & \text{si el sistema funciona} \\ 0 & \text{si el sistema ha fallado} \end{cases}$$

Y suponiendo que un sistema consta de "n" componentes y que su estado esta determinado por el de sus componentes entonces podemos definir:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Como el numero de componentes del sistema donde:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{si el componente i funciona} \\ 0 & \text{si el componente i ha fallado} \end{cases}$$

Entonces decimos que el estado Φ del sistema, en una función del estado de sus componentes:

$$\Phi = \Phi(X)$$

Es decir que cada componente del sistema influye en el estado del mismo.

Y ya que definimos la fiabilidad como la probabilidad de que un sistema realice adecuadamente su función prevista, la podemos definir así:

$$P[\Phi(X) = 1]$$

O bien,

$$r(p) = P[\Phi(X) = 1]$$

Donde $r(p)$ es la fiabilidad del sistema.

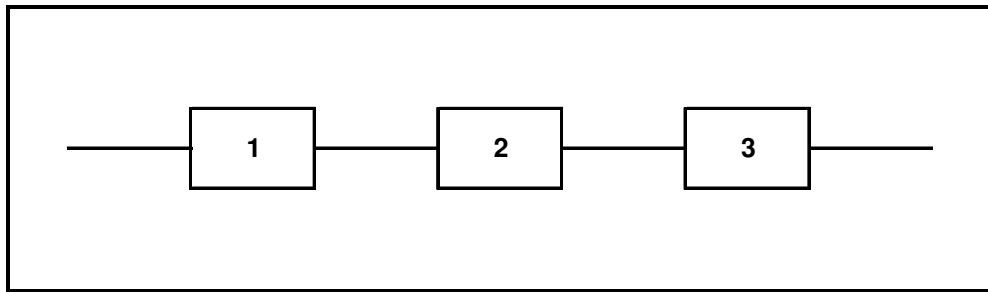
1.3.1 Estructuras de sistemas

Se conocen dos tipos de relaciones estructurales entre dispositivos de un sistema, estas son: Estructura serie y Estructura paralela. Es lógico hacer la relación con los respectivos circuitos eléctricos serie y paralelo, sin embargo hay que hacer énfasis aquí en que esto no implica que los componentes o dispositivos del sistema tengan que estar interconectados físicamente.

1.3.1.1 Fiabilidad en sistemas de estructura serie

Un sistema serie es aquel en el que todos los componentes o dispositivos deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema, generalmente utilizamos la misma representación gráfica de un circuito eléctrico serie como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Sistema serie de tres componentes



Fuente: Fiabilidad. Idefe España.

La falla de uno de los dispositivos o componentes de un sistema con estructura serie, causara la falla del sistema completo, bajo este concepto definimos dos de los puntos mas importante para el calculo de la fiabilidad, los cuales son el funcionamiento correcto y la probabilidad de que esto suceda.

En un sistema de estructura serie el hecho de que todos sus componentes tengan que funcionar para que el sistema funcione implica que $\Phi(\mathbf{X}) = 1$ si $X_i = 1$ para todo i , y 0 de cualquier otro modo, entonces según lo anterior podemos definir la función de estado del sistema según la estructura serie como:

$$\Phi(X) = X_1 * X_2 * X_3 \dots X_n$$

$$\Phi(X) = \prod_{i=1}^n X_i$$

Solo el funcionamiento de todos los componentes hace que el sistema funcione.

Entonces para un sistema con estructura serie tenemos que su fiabilidad esta dada por:

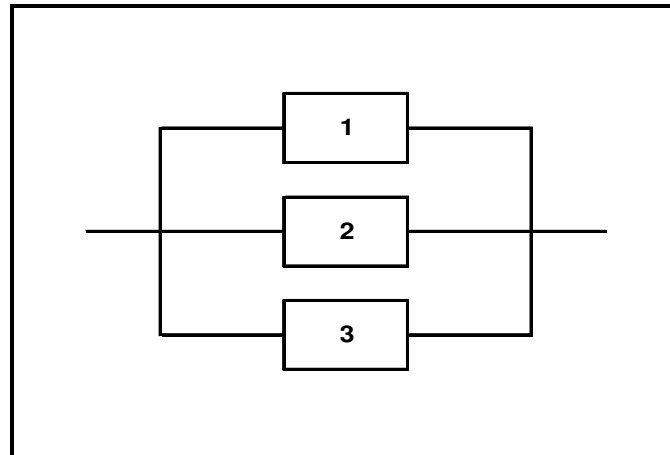
$$r(p) = P[\Phi(X) = 1] = P[\prod_{i=1}^n X_i = 1] = \prod_{i=1}^n P[X_i = 1]$$

Este resultado nos muestra que la fiabilidad de un sistema cuyos componentes se encuentran en estructura serie, es el producto de las fiabilidades de cada componente.

1.3.1.2 Fiabilidad en sistemas de estructura paralela

Un sistema de estructura paralela es aquel en el que el funcionamiento de cualquiera de los componentes implica el funcionamiento del sistema, generalmente se utiliza la misma representación gráfica que la de un circuito eléctrico paralelo como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Sistema Paralelo de Tres Componentes



Fuente: Fiabilidad. Isdefe España.

Para el cálculo de la fiabilidad de un sistema paralelo es muy importante hacer dos observaciones la primera es que un sistema paralelo falla cuando todos sus componentes fallan; y la segunda es que el sistema funciona cuando se produce el complemento de “todos los componentes fallan”.

Es decir el sistema funciona cuando al menos uno de sus componentes funciona.

Según lo anterior para un sistema paralelo $\Phi(\mathbf{X}) = 1$ si por lo menos algún $X_i = 1$

Entonces:

$$\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i)$$

La comprobación de la igualdad anterior se puede encontrar en el anexo 1 de este trabajo.

Entonces para un sistema en estructura paralela:

$$r(p) = P[\Phi(X) = 1] = P\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) = 1\right]$$

$$r(p) = 1 - P\left[\prod_{i=1}^n (1 - X_i) = 1\right]$$

$$r(p) = 1 - \prod_{i=1}^n P(1 - p_i)$$

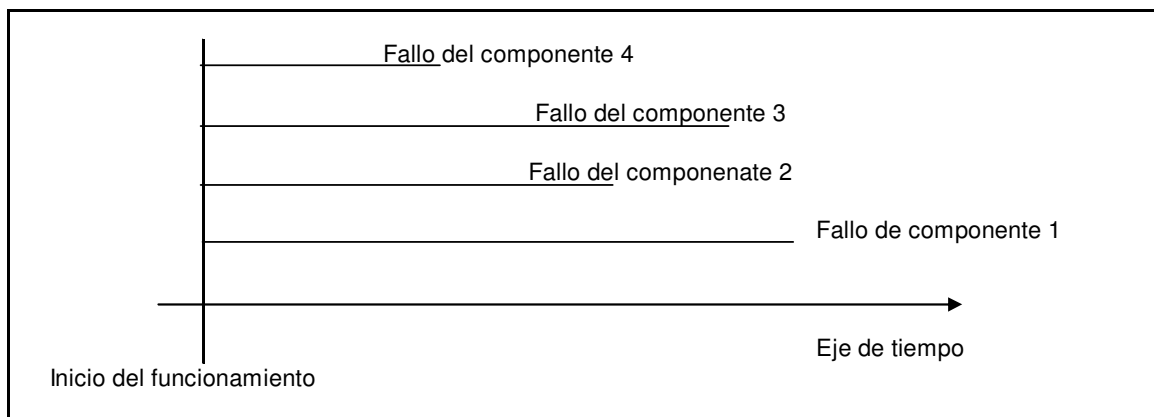
La cual nos da la fiabilidad para un sistema en estructura paralela, la comprobación de la expresión anterior se puede encontrar en el anexo 2 de este trabajo.

1.3.2 Fiabilidad en función del tiempo

Un parámetro fundamental en el estudio de la fiabilidad es el tiempo, podemos resaltar el hecho del “funcionamiento correcto a lo largo del tiempo” como la característica mas importante de la fiabilidad. Ya que la fiabilidad, es la única medida para garantizar la permanencia de un sistema.

En fiabilidad la permanencia del sistema o duración de vida, son sinónimos de tiempo. También es común en fiabilidad medir el tiempo en base al accionar de los dispositivos como por ejemplo: ciclos de funcionamiento, horas de operación, número de conmutaciones, etc. En una muestra de dispositivos idénticos la duración de vida, o supervivencia del dispositivo, no es la misma, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Duración de vida de componentes idénticos



Fuente: Logistics Engineering and Management EE.UU.

En la figura 5, podemos observar la dispersión de los tiempos de vida o supervivencia para dispositivos idénticos. Dicha dispersión es bien modelada con la probabilidad, y por lo tanto, con una función de distribución. Es por esta razón que el estudio de la fiabilidad está basado en el análisis estadístico de datos de supervivencia, donde en este caso nuestros datos serán los diferentes tiempos de vida de los componentes.

Así como en otras aplicaciones de análisis estadístico se ha utilizado la función de distribución y la función de densidad, en fiabilidad para el análisis de

datos de supervivencia se utiliza la función de fiabilidad o función de supervivencia.

1.3.2.1 Función de fiabilidad

La función de fiabilidad proporciona la probabilidad de que un componente o sistema este funcionando al cabo de cierto tiempo, es decir que si un componente tiene una función de fiabilidad de 0.94 con $t = 500$ horas, la probabilidad de que el componente siga funcionando satisfactoriamente después de 500 horas es de 0.94.

Entonces definimos la Función de Fiabilidad como:

$$F(t) = P_r[T \geq t] \quad \text{Probabilidad de funcionamiento más allá de un tiempo "t"}$$

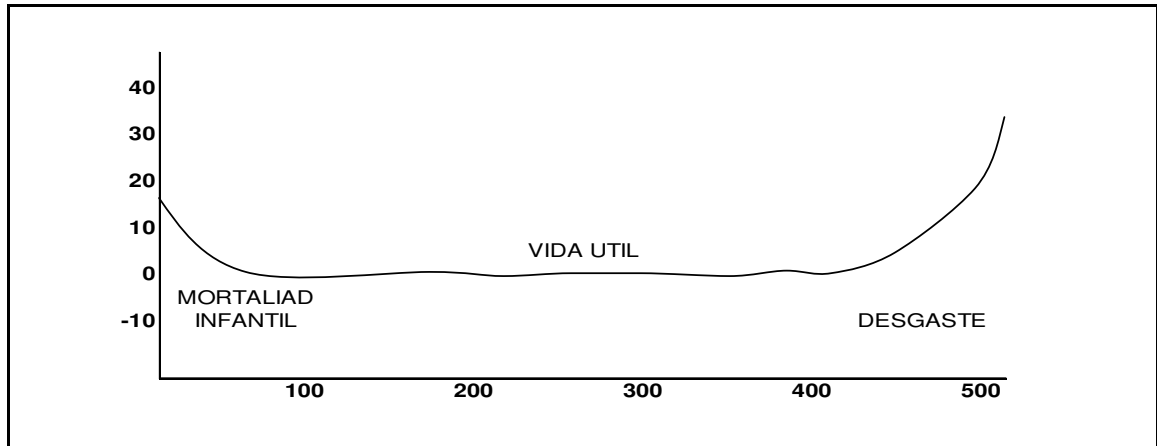
$$P_r[T \geq t] = F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

Donde $f(t)$ es la función de distribución sobre la duración de vida "t".

1.3.2.2 Curva de la bañera

Muchos dispositivos o componentes, durante su tiempo de vida se adaptan a un patrón de falla conocido como curva de la bañera, que representa la probabilidad de falla de un elemento, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. La Curva de la Bañera



Fuente: Mantenimiento de equipo electrónico. España p.e. 1999.

La gráfica esta compuesta inicialmente de una zona decreciente, llamada mortalidad infantil, luego en la vida media del dispositivo muestra una probabilidad de falla casi constante, y finalmente una probabilidad de falla que aumenta con la edad del dispositivo. Esta curva es muy útil para el análisis de elementos reales, el los cuales los dispositivos se adaptan a la forma de la curva de la bañera por diversos factores, como lo son defectos de fabricación o diseño que pueden causar grandes probabilidades de falla en la primera etapa de vida útil del dispositivo o en al zona de mortalidad infantil, así como también el envejecimiento del dispositivo provoca altas probabilidades de falla al termino de su vida útil.

2. FUNDAMENTOS ESTADÍSTICOS PARA EL CÁLCULO DE MEDIDAS DE MANTENIBILIDAD

La ingeniería de mantenibilidad, se basa en el estudio de la duración de procesos de mantenimiento, y poder calcular la probabilidad de que el sistema sea recuperado en cierto tiempo, para esto se utilizan herramientas estadísticas, tales como: función de densidad, función de distribución, tasa de fallos, etc. Todas estas herramientas estadísticas tienen amplias ramas de aplicación, en múltiples ciencias, sin embargo el interés principal estará centrado en el estudio de la duración de las tareas de mantenimiento para el cálculo de las medidas de mantenibilidad, debido al hecho de que un sistema funcione durante un periodo determinado de tiempo, solo puede ser estudiado en términos de probabilidad, también se hará uso de herramientas tales como: medidas de posición y medidas de dispersión para el análisis de datos de muestra.

En la práctica durante la operación de muchos equipos o sistemas, los ingenieros a cargo del mantenimiento, deben realizar pruebas y ensayos a fin de reunir datos relacionados con el tiempo necesario para completar las diferentes tareas de mantenimiento. Todos los datos reunidos llamados " t_{ri} ", en donde $i = 1, \dots, n$, son los datos necesarios para que a través de análisis estadísticos podamos calcular las diferentes medidas de mantenibilidad de nuestro interés, tales como: la función de mantenibilidad $M(t)$, el tiempo de recuperación TTR, el tiempo medio de recuperación MTTR, la realización de la recuperación $RS(t_1, t_2)$, el tiempo porcentual de recuperación $TTR\%$ y el tiempo medio entre fallas MTBF.

2.1 Medidas de posición

Las medidas de posición de una muestra de datos proporcionan una medida cuantitativa de donde se encuentra el centro de los datos de la muestra. Lo cual es importante pues permiten visualizar el promedio de los datos o muestras recabadas para el análisis. Las medidas de posición comúnmente utilizadas en cálculos de mantenibilidad son: media de la muestra y mediana de la muestra.

2.1.1 Media de la muestra

La media es simplemente un promedio numérico de una muestra de datos, suponiendo que los datos recabados de un ensayo son $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. Donde t son los diferentes tiempos empleados en tareas de mantenimiento idénticas, realizadas por personal igualmente capacitado y en condiciones de entorno idénticas, la media de la muestra esta dada por:

$$\bar{t} = \sum_{t=1}^n \frac{t_t}{n} = \frac{t_1+t_2+t_3+\dots+t_n}{n}$$

Donde “ n ” es el número de tiempos recabados.

2.1.2 Mediana de la muestra

La mediana de la muestra es una medida que refleja la tendencia central de los datos de la muestra de manera que no este influenciada por los datos extremos, si en la practica se obtiene una muestra con datos $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_n$, y estos se encuentran ordenados en forma creciente en magnitud, de manera que $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 \dots < t_n$, la mediana de la muestra esta dada por:

$$t = t_{(n+1)/2} \quad \text{Si "n" es impar}$$

$$t = t_{n/2} + t_{(n/2)+1} \quad \text{Si "n" es par}$$

De manera que la mediana de la muestra hace énfasis en el verdadero “centro” del conjunto de datos recabados en las pruebas. La mediana de la muestra es una medida comúnmente usada en cálculos de mantenibilidad relacionados con el SoFu, pues es muy común, que en tareas de mantenimiento idénticas a pesar de que sean realizadas por personal técnico igualmente capacitado y siguiendo las instrucciones especificadas en los manuales de mantenimiento, estas se realicen en intervalos de tiempo distintos, debido a diversos factores externos como lo son factores de habilidades personales de los técnicos de mantenimiento, así como factores del entorno, entonces por medio de la mediana podemos obtener el tiempo promedio que toma cierta tarea de mantenimiento específica, sin considerar los tiempos extremos que muy probablemente fueron afectados por los diversos factores externos ya mencionados.

2.2 Medidas de variabilidad o dispersión

En mantenibilidad la variable a analizar es el tiempo transcurrido, ya sea desde que un sistema empieza a funcionar hasta que falla y deja de hacerlo, o el tiempo transcurrido durante una tarea de mantenimiento. La variabilidad de la muestra juega un papel importante en el análisis de datos, ya que ha menudo una gran variabilidad en las muestras puede provocar que se pierdan o pasen desapercibidos detalles que se quieren encontrar.

Es por ello que la mantenibilidad se apoya también en medidas como: el rango de la muestra, o la desviación estándar, las cuales permiten tener un conocimiento de la variabilidad de los datos con que se está trabajando, que en este caso será cualquiera de los tiempos antes mencionados.

2.2.1 Rango de la muestra

El rango de la muestra proporciona la variabilidad o dispersión de los datos en torno a la media, si suponemos que $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, son los tiempos recabados en el muestreo el rango de la muestra esta dado por:

$$\text{Rango de la muestra} = t_{\max} - t_{\min}$$

2.2.2 Desviación estándar

La medida de dispersión muestral mas utilizada comúnmente es la desviación estándar. Si $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, son los tiempos muestreados. La desviación estándar de la muestra es:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_i - \bar{t})^2}{(n-1)}}$$

Donde \bar{t} es la media de la muestra, una variabilidad grande en un conjunto de datos, produce valores grandes de la desviación estándar, lo que nos indica la dispersión de los datos de la muestra con respecto a la media.

2.3 Variables aleatorias

En estadística el resultado de un experimento es una variable aleatoria, ya que puede tomar diferentes valores determinados por el resultado del experimento. En mantenibilidad sin embargo la variable aleatoria será el tiempo de duración de cada tarea de mantenimiento realizada TTR.

Una variable aleatoria puede ser discreta si en todo caso se puede conocer su conjunto de posibles resultados, sin embargo de la naturaleza de la variable aleatoria TTR en mantenibilidad es obvio que esta no pertenece al grupo de las variables aleatorias discretas, ya que la variable TTR puede tomar valores de una forma escalada y se le denomina variable aleatoria continua. En la práctica las variables aleatorias continuas representan valores medidos, tales como: distancias, temperaturas, pesos, tiempos, etc., mientras que las variables aleatorias discretas representan datos contados tales como, el número de componentes defectuosos en una muestra.

2.3.1 Distribuciones discretas de probabilidad

Una variable aleatoria discreta toma cada uno de sus posibles valores con cierta probabilidad, por ejemplo: una variable aleatoria discreta comúnmente analizada en fiabilidad es el número de componentes defectuosos encontrados después un período de prueba, con frecuencia se representan todas las probabilidades de una variable aleatoria X mediante una función de X , por tanto.

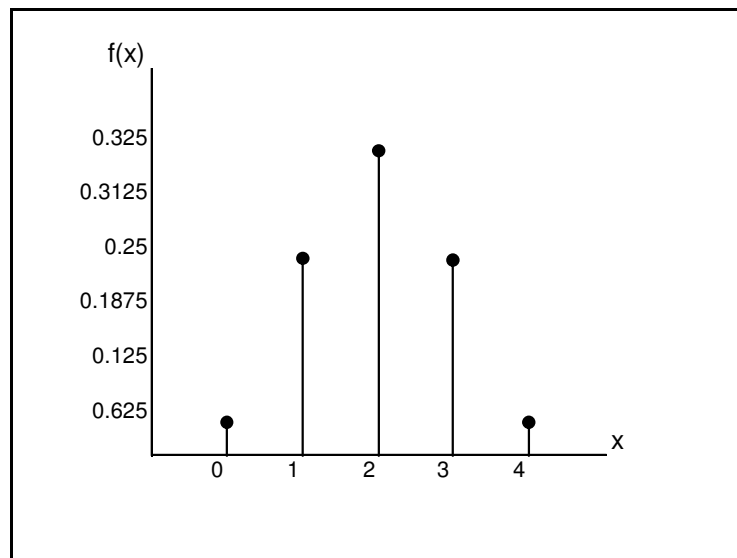
$$f(x) = P(X = x) \quad \text{donde} \quad f(x) \geq 0 \quad \text{y} \quad \sum f(x) = 1$$

En algunas ocasiones una representación gráfica de los posibles valores de una variable aleatoria discreta y sus probabilidades de ocurrencia, puede ser de mucha ayuda ya que ésta es formada por los puntos $(x, f(x))$, y es conocida como distribución de probabilidad.

Las formas mas comunes de visualización de una distribución discreta de probabilidad son: el histograma de probabilidad y las gráficas de barras.

La figura 7 muestra una representación gráfica en barras, de una distribución discreta de probabilidad, donde el eje x representa los posibles valores de la variable aleatoria, y $f(x)$ las probabilidades de ocurrencia de cada valor de x , la cual permite ver de una forma fácil que valores de x tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

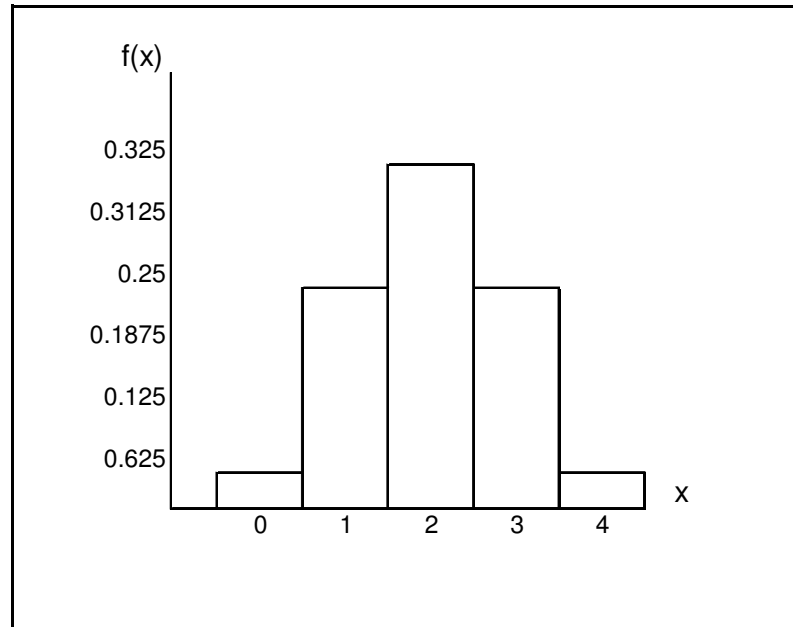
Figura 7. Gráfica de Barras de una Distribución Discreta de Probabilidad



Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Prentice-Hall México

La figura 8 muestra la misma distribución discreta de probabilidad, por medio de un histograma de probabilidad, el cual se forma por medio de rectángulos de los cuales sus bases están centradas en cada uno de los valores de x , y sus alturas son iguales a la probabilidad dada por $f(x)$. En ambas gráficas, figuras 7 y 8, la suma de las probabilidades es igual a uno, en el caso del histograma de probabilidad, el área de cada rectángulo es igual a la probabilidad de la variable, debido a que cada rectángulo tiene ancho unitario, si en todo caso el ancho de los rectángulos no fuera unitario, se debiera variar su altura de manera que el área siempre siga representando la probabilidad de la variable.

Figura 8. Histograma de Probabilidad de una Distribución Discreta de probabilidad



Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Prentice-Hall México

2.3.1.1 Medida de posición Esperanza

La media o valor esperado de una variable aleatoria se conoce como esperanza matemática describe el lugar donde se centra la distribución de probabilidad. La esperanza es un valor promedio y no necesariamente tiene que ser un posible valor de nuestra variable aleatoria. La esperanza o valor esperado de cualquier variable aleatoria discreta, se puede obtener al multiplicar cada uno de los valores de la variable aleatoria por su correspondiente probabilidad y sumar sus productos. Por ejemplo: una variable aleatoria discreta muy comúnmente analizada en estudios de fiabilidad es el número de componentes defectuosos en una muestra, entonces si se dice que X es nuestra variable cuyos posibles valores son $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ y con distribución de probabilidad $f(x)$, la media o valor esperado de X es.

$$\mu = E(X) = \sum Xf(X)$$

2.3.1.2 Medida de variabilidad Varianza

La varianza es la medida de variabilidad mas importante de una variable aleatoria, pues esta proporciona una descripción adecuada de la forma de la distribución de probabilidad, por ejemplo: se puede tener para varios muestreos, distribuciones de probabilidad que sean diferentes en su forma, pero de valor medio igual entre ellas, en este caso el cálculo de la varianza permitirá conocer que proceso o muestreo es menos uniforme, la varianza de una variable aleatoria discreta esta dada por:

$$\sigma = E[(x - \mu)^2] = \sum (x - \mu)^2 f(x)$$

Donde μ es el valor medio.

Donde la cantidad $x - \mu$ representa la desviación respecto a la media y como en el cálculo de σ esta cantidad se eleva al cuadrado y luego se promedian, la varianza será mucho menor para valores de x que sean cercanos al valor medio μ , dando como resultado cálculos de varianzas grandes para procesos o muestras menos uniformes, y cálculos de varianza mas pequeños para procesos con distribuciones de probabilidad mas uniformes.

2.3.2 Distribuciones continuas de probabilidad

Una variable aleatoria continua tiene una probabilidad cero de tomar exactamente cualquiera de sus valores. Por ello su distribución de probabilidad no se puede dar de forma tabular, en el estudio de mantenibilidad es obvio que nuestra variable a analizar TTR, que puede representar el tiempo de duración del proceso de mantenimiento, pertenece a la clase de variables aleatorias continuas, por ejemplo. Consideremos una variable aleatoria TTR cuyos valores son los diferentes tiempos registrados para concluir una tarea de mantenimiento especifica, realizadas por personal igualmente capacitado y en iguales condiciones de entorno, es imposible que podamos registrar valores exactos para tales tiempos, pues hay un numero infinito de tiempos, dependiendo la exactitud con que queramos medirlos. Por ello en mantenibilidad se trata con intervalos de tiempos y no con valores puntuales, como por ejemplo que cierta tarea de mantenimiento dure al menos cierto tiempo, o no mas de cierto tiempo.

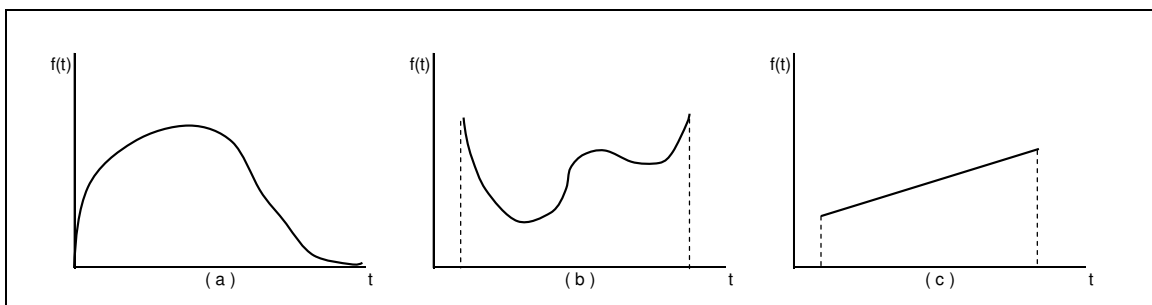
Se tratará el cálculo de probabilidades para varios intervalos de variables aleatorias continuas como $P(a < \mathbf{T} \leq b)$, o $P(\mathbf{T} > c)$. Nótese que para la variable

continua T no importa si se incluye el extremo de intervalo ya que la probabilidad de que T tome un valor exacto es cero.

$$P(a < TTR \leq b) = P(a < TTR < b) + P(TTR = b) = P(a < TTR < b)$$

Ya que la distribución de probabilidad de la variable aleatoria continua TTR no se puede representar de forma tabular, se representará como una función de los valores de la variable continua TTR representándola con la notación funcional $f(t)$. Por lo general llamada función de densidad de probabilidad o simplemente función de densidad de T, la mayor parte de las funciones de densidad que tienen aplicaciones prácticas en el análisis de datos son continuas y sus representaciones gráficas pueden tomar distintas formas, algunas de las cuales podrían ser como las que se muestran en la figura 9.

Figura 9. Funciones de densidad típicas



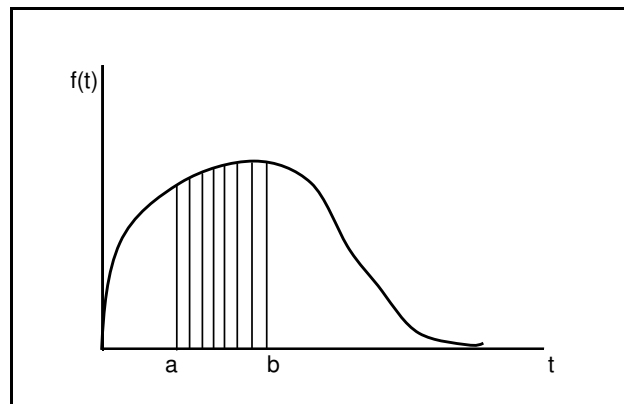
Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Prentice-Hall México

Una función de densidad de probabilidad se construye de modo que el área bajo la curva limitada por el eje t sea igual a 1 cuando se calcula en el rango de T para el que se define $f(t)$. La probabilidad de que T tome un valor

entre a y b es igual al área sombreada bajo la función de densidad entre las ordenadas $t = a$ y $t = b$, como se muestra en la figura 10 y esta dada por

$$P(a < T < b) = \int_a^b f(t) dt$$

Figura 10. $P(a < T < b)$



Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Prentice-Hall México

2.3.2.1 Distribución normal

La distribución normal es la distribución continua de probabilidad mas importante en estadística, pues describe con mucha aproximación fenómenos que ocurren en la naturaleza, industria e investigación. Sin embargo nuestro interés es el que se le pueda dar en aplicaciones de mantenibilidad y confiabilidad.

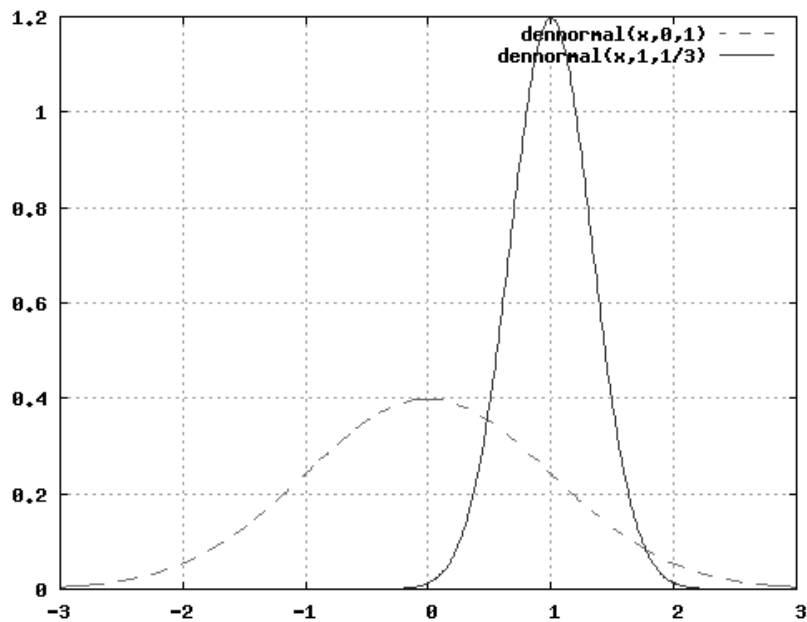
Si los tiempos de parada de un equipo, o los tiempos de falla de un componente, tienen una distribución normal, y los representamos por medio de la variable T, su función de densidad de probabilidad f(t) esta dada por:

$$n(t; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-(1/2)[(t-\mu)/\sigma]^2}$$

Con media μ , desviación estándar σ y donde $\pi = 3.14159\dots$ y $e = 2.71828\dots$

La figura 11 muestra la gráfica de dos curvas normales, para diferentes valores de μ y σ , la curva con línea punteada corresponde a la curva normal estándar con $\mu = 0$ y $\sigma = 1$, entre mas variable sea el conjunto de datos mas baja y ancha será la curva correspondiente.

Figura 11. Gráficas de curvas normales



Fuente: [www..biomates.com/distribucionesprobabilidad/normal/htm](http://www.biomates.com/distribucionesprobabilidad/normal/htm)

El área bajo la curva normal limitada entre dos puntos, representa la probabilidad de que la variable tome un valor entre cualquiera de los dos puntos, debido a la dificultad de resolver las integrales de funciones de densidad normal, existe una tabla de valores Z en la cual se han transformado las observaciones de cualquier variable aleatoria normal, a un nuevo conjunto de observaciones de una variable aleatoria Z con $\mu = 0$ y $\sigma = 1$, por medio de la transformación.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

donde X puede ser cualquier variable aleatoria con función de densidad normal, la tabla de valores Z que van de -3.49 a 3.49 puede encontrarse en el anexo 3 de este trabajo.

2.3.2.2 Distribución exponencial

La distribución exponencial tiene un gran número de aplicaciones, sin embargo nuestro interés se centra en la aplicación que se pueda dar para problemas de mantenibilidad, como tiempos de fallas en componentes, tiempos de recuperación por paradas por mantenimiento (TTR).

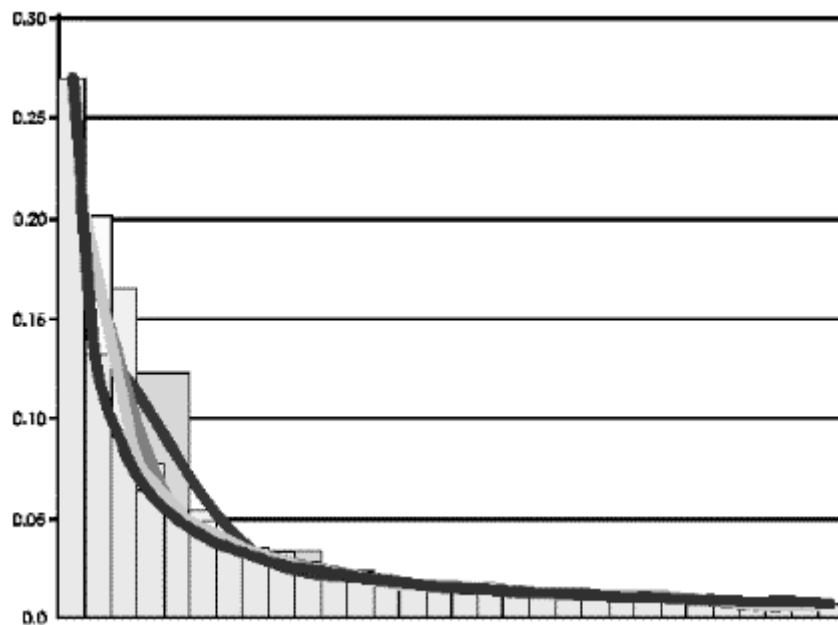
Si el tiempo de falla de un equipo, o componente, tiene una distribución exponencial y lo representamos con la variable t, su función de densidad de probabilidad esta dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\beta} e^{-t/\beta} \quad \text{para} \quad t > 0$$

Donde el parámetro β es el tiempo medio entre eventos, que en el caso del estudio de mantenibilidad, corresponde al tiempo medio entre reparaciones o mantenimientos (MTTR),

En figura 12 muestra se muestra la gráfica de ciertos datos cuya distribución de probabilidad es exponencial, si consideramos que el eje de las avsisas corresponde al tiempo de falla, y el eje de las ordenadas corresponde a la probabilidad de que ocurra la falla, podemos decir que la gráfica muestra una tasa de falla decreciente, pues la probabilidad de falla disminuye con el paso del tiempo.

Figura 12. Gráfica de distribución exponencial



Fuente: www.biomates.com/distribucionesprobabilidad/exponencial/htm

La función de mantenibilidad, basada en el criterio de tiempos de recuperación exponencial, en la cual MTTR es el tiempo medio entre tareas de reparación o mantenimiento, esta dada por:

$$M(t) = 1 - e^{(-t/MTTR)}$$

2.3.2.3 Distribución de Weibull

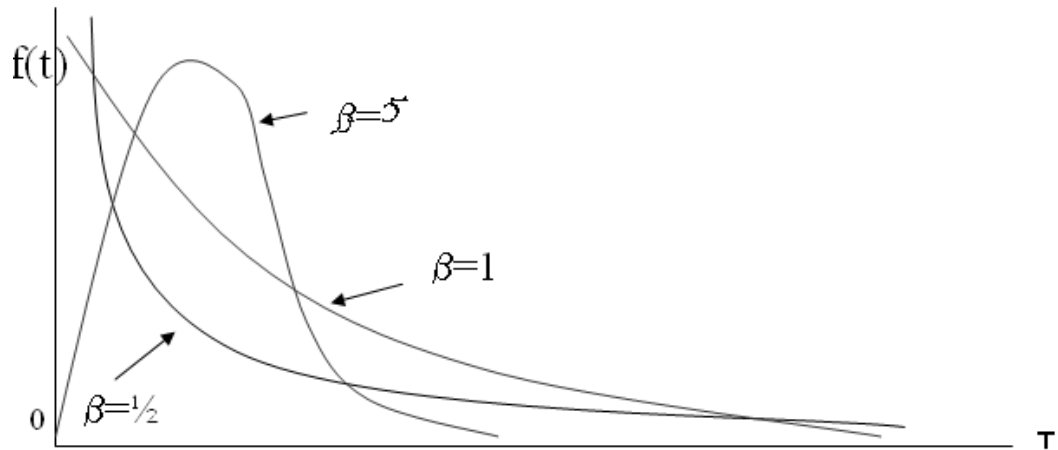
La distribución Weibull se aplica a problemas de confiabilidad y de prueba de vida como, los tiempos de falla y duración de vida de un componente o equipo. Si el tiempo de falla de un equipo tiene una distribución de Weibull y lo representamos con la variable t , la función de densidad de probabilidad $f(t)$ esta dada por:

$$f(t) = \alpha \beta t^{\beta-1} e^{-\alpha t^\beta} \quad \text{para } t > 0$$

Donde α y β son los parámetro de escala y forma de la distribución.

La figura 13 muestra las gráficas de Weibull para distintos valores de β y $\alpha = 1$, se puede observar que las curvas cambian de forma para los diferentes valores de los parámetros, entre mas grande es el parámetro de forma de las graficas vemos que estas empiezan a volverse en forma de campana parecida a la distribución normal pero con la diferencia de que no son simétricas, para el caso en que el parámetro de forma β es igual a uno, la distribución de Weibull se reduce a la distribución exponencial.

Figura 13. Gráfica de la función de distribución de Weibull



Fuente: www.biomates.com/distribucionesprobabilidad/weibull/htm

La función de matenibilidad $M(t)$, basada en el criterio de que los tiempos de reparacion o mantenimiento de un equipo se representan por medio de una distribución de Weibull, esta dada por:

$$M(t)_{weibull} = 1 - e^{(-t/\alpha)^\beta}$$

3. EL PROCESO DE MANTENIMIENTO DE EQUIPO ELECTRÓNICO

El proceso de mantenimiento puede definirse como: “El conjunto de tareas de mantenimiento realizadas por el personal de mantenimiento para mantener la funcionalidad del sistema durante su vida operativa.

Cualquier empresa o institución en la actualidad tienen que atender situaciones críticas por lo que necesitan garantizar que su componente logístico funcione adecuadamente en operaciones de constante emergencia. Es por ello que un programa de mantenimiento planeado ayudará a optimizar y garantizar el funcionamiento de cualquier equipo electrónico que se utilice.

El proceso de mantenimiento se realiza con el fin de mantener la funcionalidad de cualquier sistema y garantizar la disponibilidad, para ello se necesitan ciertos recursos los cuales facilitaran el proceso. Entre los recursos necesarios para la realización con éxito de toda tarea de mantenimiento se pueden mencionar:

- Humano
- Repuestos
- Herramientas
- Instalaciones
- Datos técnicos
- Recursos informáticos

Es necesario hacer hincapié que el proceso de mantenimiento cuenta con sus propias restricciones. Entre las más frecuentes se pueden mencionar:

- Presupuesto
- Programación, tiempo disponible
- Reglamentaciones de seguridad
- Entorno, clima
- Lenguas extranjeras
- Cultura y costumbres tradicionales

Se debe enfatizar que cuando se analiza un proceso de mantenimiento debe de considerarse tanto los recursos como todas las restricciones, a fin de conseguir un óptimo control de aquellas operaciones que resultan complejas y que tienen un gran impacto en la seguridad, fiabilidad, costo, prestigio y otras características decisivas para la conducción competitiva de las operaciones.

Dentro de los objetivos en la utilización de un programa de mantenimiento de equipo electrónico se puede mencionar:

- Prolongar la vida útil del equipo electrónico que forma parte del componente logístico de la institución.
- Optimizar la operación del equipo en situaciones de emergencia y crisis.
- Reducir costos para contar con los fondos necesarios de reposición para reemplazar los equipos que han cumplido con su ciclo de vida.
- Garantía de la fiabilidad y seguridad exigidas, lo que reduce la probabilidad de presencia de fallas.

3.1 Clasificación de las tareas de mantenimiento

Una tarea de mantenimiento es el conjunto de actividades que debe realizar el personal de mantenimiento para mantener la funcionalidad del equipo o sistema.

En la práctica las tareas de mantenimiento supuestamente idénticas, realizadas bajo condiciones similares, requieren diferentes lapsos de tiempo y esto se debe principalmente a tres razones: la primera, a factores personales que representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, vista, autodisciplina, formación, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal; la segunda se debe a factores condicionales, que representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido la falla en la condición física, forma, geometría y características similares del equipo o sistema sometido a mantenimiento; y la tercera se debe a factores de entorno, que reflejan la influencia de aspectos como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año y viento que puedan afectar al personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea de mantenimiento.

Un sistema o plan de mantenimiento, requiere del uso ponderado de estrategias de mantenimiento básicas como lo son: las tareas de mantenimiento preventivas (cuando se interviene el equipo periódicamente), correctivas (cuando se permite que un equipo funcione hasta que falle para poder repararlo o reemplazarlo) y predicativas (cuando se identifica la condición del equipo a través de los síntomas que emite al exterior).

3.1.1 Tareas de mantenimiento preventivo

Las tareas de mantenimiento preventivo (Preventive Task, PRT), es también conocido como Mantenimiento Planificado y se encarga de la programación de inspecciones de: funcionamiento, seguridad, ajustes, reparaciones, análisis, limpieza, lubricación, calibración, entre otras, que deben realizarse a los equipos en forma periódica en base a un plan previamente establecido y no a una demanda del operario o usuario.

La característica principal del mantenimiento preventivo es la de inspeccionar los equipos y detectar las fallas en su fase inicial y así corregirlas en un momento oportuno.

Dentro de las ventajas que conlleva utilizar este tipo de mantenimiento se puede mencionar:

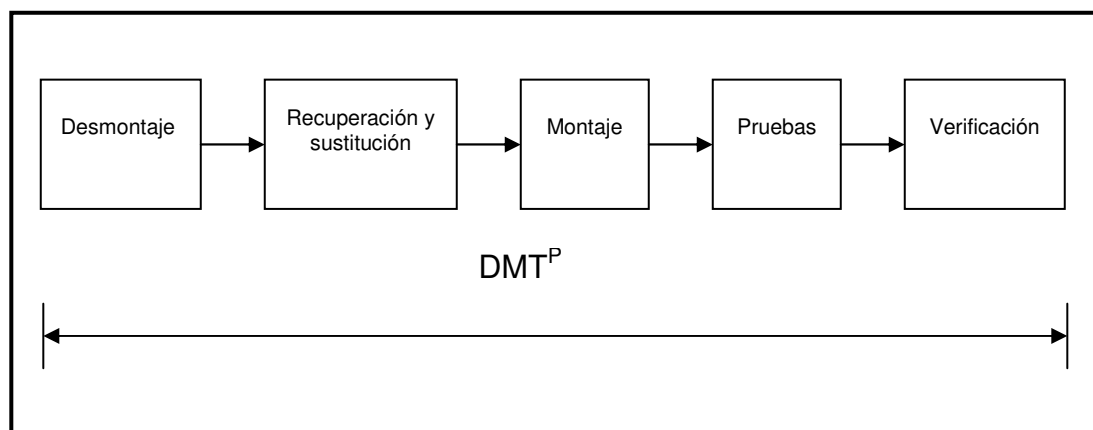
- Confiabilidad, ya que los equipos operan en mejores condiciones de seguridad, ya que se conoce su estado, y sus condiciones de funcionamiento.
- Disminución del tiempo de parada de los equipos y máquinas.
- Mayor duración, de los equipos e instalaciones.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de Mantenimiento debido a una programación de actividades.
- Menor costo de las reparaciones.

Una tarea de mantenimiento preventivo típica consta de las siguientes actividades:

- Desmontaje
- Recuperación o sustitución
- Montaje
- Pruebas
- Verificación

La figura 14 presenta en forma gráfica las diferentes etapas de una tarea de mantenimiento preventivo y la duración de la tarea representa por DMT^P , que representa el tiempo transcurrido necesario para la conclusión con éxito de ésta tarea.

Figura 14. Representación Gráfica de una Tarea Típica de Mantenimiento Preventivo



Fuente: Mantenibilidad. Isdefe España.

Las tareas de mantenimiento de este tipo se realizan antes de que tenga lugar la transición al SoFa, con el objetivo principal de reducir el coste de mantenimiento y la probabilidad de fallo.

Dentro de las tareas de mantenimiento preventivo más comunes se pueden mencionar: sustituciones, renovaciones, revisiones generales, entre otros y es necesario hacer énfasis que estas tareas se deben realizar, a intervalos fijos.

3.1.2 Tareas de mantenimiento correctivo

Las tareas de mantenimiento correctivo (*Corrective Tasks, CRT*) son las tareas que se realizan con intención de recuperar la funcionalidad del sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar una función. Estas tareas se inician tras la producción de la falla, es decir después de que el equipo presenta anomalías en su funcionamiento.

El mantenimiento correctivo se aplica en sistemas muy complejos, donde no hay forma de predecir las fallas ya que impide la realización de un diagnóstico fiable que determine las causas que provocan dichas fallas, pues se ignora si éstas se deben al maltrato, abandono, desconocimiento del manejo, desgaste natural o alguna otra causa.

Dentro de las desventajas que se pueden mencionar al utilizar este tipo de mantenimiento están:

- La no confiabilidad ya que los equipos operan en condiciones de seguridad no establecidas, no se conoce su estado y condiciones de funcionamiento.

- Aumento del tiempo de parada ya que se obliga a apagar o detener el equipo para su revisión y posterior reparación.
- Menor duración de los equipos, ya que estas únicamente reciben el mantenimiento cuando estos se descomponen.
- Aumento en el costo de reparación y en muchas ocasiones la renovación total de las reparaciones.

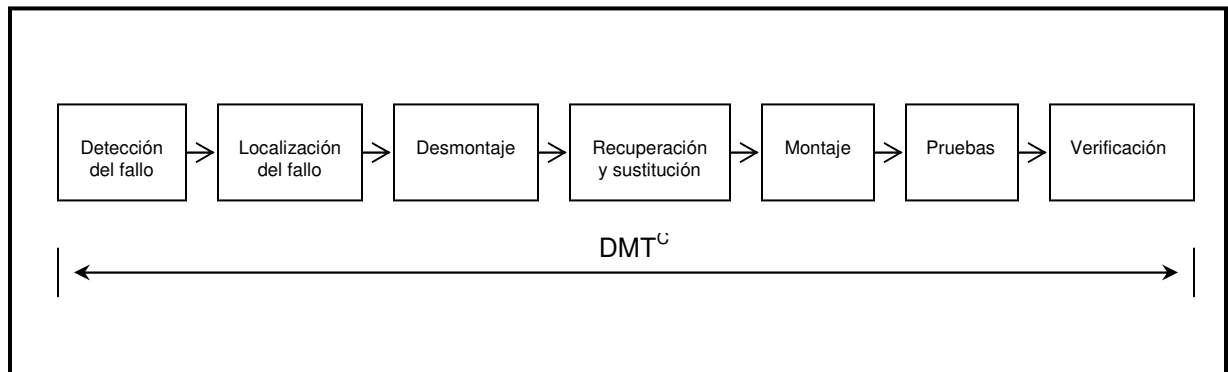
Por el gran número de desventajas que mencionamos anteriormente resulta obvio, que una política formal de mantenimiento en cualquier empresa no puede basarse en el criterio de aplicar mantenimiento correctivo a los equipos cuando sea necesario, sin embargo no importando cual sea la política o programa de mantenimiento al que este sujeta la empresa, siempre debe estarse preparado logísticamente para las tareas de mantenimiento correctivas.

Una tarea de mantenimiento correctivo típica consta de las siguientes actividades:

- Detección del fallo
- Localización del fallo
- Desmontaje
- Recuperación o sustitución
- Montaje
- Pruebas
- Verificación

A continuación en la figura 15 se muestra una representación gráfica de la tarea de mantenimiento Correctivo CRT.

Figura 15. Representación gráfica de una tarea típica de mantenimiento correctivo.



Fuente: Mantenibilidad. Isdefe España.

La duración se representa por DMT^C , que representa el tiempo transcurrido necesario para la conclusión con éxito de la tarea de mantenimiento correctivo.

3.1.3 Tareas de mantenimiento predictivo

Consiste en el monitoreo continuo de máquinas y equipos con el propósito de detectar y evaluar cualquier pequeña variación en su funcionamiento, antes de que se produzca una falla, con el objetivo primordial de dar tiempo a corregirla sin perjuicios al equipo o maquinaria, ni la detención de la producción.

Estos controles pueden llevarse a cabo de forma periódica o continua, en función de tipos de equipo, sistema productivo, actividades a realizar, entre otras.

Para la aplicación del mantenimiento predictivo se hace uso de instrumentos del diagnóstico y pruebas a los equipos electrónicos, como lo son multímetro, osciloscopio, medidores de temperatura, humedad, vibraciones, interferencias electromagnéticas entre otras.

Dentro de las ventajas al utilizar este tipo de mantenimiento se puede mencionar:

- Reduce los tiempos de parada.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- La verificación del estado de la maquinaria, tanto realizada de forma periódica como de forma accidental, permite confeccionar un archivo histórico del comportamiento.
- Conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
- Toma de decisiones sobre la parada en momentos críticos.
- Confección de formas internas de funcionamiento o compra de nuevos equipos.
- Permitir el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizada por el mantenimiento correctivo.

- Facilita el análisis de las averías.

3.2 La administración del mantenimiento

“La administración puede ser considerada como un sistema de toma de decisiones, cuyo objetivo es dirigir los recursos disponibles hacia la realización del objetivo de la organización.”²

La administración del mantenimiento se puede describir como el conjunto de funciones, técnicas, métodos y herramientas, que combinadas con el recurso humano adecuado permiten lograr una ejecución efectiva del mantenimiento de cualquier equipo.

Dentro de las ventajas que conlleva hacer uso de una buena administración de mantenimiento se puede mencionar:

- Reducción de costo del ciclo de vida del equipo.
- Planificación y programación de recursos, para asegurar que los recursos apropiados se encuentran disponibles para desarrollar las tareas.
- Mejoramiento en la utilización de los recursos disponibles, ya que se contará con el personal correcto, en la posición correcta, los repuestos correctos y en el tiempo correcto.
- Incremento en la productividad del equipo.

² Jezdimir Knezevic, Mantenimiento, Isdefe., 4ta. Edición, Madrid, 1996., Pág. 169

- Monitoreo de las condiciones de los equipos y componentes reparados para estimar tiempo de vida y proveer alertas con anticipación a la falla.

El objetivo final de la administración de mantenimiento es el de hacer un uso óptimo del recurso humano, del presupuesto asignado para conservar el equipo e instalaciones y del tiempo para llevar a cabo una reparación o servicio.

3.2.1 Los recursos de mantenimiento

Todo sistema de mantenimiento debe contar con los recursos necesarios y adecuados, que permitan que el proceso de mantenimiento sea parte de un sistema integrado de control total de la producción. Una adecuada planificación y organización del proceso de mantenimiento depende principalmente de la disponibilidad de los recursos con que se cuenta. Naturalmente que un manejo eficiente de materiales, repuestos y equipos requiere de un buen sistema de codificación, de almacenaje y de inventario. Los recursos de mantenimiento más importantes con que se debe contar son:

a) Humano

El recurso humano debe ser capaz de aplicar con eficiencia las tareas de mantenimiento. El equipo humano a cargo del mantenimiento debe reunir ciertos conocimientos y habilidades, ya que, no solo tiene que enfrentar los problemas que se presenten con los diversos dispositivos y equipamiento que intervienen en el sistema de mantenimiento (reparaciones, calibraciones, modificaciones, etc.), sino que también deben adquirir familiaridad con los medios informáticos.

La calidad del personal disponible dependerá principalmente del entorno en el que opera la compañía. Dentro de las consideraciones que deben tomarse en cuenta para la asignación de personal en el área de mantenimiento son:

- Asignar personal calificado, (operadores de máquinas y herramientas), por períodos largos de permanencia, (pero no para siempre).
- Los trabajos en planta (mantenimiento, reparación, modificaciones, entre otros), requieren de personal que posea entrenamiento en los campos de aplicación.
- Brindarle al personal capacitación continua para que éste pueda en un momento determinado resolver algún problema que se le presente.
- Es recomendable contar con la formación de un equipo multidisciplinario los cuales deben elaborar y llevar a cabo el plan de mantenimiento y proporcionar el entrenamiento adecuado a los operarios.

b) Repuestos

El objetivo de la gestión de repuestos es alcanzar el equilibrio óptimo entre el coste de posesión (depreciación, intereses, inventario, etc.) y el coste de la «ruptura de stock» (indisponibilidad). La principal dificultad de esta acción surge de la variedad y complejidad de los miles de artículos distintos y sus tasas de utilización tan diversos.

Sin embargo es necesario que el equipo de mantenimiento cuente con un stock de repuestos los cuales deben de estar bien identificados y clasificados según su tasa de uso, lo cual ayudara a la reducción del tiempo de parada.

c) Herramientas

El objetivo de la organización de herramientas es similar al de la organización de los repuestos, pero el problema de control es aquí diferente, porque las herramientas no son consumibles en el mismo sentido. El problema principal con las herramientas retornables es el desarrollo de un sistema para controlar su préstamo (incluyendo su sustitución si es necesario) cuando son devueltas.

Es necesario que el equipo de mantenimiento cuente con las herramientas necesarias para desempeñar su labor, así mismo que se encuentre entrenado y capacitado para hacer uso eficiente y eficaz de las mismas ya que de ello dependerá en gran parte el buen funcionamiento del equipo.

d) Instalaciones

Incluye las instalaciones especiales precisas para la ejecución de las tareas de mantenimiento. Deben considerarse las plantas industriales, edificios, edificaciones portátiles, fosos de inspección, talleres de mantenimiento, laboratorios de calibración y otras instalaciones para reparaciones especiales y revisiones generales relacionadas con cada tarea de mantenimiento.

e) Datos técnicos

Procedimientos de comprobación, instrucciones de mantenimiento, procedimientos de inspección y calibración, procedimientos de revisiones generales, instrucciones de modificación, información sobre las instalaciones, planos y especificaciones que son necesarios para realizar las funciones de mantenimiento del sistema. Tales datos no sólo se refieren al sistema, sino también al equipo de prueba y apoyo, transporte y manejo del equipo, equipo de instrucción e instalaciones.

f) Recursos informáticos

Comprende los ordenadores y sus accesorios, «software», discos y bases de datos, etc., necesarios para realizar las funciones de mantenimiento. Incluye tanto la vigilancia de la condición como equipo para el diagnóstico.

3.2.2 La carga de trabajo

La principal distinción se encuentra entre los trabajos programados y los no programados. Los primeros están ligados principalmente a las tareas de mantenimiento preventivo, mientras que los segundos se encuentran relacionados con las tareas de mantenimiento correctivo.

3.2.2.1 Trabajos programados

Los trabajos programados están ligados principalmente a las tareas de mantenimiento preventivo (tarea que se realiza para reducir la probabilidad de fallo del elemento o sistema, o para maximizar el beneficio operativo), y predictivo (tarea de mantenimiento que se realiza para conseguir una visión de

la condición del elemento o sistema, o descubrir un fallo oculto, a fin de determinar el curso de acción posterior para conservar la funcionalidad del elemento o sistema.).

El contar con una adecuada programación de las tareas donde se especifiquen a detalle y con antelación el recurso humano, repuestos y herramientas a utilizar, ayudará a determinar la tolerancia de tiempo necesario para el acoplamiento y la regularización del trabajo. Los trabajos pueden clasificarse según su facilidad con que se pueden programar y estos son:

a) Trabajos de rutina

Son aquellos de corta periodicidad realizados principalmente durante el funcionamiento del sistema y generalmente son realizados por el personal de mantenimiento y utilizando su propio equipo y herramienta.

El mantenimiento en este nivel se limita normalmente a comprobaciones periódicas de las prestaciones del equipo, inspecciones visuales, limpieza de los equipos, pequeñas operaciones de servicio, ajustes externos, y el desmontaje y sustitución de algunos componentes.

b) Trabajos menores

Entre estos se pueden mencionar las reposiciones y otros trabajos simples que incluyen trabajos de corta y mediana periodicidad, estos se realizan en un sistema parado, es decir, sin que esté funcionando el equipo. En este tipo de trabajo, los componentes pueden repararse desmontando y sustituyendo los módulos, subconjuntos o piezas más importantes.

Normalmente el personal de mantenimiento disponible está más cualificado y mejor equipado que el del nivel anterior y su responsabilidad se centra en un mantenimiento más minucioso. A menudo se asignan unidades móviles o semi móviles para suministrar un mayor apoyo a los equipos operativos dispersos. Estas unidades pueden incluir ciertos equipos de examen y apoyo, así como repuestos. La misión es asegurar el mantenimiento en el lugar de operación (aparte del realizado por el personal del primer escalón) para facilitar de forma rápida la devolución del sistema a su estado de total operatividad.

c) Trabajos mayores

Al igual que los trabajos menores, estos deben realizarse con el sistema parado. Aquí se realizan revisiones generales y otros trabajos importantes que incluyen larga periodicidad, trabajos múltiples y trabajos que precisan de diversas especialidades. Es por ello que si es preciso se incluirán equipos complejos y voluminosos, grandes cantidades de repuestos, provisiones para control del entorno, entre otros, además puede considerarse el traslado del equipo o algunas partes a talleres, laboratorios, etc.

3.2.2.2 Trabajos no programados

Los trabajos no programados se presentan de una manera aleatoria y la distribución de los tiempos necesarios para realizar esos trabajos se aproxima mucho a la distribución normal. De no existir una vigilancia de la condición, no puede llevarse a cabo la programación hasta que se ha producido la falla del equipo.

Parte de la demanda de trabajos de mantenimiento no programados se presenta sin previo aviso y exige una atención urgente por lo que es difícil planificar los trabajos de emergencia con los de alta prioridad y los de ausencia de aviso previo.

El no contar con una adecuada programación y planificación del proceso de mantenimiento impide realizar un diagnóstico fiable donde se expongan las causas que provocan la falla, pues se ignora si falló por mal trato, por abandono, por desconocimiento del manejo, por desgaste natural y esto aumenta la cantidad de trabajos no programados

3.2.3 Planificación del trabajo de mantenimiento

La planificación del trabajo de mantenimiento puede realizarse a mediano y largo plazo, por lo que el horizonte de planificación puede extenderse desde tan sólo 48 horas hasta un año, y abarcará todos los trabajos, aparte de los aplazados de alta prioridad y del mantenimiento de emergencia.

El realizar una planificación para las tareas de mantenimiento implica tener una adecuada coordinación del trabajo multidisciplinario y el suministro de información, como lo son los planos, manuales o diagramas, así mismo la comprobación de la disponibilidad de repuestos herramientas e instalaciones necesarias, así mismo debe realizarse una cuantificación del tiempo necesario que llevará la realización de cada tarea.

La planificación detallada y la asignación de trabajos son las funciones de planificación más importantes de la supervisión. En cuanto a los trabajos no programados su aparición puede alterar prioridades establecidas y, por consiguiente, la programación a medio plazo.

3.2.3.1 Mantenimiento en la propia empresa y Mantenimiento en el exterior

Una de las tareas que deben tomarse en cuenta al realizar la programación de mantenimiento es la de determinar aquellas tareas que pueden y deben realizarse dentro de la propia empresa y aquellas que deben ser contratadas o que deban realizarse en talleres especializados.

Un aumento de los recursos de mantenimiento dentro de la propia empresa exige un aumento del coste de capital. Sin embargo, el aumento de las capacidades propias de mantenimiento dentro de la empresa, reduce la necesidad de contratar fuera.

En este caso, se precisa un equilibrio entre el coste asociado al uso de recursos propios y el coste asociado al uso de recursos exteriores. Se debe tomar en cuenta que si se utilizan recursos externos existe la posibilidad de que se produzca un mayor tiempo de inmovilización y, por consiguiente, un coste asociado de pérdida de ingresos.

Al momento de tomar la alternativa decisión para realizar un trabajo de mantenimiento dentro o fuera de la empresa debe considerarse lo siguiente:

- La naturaleza de la tarea de mantenimiento necesaria.
- Los recursos de mantenimiento disponibles.
- La carga de trabajo encomendada en la organización.
- El coste asociado a las diversas alternativas.

Debe recalcar que estas alternativas no son mutuamente excluyentes, ya que el trabajo de mantenimiento puede realizarse empleando tanto los recursos propios como exteriores.

3.3 Mantenimiento de equipo electrónico

Cualquier tarea de mantenimiento se realizan con el objetivo de que un sistema, equipo y maquinaria se mantenga en optimas condiciones durante el mayor tiempo posible y para lograrlo es necesario ayudar al sistema a mantener su funcionabilidad durante la operación, realizando las tareas apropiadas de mantenimiento.

Debido al auge de la expansión de la electrónica en los años 60, los componentes de los equipos electrónicos han cambiado notablemente, tanto que uno de los objetivos principales de la electrónica es la miniaturización de los componentes, cosa que se a logrado gracias a la incorporación de sustancias como el cilicio y germanio para la fabricación de transistores y circuitos integrados, lo que ha reducido los efectos en equipos electrónicos debido a desgastes, suciedad, polvo etc. y consecuentemente se han reducido las acciones de mantenimiento tanto preventivo como correctivo por estas causas, sin embargo el equipo electrónico no esta libre de efectos que puedan afectar su funcionamiento, por ello el mejor mantenimiento preventivo que se le puede dar al equipo electrónico, es tomar en cuenta como lo afectan los factores del entorno en el cual se encuentra el equipo, tales como: los efectos de la temperatura, efectos de la humedad del ambiente, efectos de las vibraciones en el lugar, y los efectos nocivos que puede causar la interferencia electromagnética.

3.3.1 Efectos de la temperatura

El calor excesivo perjudica gravemente a todos los equipos electrónicos es por ello que es necesario utilizar métodos que ayuden a controlar la temperatura ya que estos constituyen un tipo de protección en el que se aplican las medidas necesarias a fin de evitar con mayor grado de seguridad la posibilidad de que se registren temperaturas excesivamente elevadas y que éstas produzcan arcos y chispas en el interior y en las partes exteriores de los aparatos eléctricos, que no se producen en condiciones normales de operación.

Para controlar la temperatura ambiente en el entorno de operaciones se puede hacer uso de aparatos de aire acondicionado y a la vez éste no solo influirá en el rendimiento del equipo sino también en el rendimiento del usuario. Otra condición básica para el correcto funcionamiento de cualquier equipo es que éste se encuentre correctamente ventilado, sin elementos que obstruyan los ventiladores.

Todo fabricante de equipo electrónico proporciona en los manuales tanto de usuario como manuales técnicos de mantenimiento, información sobre el rango de temperatura en el cual el equipo debe operar por lo que es necesario siempre tener en cuenta este dato, sobre todo en el instante de tomar decisiones en cuanto a la instalación del equipo.

3.3.2 Efectos de la humedad

Cierto grado de humedad es necesario para un correcto funcionamiento de cualquier equipo, debido que en ambientes extremadamente secos el nivel de electricidad estática es elevado, lo que, puede transformar un pequeño contacto entre una persona y un circuito, o entre diferentes componentes, en un daño que en ocasiones puede ser irreparable. No obstante, niveles de humedad elevados

son perjudiciales para los equipos, por que pueden producir condensación en los circuitos integrados, lo que origina cortocircuitos que evidentemente tienen efectos negativos sobre cualquier elemento electrónico de un equipo.

Controlar el nivel de humedad en los entornos habituales es algo innecesario, ya que por norma nadie ubica los equipos y maquinas en los lugares más húmedos o que representen situaciones extremas. No obstante, ciertos equipos son especialmente sensibles a la humedad, por lo que es conveniente tomar todas las medidas que se consideren pertinentes y una buena media es la utilización de alarmas o detectores de agua en el suelo los cuales se activarán al detectar condiciones de muy poca o demasiada humedad los cuales podrán apagar automáticamente el sistema en caso de que se activen.

El principal efecto de la humedad catalogada como moderada sobre un equipo con componentes electrónicos es el óxido o la corrosión, que se puede formar en contactos o terminales de dispositivos, los cuales en casos extremos también pueden contribuir a que se produzcan cortocircuitos que dañen el equipo.

3.3.3 Efectos de las vibraciones

“En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio”³. La posición de equilibrio es la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

³ <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/queesvibracin.htm>

Debe entenderse por vibraciones todos los movimientos desde las más grandes como los terremotos, hasta las más pequeñas como un simple motor cercano a los equipos. Las vibraciones, incluso las más imperceptibles, pueden dañar seriamente cualquier elemento electrónico, especialmente si se trata de vibraciones continuas: los efectos en equipos electrónicos a causa de las vibraciones pueden ser rupturas en circuitos impresos, falsos contactos en terminales y conectores, aflojamiento de tuercas y tornillos de sujeción, provocando estos sin duda la mala funcionalidad del equipo.

3.3.4 Efectos por interferencia electromagnética

La interferencia electromagnética consiste en la emisión electromagnética conducida o irradiada que produce una respuesta no deseada en un componente o en una parte del equipo. La interferencia electromagnética, es decir la señal emitida por circuitos electrónicos que utilizan señales de alta frecuencia, se puede convertir en un problema para los ingenieros de diseño, a medida que se induce ruido en sus sistemas, degradando o limitando el desempeño de sus aplicaciones.

Dentro de los efectos que puede generar las interferencias electromagnéticas a los equipos electrónicos se pueden mencionar: Destrucción de las tarjetas electrónicas por, calentamiento excesivo de transformadores, motores y cables del equipo, caídas del sistema de información, poco alcance de transmisiones, alto consumo de energía eléctrica, operación con errores y fallos en el sistema electrónico, equipo lento y errático, corta vida útil del equipo, sistema y aparatos. Para equipos sensibles a la interferencia electromagnética los diseñadores de los mismos los dotan de blindajes especiales aterrizados a tierra o el chasis del equipo o la maquina el cual los protege de la interferencia electromagnética.

4. METODOLOGÍAS PARA ESTIMACIÓN DE MANTENIBILIDAD

Durante el tiempo de operación de los equipos, el ingeniero a cargo de la planificación y organización del proceso de mantenimiento, tiene bajo su responsabilidad reunir datos relativos al tiempo necesario para completar las diferentes clases de tareas de mantenimiento, pues estos datos son la herramienta básica y necesaria para la estimación de las medidas de mantenibilidad. Para el análisis de los datos recabados es necesario el uso de métodos estadísticos que nos permitan extraer la información necesaria para poder calcular las medidas de mantenibilidad. A continuación estudiaremos dos métodos que nos permitirán por medio del análisis de los datos recabados calcular las diferentes medidas de mantenibilidad de un sistema o equipo, estos son el método paramétrico y el método de ajuste de la distribución.

4.1 Método paramétrico

El método paramétrico consiste en un análisis que nos permite calcular algunas de las medidas de mantenibilidad, para ello es necesario contar con datos o muestreos recabados durante la operación de los equipos, específicamente datos relativos a los tiempos necesarios para completar las diferentes clases de tareas de mantenimiento, así como el registro de los tiempos en operación y los tiempos en parada de los equipos, este método se basa en la suposición de que los datos recabados relacionados con el tiempo necesario para completar satisfactoriamente las tareas de mantenimiento se distribuye normalmente, es decir que tienen una función de distribución de probabilidad normal, con el uso del método paramétrico se tiene la limitación de

no poder extraer de los datos recabados toda la información posible, a pesar de ello la gran ventaja de la sencillez de aplicación del método paramétrico, con respecto al método de ajuste de la distribución, ha hecho que este sea ampliamente aceptado para la estimación de medidas de mantenibilidad, tanto que a sido utilizado en aplicaciones militares, además de ser utilizado por industrias de procesos continuos como uno de los principales requisitos para contratar o comprar equipo.

Para aplicar el método paramétrico en la práctica, es necesario contar con una muestra de datos recabados por personal de mantenimiento, estos datos consisten en: Los tiempos necesarios para completar las tareas de mantenimiento TTR y el tiempo de operación del equipo a analizar, estos deben ser recabados durante un periodo de tiempo previamente establecido.

La tabla I muestra una forma de ordenar los datos disponibles y se supone que corresponde al registro de operación de un equipo X, el cual fue objeto de análisis durante un año en servicio (8760 Horas).

Tabla I. Registro de operación de equipo X

Estado del equipo	HORAS		TIEMPO	
	Inicio	Final	En Función	TTR en parada
SoFu	0	t_1	$T_{SoFu} = (t_1)$	
SoFa	t_1	t_2		$ttr = (t_2 - t_1)$
SoFu	t_2	t_3	$T_{SoFu} = (t_3 - t_2)$	
SoFa	t_3	t_4		$ttr = (t_4 - t_3)$
SoFu	t_4	t_5	$T_{SoFu} = (t_5 - t_6)$	
SoFa	t_5	t_6		$ttr = (t_6 - t_5)$
SoFu	"	"		
SoFa	"	"		
SoFu	"	"		
SoFa	"	"		
SoFu	"	"		
SoFa	"	"		
SoFu	t_{n-1}	8760		
TOTAL			$\sum T_{SoFu}$	$\sum T_{SoFa}$

en esta tabla podemos observar:

- Columna 1: Estado del sistema o equipo, SoFu estado de funcionamiento y SoFa estado de falla o parada del equipo.
- Columna 2: El tiempo de inicio y final de cada estado del equipo.

- Columna 3: Los intervalos de tiempo en el cual el equipo se encuentra ya sea en funcionamiento T_{SoFu} o en parada T_{SoFa} .
- Además al final de la tabla se encuentra $\sum T_{SoFu}$ el cual es el tiempo total de funcionamiento del equipo y $\sum T_{SoFa}$ el cual es el tiempo tota en parada.

Con los datos disponibles en la tabla No. 1 podemos proceder al calculo de algunas medidas de mantenibilidad del equipo en análisis, por ejemplo podemos calcular el tiempo medio de recuperación con la siguiente expresión:

$$MTTR = \sum_{i=1}^n \frac{ttr_i}{n}$$

Donde ttr_i es el tiempo necesario para completar cada una de las tareas de mantenimiento y n es el numero de tareas de mantenimiento realizadas durante el tiempo de análisis del equipo.

El valor de MTTR fue obtenido a través de los datos recabados durante un tiempo de muestreo previamente establecido por lo que representa el valor medio de esa muestra en particular, para calcular el intervalo en el que se encuentra el valor medio de la población global se debe calcular el limite superior del tiempo medio de recuperación el cual esta dado por:

$$MTTR^U = MTTR + Z \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Donde σ representa la desviación estándar de los datos cuya expresión la vimos en el capitulo II y Z se elige de la tabla de la distribución normal de

acuerdo con el nivel de confianza deseado. Por ejemplo si ya contamos con el calculo de MTTR podemos decir que para $Z = 1.65$ hay un 95% de posibilidades de que el MTTR de la población total sea menor que el valor de $MTTR^u$ con $Z = 1.65$.

La disponibilidad operacional A_o es la medida de que tan frecuente el sistema esta bien y listo para operar como lo vimos en el capitulo I, y es otro medida importante que podemos calcular a partir de los datos de la tabla No. 1 y la podemos calcular con la siguiente expresión:

$$A_o = \frac{T_{Total\ SoFu}}{T_{Total\ SoFu} + T_{Total\ SoFa}}$$

Donde $T_{Total\ SoFu}$ es el tiempo total en estado de funcionamiento y $T_{Total\ SoFa}$ es el tiempo total en estado de parada o falla.

Es importante recalcar que esta disponibilidad es general, e incluye todos los atrasos en parada por mantenimientos preventivos y correctivos, así como demoras logísticas o de falta de insumos repuestos y herramientas.

El tiempo medio entre acciones de mantenimiento MTBM, nos proporciona una medida de que tan frecuente el sistema o equipo entra en estado de parada por acciones de mantenimiento tanto preventivas como correctivas y lo podemos calcular con la siguiente expresión:

$$MTBM = \frac{T_{Total\ SoFu}}{n}$$

Donde n es el numero de acciones de mantenimientos dentro del periodo de tiempo analizado.

En resumen con el método paramétrico, después del análisis de los datos podemos contar con resultados útiles como: La disponibilidad A_0 , El tiempo medio para recuperar MTTR, el límite superior del tiempo media de recuperación $MTTR^u$, y el Tiempo Medio entre Mantenimientos MTBM.

4.2 Método de ajuste de la distribución

Al igual que el método paramétrico, el método de ajuste de la distribución se basa en el análisis del tiempo empleado en mantenimiento o tiempo de recuperación TTR para el cálculo de las medidas de mantenibilidad. En el método de ajuste de la distribución se deja de suponer que los datos recabados referentes a los tiempos de recuperación tienen un tipo de distribución de probabilidad normal, en cambio se utilizan estos mismos datos para determinar que tipo de distribución de probabilidad les corresponde, el análisis que debe realizarse con los datos disponibles para determinar la distribución de probabilidad correspondiente es la causa por la cual el método de ajuste de la distribución es el menos empleado; sin embargo este método nos proporciona la gran ventaja de poder calcular una función de mantenibilidad real que corresponda al equipo o tarea de mantenimiento analizada entre otras cosas

La función de mantenibilidad $M(t)$ encontrada a través de este método, es la probabilidad en función del tiempo de que la tarea de mantenimiento objeto del análisis sea completada en un tiempo t determinado, sin embargo no es la única información extra que nos proporciona el método de ajuste de la distribución, además el tiempo de recuperación porcentual TTR_p , y la realización de la recuperación $RS(t,t)$ también pueden ser calculadas, es importante notar

que para obtener estas medidas de mantenibilidad no es necesario contar con datos extras o realizar pruebas o ensayos adicionales, sino que son obtenidas de los mismos datos disponibles lo único que aplicando el método de ajuste de la distribución en vez del método paramétrico.

Para la aplicación del método de ajuste de la distribución, nos apoyamos en un método gráfico con el cual podemos determinar que tipo de distribución de probabilidad es la que mejor representa la muestra de datos con que disponemos

El primer paso en la aplicación del método gráfico consiste en estimar la función de distribución empírica de los datos, según el número de muestras. Para el cálculo de la función de distribución empírica se utiliza la siguiente expresión:

$$F_i = (i - 0.3)/(n + 0.4)$$

Donde si los datos recabados están ordenados de menor a mayor, i corresponde al número de orden del dato de la muestra y n es el número total de datos de muestra, por ejemplo si $n = 20$ la tabla II muestra los resultados del cálculo de la función de distribución empírica de los datos.

Tabla II. Cálculo de la Función empírica para $n = 20$

ORDEN (i)	F(i) con n =20
1	0.0343
2	0.0833
3	0.1324
4	0.1814
5	0.2304
6	0.2794
7	0.3284
8	0.3775
9	0.4265
10	0.4755
11	0.5245
12	0.5735
13	0.6225
14	0.6716
15	0.7206
16	0.7696
17	0.8186
18	0.8676
19	0.9167
20	0.9657

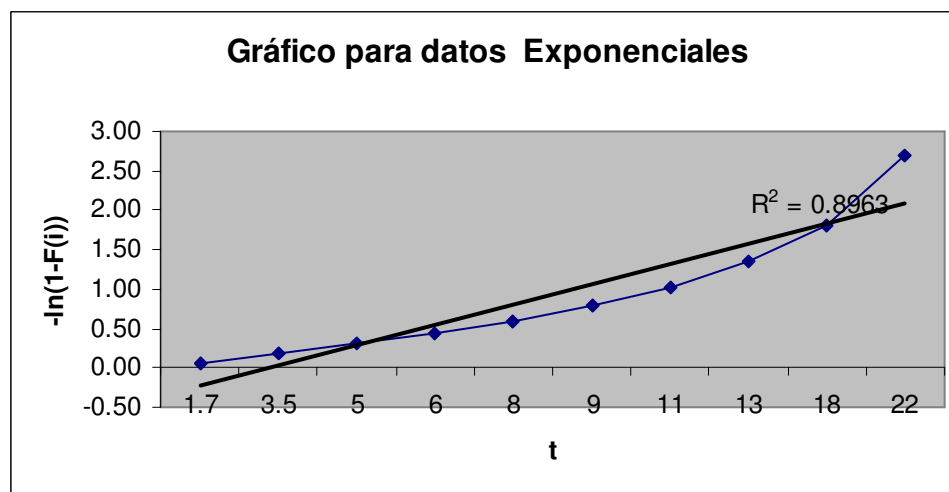
Luego del cálculo de la función de distribución empírica, procedemos a representar los resultados gráficamente, esto se puede hacer con la ayuda de programas estadísticos, como Estatgraphics, MiniTab, o PROBCHAR, también podemos hacerlo utilizando un procesador de hojas electrónicas como Excel.

En las figuras 16 y 17 podemos observar los planos cartesianos para la representación gráfica de distribuciones exponencial y weibull, en los cuales los ejes de las abscisas y las ordenadas se encuentran ajustados de manera que al plotear los puntos correspondientes estos formen una línea recta en el gráfico que mejor represente la función de distribución de probabilidad de nuestros datos, estas gráficas fueron realizadas utilizando Excel, al hacerlo de esta manera se debe hacer la regresión lineal de los puntos, utilizando la función de “agregar línea de tendencia” para determinar el valor del coeficiente de

correlación R^2 , este paso es importante pues en algunas ocasiones los datos pueden aparentar que forman una línea recta en ambos gráficos, cuando este sea el caso la grafica que tenga el mayor valor de R será el modelo que mejor representa la distribución de probabilidad de los datos de la muestra.

Como se muestra en la figura 16 la gráfica esta formada por los valores de $-\ln(1-F(i))$ en el eje Y, y el eje X corresponde a los datos de tiempo de realización de alguna tarea de mantenimiento analizada, de manera que si los datos de muestra corresponden a una distribución de probabilidad exponencial formaran una línea como la de la figura 10 que aunque en la parte final tiende a desviarse un poco, se puede ver que su tendencia general es la de una línea recta.

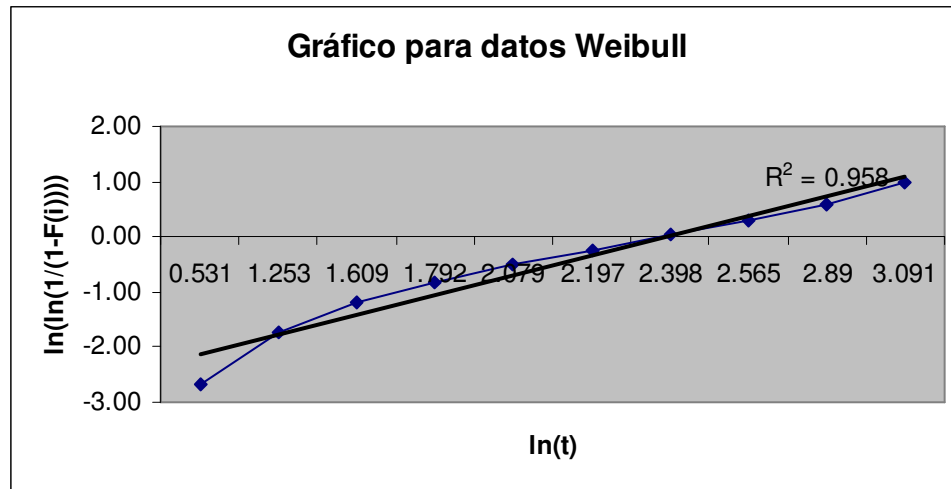
Figura 16. Representación gráfica de datos Exponenciales



En la figura 17 la gráfica esta formada por los valores de $\ln[\ln(1/(1-F(i)))]$ en el eje Y, y el eje X corresponde al logaritmo natural de los tiempos de realización de las tareas de mantenimiento analizadas $\ln(ttr)$, de manera que al

estar los ejes ajustados de esta forma los datos con una distribución de probabilidad de Weibull formaran una línea recta al ser ploteados.

Figura 17. Gráfico para datos con distribución de Weibull



En la tabla III se muestran los datos con los cuales disponemos hasta el momento, y es propuesta como una manera de poder ordenarlos y visualizarlos, también se muestran los puntos que debemos plotear para formar los gráficos exponencial y Weibull.

Tabla III. Datos del método de ajuste de la distribución.

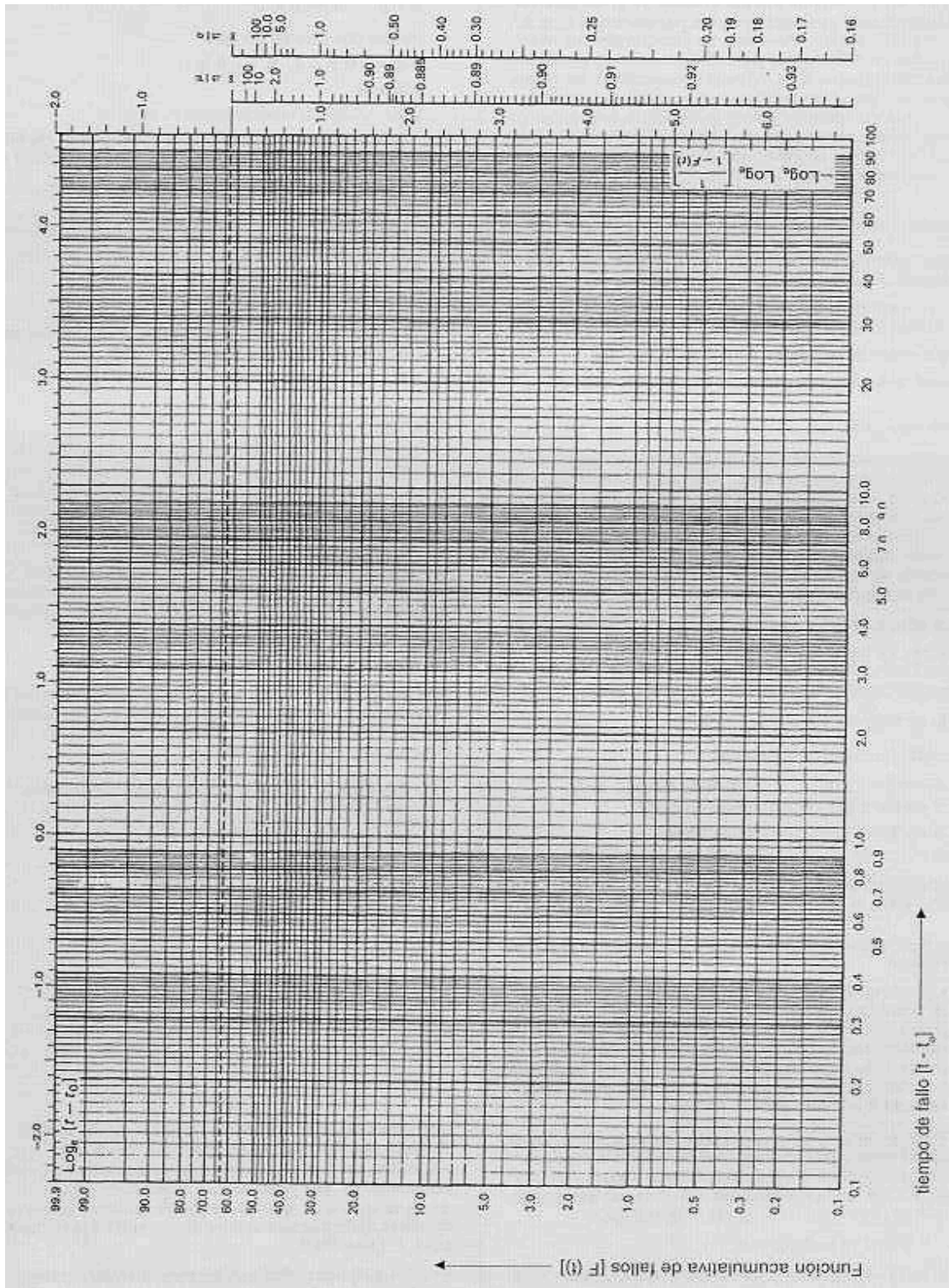
			GRAFICAR			
			Ordenadas (eje Y)		Abscisas (eje X)	
No. Orden (i)	Tiempos	Función Empírica	Exp.	Weibull	Exp.	Weibull
		$F(i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$	$-\ln[1-F(i)]$	$\ln [\ln(1/(1-F(i)))]$	t	$\ln(t)$
1	T ₁	F ₁	Y _{e1}	Y _{w1}	X _{e1}	X _{w1}
2	T ₂	F ₂	Y _{e1}	Y _{w1}	X _{e1}	X _{w1}
3	T ₃	F ₃	Y _{e1}	Y _{w1}	X _{e1}	X _{w1}
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
.
n	T _n	F _n	Y _{en}	Y _{wn}	X _{en}	X _{wn}

Debido a que otros tipos de distribuciones de probabilidad como la exponencial y normal son casos particulares de la distribución de probabilidad de Weibull, El método de ajuste de la distribución se utiliza cuando los datos disponibles corresponden a una distribución de probabilidad de Weibull y por tanto no se ajustan a un tipo de distribución de probabilidad mas sencillo.

Ya que hemos determinado que las muestras corresponden a una distribución de Weibull, el siguiente paso es calcular los parámetros de escala α y forma β de la distribución, para ello existen varios métodos como El método de los momentos, y el método de la máxima verosimilitud, los cuales son poco utilizados debido al complicado análisis matemático que conllevan, también existe la posibilidad de calcular los parámetros gráficamente utilizando un papel de probabilidad especial llamado papel de Weibull, el cual esta ajustado a escalas logarítmicas especiales para ello.

En figura 18 se puede observar una muestra del papel de weibull, el cual esta ajustado de la siguiente manera, en el eje de las ordenadas se tiene $\ln \ln[1/1-F(i)]$, y en el eje de las abscisas se tiene $\ln(t)$, también existe una escala tabulada de 0 a 7 para el calculo de β .

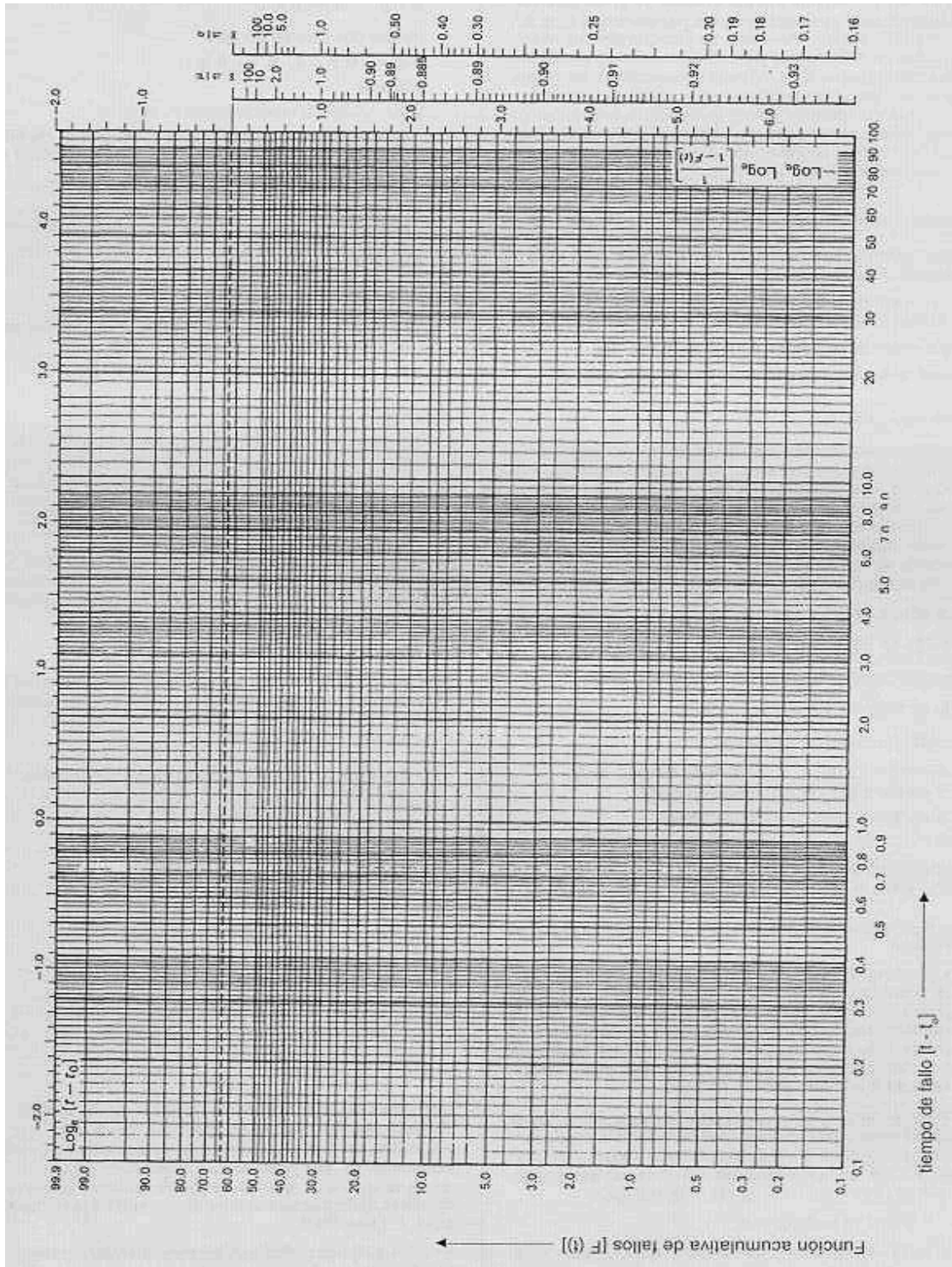
Figura 18. Muestra del papel de Weibull



La sencillez del uso del papel de Weibull para el cálculo de los parámetros de escala y forma de la distribución hacen que este método gráfico sea uno de los más utilizados, para calcular los parámetros se procede de la siguiente manera; primero se plotean todos los puntos (X_w, Y_w) de la tabla III sobre el papel de Weibull y se traza la línea recta que estos formen, α es el parámetro de escala y representa el tiempo para el cual se espera que se concluyan el 63.2% de las tareas analizadas, por ello su valor lo podemos leer directamente en el eje inferior del papel de Weibull en el punto de intersección de la recta ploteada y 63.2 del eje de las ordenadas. Luego para calcular β se traza una línea recta paralela a la recta obtenida al plotear los puntos y que pase por el punto 1 del eje de las abscisas y 63.2 de las ordenadas (1, 63.2), y el valor de β se muestra en la intersección de esta nueva recta y la escala tabulada con los valores de β .

La figura 19 muestra el trazo de todos los pasos detallados anteriormente para el cálculo de los parámetros de la distribución de Weibull, donde los datos han sido escogidos solo con el objetivo de mostrar el uso del papel de Weibull, y no representan alguna tarea específica de mantenimiento. En el capítulo seis de este trabajo se estudiará un caso práctico con datos reales.

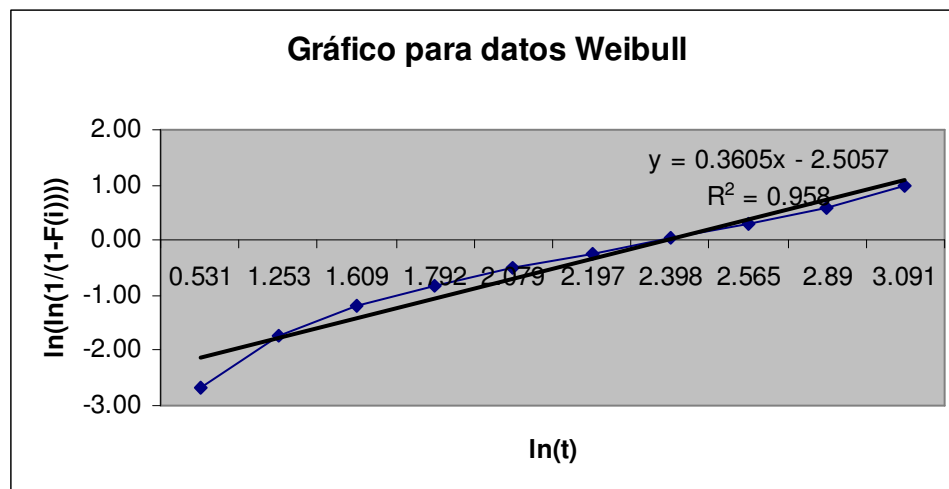
Figura 19. Ploteo de puntos y trazos para el cálculo de α y β



A pesar de que el método gráfico utilizando el papel de Weibull para calcular los parámetros de la distribución es sumamente sencillo requiere de un poco de tiempo pues consiste de varios pasos, además de que cualquier pequeño error en el procedimiento puede llevar a resultados totalmente equivocados en el cálculo de α y β , para evitar este trabajoso procedimiento podemos calcular los parámetros de la distribución directamente del gráfico para datos Weibull como el mostrado en la figura 17.

Por ejemplo, en la figura 20 se muestra el mismo gráfico para datos Weibull, el cual también está hecho en Excel, debemos notar que para esta gráfica se muestra también la ecuación de la recta, la cual se ha agregado con solo seleccionar en las propiedades de la gráfica la opción “mostrar ecuación del gráfico”.

Figura 20. Gráfica con ecuación para datos Weibull



Para calcular los parámetros de la distribución directamente de la gráfica anterior, notemos que la ecuación de la recta tiene la forma $Y = mx + b$ además debemos recordar que β es el parámetro de forma y representa la pendiente de la recta, por lo tanto β está dado por el valor de m .

El cálculo del parámetro de escala α , se logra despejándolo de las dos ecuaciones siguientes:

$$Y = Y_0 + \beta x$$

$$Y_0 = -\beta \ln(\alpha)$$

Por ejemplo para la figura 15 con $Y = 0.3605x - 2.5057$, tenemos que

$$0.3605x - 2.5057 = Y_0 + \beta x$$

$$0.3605x - 2.5057 = Y_0 + 0.3605x$$

$$Y_0 = -2.5057$$

Entonces sustituyendo el valor de $Y_0 = -2.5057$ tenemos

$$-2.5057 = -0.3605 \ln(\alpha)$$

$$\alpha = e^{\frac{2.5057}{0.3605}} = 1,043.8$$

Por lo que α estará dado por:

$$\alpha = e^{\frac{Y_0}{-\beta}}$$

Luego del cálculo de los parámetros α y β de la distribución, ya sea por medio del método gráfico utilizando el papel de Weibull, o por medio de la regresión lineal de los puntos, procedemos a calcular las diferentes medidas de mantenibilidad que nos proporciona el método de ajuste de la distribución, como la Función de mantenibilidad $M(t)$, El tiempo medio para reparar $MTTR$, la realización de la recuperación $RS(t_1, t_2)$, y el tiempo porcentual de recuperación $TTR\%$.

A continuación se listan las funciones de mantenibilidad para diferentes tipos de distribución

$$M(t)_{\text{exp}} = 1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}$$

$$M(t)_{\text{weibull}} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

El tiempo medio para reparar $MTTR$ de cada tipo de distribución esta dado por:

$$MTTR_{\text{exp}} = \alpha$$

$$MTTR_{\text{weibull}} = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Donde Γ es la función Gamma, la cual la podemos encontrar para valores de β desde 0 hasta 4 en el anexo 4 de este trabajo.

Como se vio en el capítulo II la realización de la recuperación se trabaja bajo el concepto de probabilidad condicional y nos indica la probabilidad de que la tarea de mantenimiento que no se haya finalizado con éxito en un tiempo t_1 se realice en el tiempo t_2 , la expresión para su calculo es la siguiente:

$$RS(t_1, t_2) = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)}$$

Y por último para calcular el tiempo porcentual de recuperación $TTR\%$ se despeja la variable t , de la ecuación para la función de mantenibilidad y se evalúa para el porcentaje deseado, por ejemplo los tiempos porcentuales de recuperación para distribuciones exponencial y Weibull están dados por:

$$TTR\%_{exp} = -\alpha \ln[1 - M(t)]$$

$$TTR\%_{weibull} = \alpha \left[-\ln(1 - M(t)) \right]^{1/\beta}$$

4.3 Método de aprovisionamiento de repuestos

Dentro de las responsabilidades de los encargados de la administración del mantenimiento esta garantizar la existencia de repuestos necesarios tanto para mantenimientos preventivos como mantenimientos correctivos.

Dependiendo de la complejidad de los equipos en ocasiones se debe contar con módulos o unidades completas de recambio, para poder sustituir las unidades que presenten fallas, durante el tiempo en que estas se logran reparar o durante el tiempo en que se logra disponer de una unidad nueva de reemplazo.

Si cierto componente tiene una tasa de falla λ (unidades / hora), y denotamos la tasa de reparación del mismo componente como;

$$\omega = \frac{1}{MTTR}$$

Podemos denotar el número medio de unidades reemplazables como

$$A = \frac{\lambda}{\omega}$$

Es importante notar que ω puede representar tanto la tasa de reparación del componente si utilizamos el MTTR de ese componente en particular, como la tasa de disponibilidad de componente si ω se calcula en base al tiempo que tomara tener disponible el repuesto si en todo caso este no estuviera disponible en el momento de producirse la falla.

En base al número medio de unidades reemplazables A , y haciendo uso de la distribución acumulada de poisson:

$$P(0, N) = \sum_0^N \frac{A^i e^{-A}}{i!}$$

Podemos calcular el número N , de partes que debemos mantener en inventario para que casi con certeza no falle el aprovisionamiento, para ello debemos establecer un requisito de probabilidad de que el repuesto se encuentre disponible. Por ejemplo, si designamos que la probabilidad de que haya un repuesto disponible sea de 80%, se evalúa la distribución de poisson para el mínimo valor de N que cumpla con:

$$\sum_0^N \frac{A^i e^{-A}}{i!} = 0.80$$

Donde los valores de i van desde 0 hasta N .

4.4 Comentarios finales

En este capítulo estudiamos los métodos disponibles para el análisis de los datos de mantenibilidad, en ambos métodos el punto de partida es la recolección de los datos a analizar, estos datos son los tiempos necesarios para completar la tarea de mantenimiento de nuestro interés, A pesar de que el método de Ajuste de la Distribución nos brinda mas información que el método Parametrico, debemos notar que no se requieren pruebas, ensayos o muestreos extras, para obtener dicha información adicional, es decir, que exactamente con las mismas muestras, el método de Ajuste de la Distribución, es capaz de darnos información adicional a la que nos puede proporcionar el método Parametrico, sin embargo, debido a que el método de Ajuste de la Distribución requiere análisis gráfico para poder estimar la distribución de probabilidad que mejor represente nuestros datos, el método Parametrico se ha convertido en el método más aplicado en la práctica.

La tabla I, referente al registro de operación del equipo X, y la tabla III referente a, el registro de datos para el método de Ajuste de la Distribución, son tablas propuestas en este trabajo, como una manera de ordenar y visualizar todos los datos disponibles, por lo que si el lector lo considera necesario puede utilizar su propia forma para tener los datos a su disposición.

5. ANÁLISIS DE CRITERIOS DE MANTENIMIENTO

La eficiencia y calidad del mantenimiento esta íntimamente ligada a la optimización de métodos y procesos, obteniéndose así una reducción de esfuerzos y costos, garantizando una adecuada disponibilidad de los equipos y sistemas. El equipo de trabajo encargado del mantenimiento debe estar atento a la utilización de los métodos estadísticos y al cálculo de los índices que posibiliten la comprensión de los resultados, propiciando así soluciones de menor costo.

La idea general del mantenimiento está cambiando. Los cambios se deben a un aumento de la mecanización de los procesos industriales, una mayor complejidad de la maquinaria, la aparición de nuevas técnicas de mantenimiento y un nuevo enfoque de la organización y de las personas responsables del mismo.

El mantenimiento también está reaccionando ante nuevas expectativas, las cuales exigen una mayor importancia a los aspectos de seguridad, un uso racional de la energía, la protección del medio ambiente, un conocimiento creciente de la relación mantenimiento y calidad del producto.

5.1 Criterios de mantenimiento basado en las fallas

El criterio de mantenimiento basado en la presentación de la falla, (Failure Based, FB) “constituye un método en que se realizan tareas de mantenimiento correctivo tras ocurrir una falla, a fin de recuperar la funcionabilidad del equipo o

sistema considerado. Por consiguiente, este método de mantenimiento se puede describir como de reparación de averías, posterior al fallo, o no programado.”⁴

Por lo general, este criterio de mantenimiento se aplica únicamente a aquellos equipos cuya pérdida de funcionalidad no repercute en la seguridad del usuario y/o en el entorno de trabajo. Asimismo la política de mantenimiento basada en la falla se aplica a equipos que son parte de sistemas completos de producción, y cuyo costo puede considerarse mínimo, permitiendo contar con un segundo equipo de apoyo que podamos utilizar para sustituir el equipo dañado cuando ocurra la falla.

5.1.1 Ventajas y Desventajas del mantenimiento basado en las fallas

Una de las principales ventajas de la utilización de este criterio es la total utilización de la vida operativa del equipo considerado. Ello significa que en la práctica el tiempo medio entre mantenimientos (*Mean Time Between Maintenance*, MTBM) de los equipos sometidos a este criterio de mantenimiento, es idéntico al tiempo medio entre fallas (*Mean Time Between Failure*, MTBF). Lo que significa que cuando se aplica este criterio la empresa recupera íntegramente su inversión monetaria en el equipo o sistema.

Otras ventajas que se pueden mencionar al utilizar el criterio de mantenimiento basado en las fallas son:

- Si el personal de mantenimiento está preparado la intervención en el fallo es rápida y la reposición en la mayoría de los casos será con el mínimo tiempo.

^{4 4} Jezdimir Knezevic, Mantenimiento, Closas Orcoyen S.L., 4ta. Edición, Madrid, 1996., Pág. 68

- Es rentable en equipos que no intervienen de manera instantanea en la producción, donde la implantacion de otro sistema resultaría poco económico.

A pesar de la ventaja monetaria que ofrece este criterio de mantenimiento, hay que hacer énfasis en los inconvenientes o desventajas que puede conllevar su utilización entre las cuales se pueden mencionar:

- Debido a que se producen paradas inesperadas en los equipos estos pueden acarrear daños a otros componentes del sistema o al sistema mismo. Los análisis de los costes de mantenimiento han demostrado que una reparación realizada tras una falla, será normalmente tres o cuatro veces más cara que si se hubieran realizado tareas de mantenimiento preventivo. Por ello deben seleccionarse cuidadosamente los equipos o componentes del sistema que serán sometidos a una política de mantenimiento basada en la falla.
- Como el tiempo de aparición de la falla es incierto y si no se esta preparado, pueden producirse tiempos de parada largos, debido a la indisponibilidad de recursos (repuestos, personal, herramientas entre otros).
- Se puede producir una baja calidad en las reparaciones debido a la rapidez en la intervención, y a la prioridad de reponer antes que reparar definitivamente, por lo que se puede producir un hábito a trabajar defectuosamente, este tipo de intervenciones a menudo generan otras al cabo del tiempo por mala reparación.
- Incertidumbre sobre cuando se producirá la falla, que puede ser en el momento más inconveniente e involucrar un alto costo.

5.2 Criterios de mantenimiento basado en la duración de vida del sistema

Según el criterio de mantenimiento basado en la duración de la vida útil del sistema (Life-Based, LB), se realizan tareas de mantenimiento preventivo a intervalos fijos, que son función de la distribución de vida de los equipos considerados. El principal objetivo es prevenir el fallo y las consecuencias que este conlleva. Este método de mantenimiento es a menudo llamado política de mantenimiento preventivo o mantenimiento planificado, porque las tareas de mantenimiento suelen realizarse en un tiempo operativo determinado, lo que significa que es posible planificar todas las tareas y proporcionar todo el apoyo que sea necesario.

Este criterio de mantenimiento se realiza en forma periódica ya sea por horas de uso, repeticiones de una tarea, etc. Mediante este tipo de mantenimiento se trata de evitar los efectos de causas conocidas de fallas, con los exámenes periódicos o recambios que se efectúan rutinariamente se prolonga la vida útil de los equipos.

En la mayoría de los equipos se puede encontrar información acerca del mantenimiento preventivo en los manuales de servicio proporcionados por el fabricante, así mismo la experiencia en el uso y mantenimiento del equipo se convierte en una herramienta útil para determinar que acciones es necesario realizar para mantener la funcionalidad el equipo y prolongar su vida útil.

5.2.1 Ventajas y desventajas del mantenimiento basado en la duración de vida del sistema

Dentro de las ventajas que conlleva la utilización de este criterio de mantenimiento se pueden mencionar.

- Una de las principales ventajas al utilizar este criterio de mantenimiento es que a través de la realización de mantenimientos preventivos constantes se puedan detectar fallas en su fase inicial y por ende puedan ser corregidas en el momento oportuno.
- Evita la producción de fallas, inesperadas que muchas veces pueden tener consecuencias catastróficas para el usuario o el entorno de trabajo.
- Disminuye el tiempo de parada de los equipos y máquinas ya que el mantenimiento es programado para el momento productivo oportuno.
- Mayor duración de la vida útil del equipo ya que se les brinda el mantenimiento en el momento oportuno.
- Posibilita una planificación de las tareas a realizar por el personal de mantenimiento, y permite prever los recursos necesarios.
- Si se hace correctamente, el mantenimiento preventivo conlleva un estudio óptimo de conservación de los equipos o sistemas, el cual puede estar disponible como una base de datos para su posterior consulta.
- Se reduce el mantenimiento correctivo representando una reducción de costos de producción y un aumento en la disponibilidad del equipo.

A pesar de las ventajas presentadas anteriormente, el criterio de mantenimiento basado en la vida útil del sistema tiene inconvenientes o desventajas dentro de las cuales se pueden mencionar:

- Puede ser poco rentable porque se pueden reemplazar prematuramente algunos elementos, independientemente de su estado.
- Se puede incrementar el Tiempo Medio entre Mantenimientos MTBM, reduciendo la disponibilidad.

5.3 Criterios de mantenimiento basado en la inspección

Durante los últimos años, muchas organizaciones industriales han reconocido los inconvenientes en el uso de las políticas de mantenimiento basadas en las fallas, y basadas en la vida del sistema. Por ello surge la necesidad de utilizar criterios de mantenimiento alternativos, que proporcionen seguridad y a la vez reduzcan los costos por mantenimiento.

El criterio de mantenimiento que actualmente es muy utilizado es el mantenimiento basado en la inspección, (Inspection-Based, IB). Este procedimiento de mantenimiento admite que la razón principal para realizar el mantenimiento es el cambio en la condición y/o las prestaciones del equipo, y que la ejecución de las tareas de mantenimiento deben estar basadas en el estado real del equipo o sistema. Mediante la inspección de ciertos parámetros en los equipos será posible identificar el momento más conveniente en el que se deben realizar las tareas de mantenimiento.

El criterio de mantenimiento basado en la inspección del equipo o sistema, se basa en actividades de vigilancia de la condición que se realizan para determinar el estado físico. Por tanto, el objetivo de la vigilancia de la

condición, sea cual sea su forma, es la observación de los parámetros que suministran información sobre los cambios en la condición y/o en las prestaciones del equipo o sistema. La filosofía de la vigilancia de la condición es por tanto la evaluación de la condición en ese momento, mediante el uso de técnicas, para determinar la necesidad de realizar una tarea de mantenimiento preventivo, o correctivo, Estas técnicas pueden variar desde los simples sentidos humanos hasta un instrumental complejo. Este criterio incluye tanto inspecciones objetivas (con instrumentos) y subjetivas (con los sentidos).

5.3.1 Ventajas y desventajas del mantenimiento basado en la inspección

Dentro de las ventajas del uso del criterio de mantenimiento basado en la inspección podemos mencionar.

- Debido a que existe una vigilancia permanente, las fallas de los componentes se detectan desde el momento en que se producen.
- Los trabajos de mantenimiento pueden planificarse en el tiempo y están justificados, permitiendo un uso más eficaz de los recursos.
- Se reducen así los costos provocados por los paros de equipos y del proceso.
- Mejora de la seguridad, ya que las técnicas de vigilancia permiten al personal de mantenimiento detener el sistema antes de que se produzca una falla.
- Aumento de la disponibilidad, al poder mantener los sistemas funcionando durante más tiempo.

Dentro de las desventajas o inconvenientes del uso del criterio de mantenimiento basado en la inspección se pueden mencionar:

- Alta inversión para la adquisición de sistemas, equipos e instrumentos de medición, que permitan la vigilancia de la condición del sistema.
- Requiere la organización de la información recabada.
- Requiere de personal técnico muy calificado y con la experiencia necesaria para observación y vigilancia del sistema.

5.4 Criterio de mantenimiento basado en la oportunidad

El criterio de mantenimiento basado en la oportunidad (Opportunity Based, OB) es aquel en el que se realizan tareas de mantenimiento adicionales, a aquellas partes o sistemas del equipo que no han causado fallas y este se realiza durante el tiempo de parada obligatoria, causada por la realización de un mantenimiento correctivo, por falta de insumos, materia prima, o cualquier otra causa. Este criterio de mantenimiento es apropiado para aquellos sistemas cuyo costo de inmovilización o indisponibilidad es demasiado elevado.

5.4.1 Ventajas y desventajas del mantenimiento basado en la oportunidad

Dentro de las principales ventajas del uso del criterio de mantenimiento basado en la oportunidad se pueden mencionar:

- Se aprovecha la parada de los equipos por motivos ajenos al mantenimiento, para realizar las reparaciones que se consideren pertinentes.

- Si el personal de mantenimiento esta preparado, se puede proceder como un mantenimiento programado.
- Al averiguarse la falla, se puede llevar a cabo la sustitución de todos los elementos del grupo especificado, debido al tiempo de que se dispone.

Dentro de las desventajas que presenta el criterio de mantenimiento basado en la oportunidad se pueden mencionar dos:

- El costo de mantenimiento puede aumentar debido a que en este tipo de mantenimiento se suele sustituir todos los elementos de un grupo especifico, estén o no dañados.
- Debe de realizarse cualquier otro criterio de mantenimiento para que éste criterio pueda ser llevado a la práctica, o el equipo debe estar en parada por cualquier otro motivo.

6. CASO PRÁCTICO

El objetivo principal de este capítulo es presentar con datos reales, un ejemplo del uso de las metodologías y criterios descritos en los capítulos anteriores para el cálculo y análisis de las medidas de mantenibilidad. Los datos fueron recabados en el departamento de servicio técnico de Representaciones Comerciales F. Mansilla y Cia, S:A. empresa dedicada a la distribución de Equipo Electrónico de impresión en el territorio de Guatemala, cuando sea necesario el lector deberá consultar la información tratada en los capítulos anteriores, esto es importante para poder comprender todos los procedimientos realizados aquí.

6.1 Registro de datos empíricos

Los datos recabados corresponden al tiempo de realización de una tarea de mantenimiento preventivo (TTR) realizada en un equipo multifuncional (fotocopiadora, impresora, fax, escaner) de impresión, de acuerdo a las clasificaciones que vimos en el capítulo III podemos definir esta tarea como un “Trabajo menor Programado”, ya que su realización requiere de un periodo que podemos catalogar como corto o mediano, además de incluir actividades simples como calibración del equipo, reposiciones de componentes o módulos, lubricación y limpieza.

Además por la naturaleza de las actividades a realizar durante la tarea de mantenimiento, el equipo debe estar fuera de funcionamiento “parado”, por lo que fue necesario una previa organización (recursos) y planificación (tiempo) de todo el proceso.

Los tiempos empleados para la correcta realización de la tarea de mantenimiento del análisis se listan en la tabla IV.

Tabla IV. TTR para tarea de mantenimiento tipo 100K

TECNICO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TIEMPO EMPLEADO (TTR) MINUTOS	57	62	55	76	54	63	66	70	73	71

Donde el término “mantenimiento tipo 100k” corresponde al tipo de mantenimiento, y en el cual todos los procedimientos a realizar se encuentran especificados en el manual de servicio técnico del equipo, los cuales fueron realizados por los técnicos, teniendo todos acceso a las herramientas e instalaciones necesarias.

6.2 Cálculo y análisis de las medidas de mantenibilidad

Como primer paso calculamos la función de distribución empírica con $n = 10$, según se muestra en la tabla V.

Tabla V. Cálculo de la función empírica para $n = 10$

ORDEN (i)	F(i) con $n = 10$
1	0.067
2	0.163
3	0.260
4	0.356
5	0.452
6	0.548
7	0.644
8	0.740
9	0.837
10	0.933

Luego procedemos a calcular los puntos a graficar y organizarlos según se indicó en el capítulo IV, para ello hacemos uso de la tabla propuesta en ese capítulo.

Tabla VI. Datos completos del caso práctico

No Orden (i)	Tiempos	Funcion Empirica $F(i) = (i-0.3)/(n+0.4)$	GRAFICAR			
			Ordenadas (eje Y)		Abscisas (eje X)	
			Exp. $-\ln[1-F(i)]$	Weibull $\ln[\ln(1/(1-F(i)))]$	Exp. t	Weibull $\ln(t)$
1	54	0.0673	0.0697	-2.6638	54	3.9890
2	55	0.1635	0.1785	-1.7233	55	4.0073
3	57	0.2596	0.3006	-1.2020	57	4.0431
4	62	0.3558	0.4397	-0.8217	62	4.1271
5	63	0.4519	0.6013	-0.5086	63	4.1431
6	66	0.5481	0.7942	-0.2304	66	4.1897
7	70	0.6442	1.0335	0.0329	70	4.2485
8	71	0.7404	1.3486	0.2990	71	4.2627
9	73	0.8365	1.8112	0.5940	73	4.2905
10	76	0.9327	2.6985	0.9927	76	4.3307

Procedemos a graficar para determinar que tipo de distribución representa mejor nuestros datos, en las figuras 21 y 22 se muestran las gráficas Exponencial y Weibull para los datos.

Figura 21. Gráfica Exponencial para datos del caso práctico

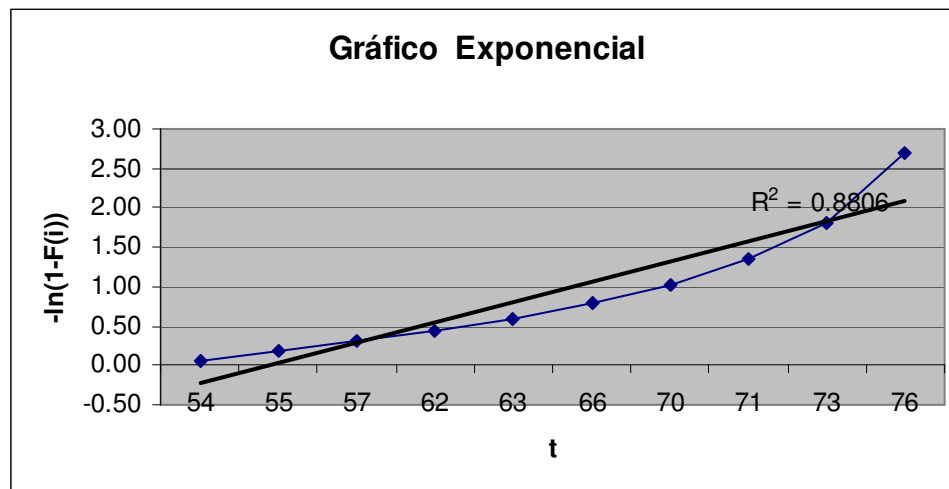
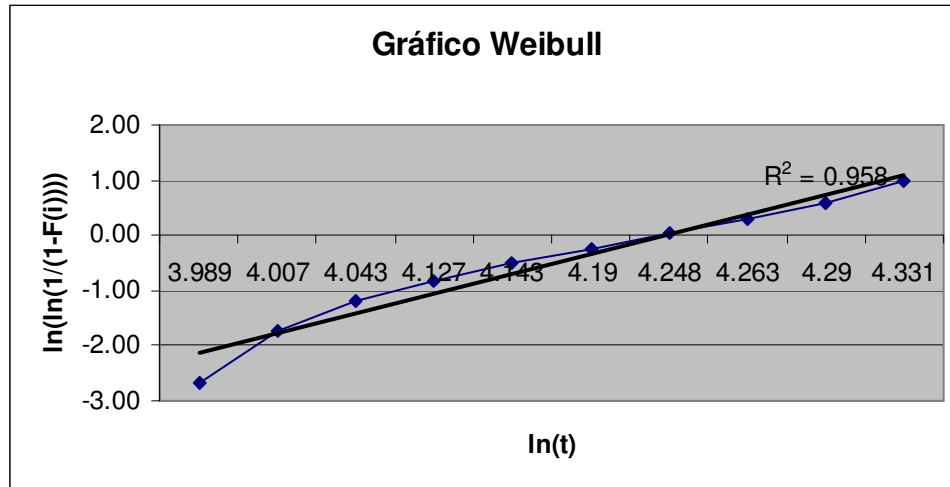


Figura 22. Gráfica Weibull para datos del caso práctico



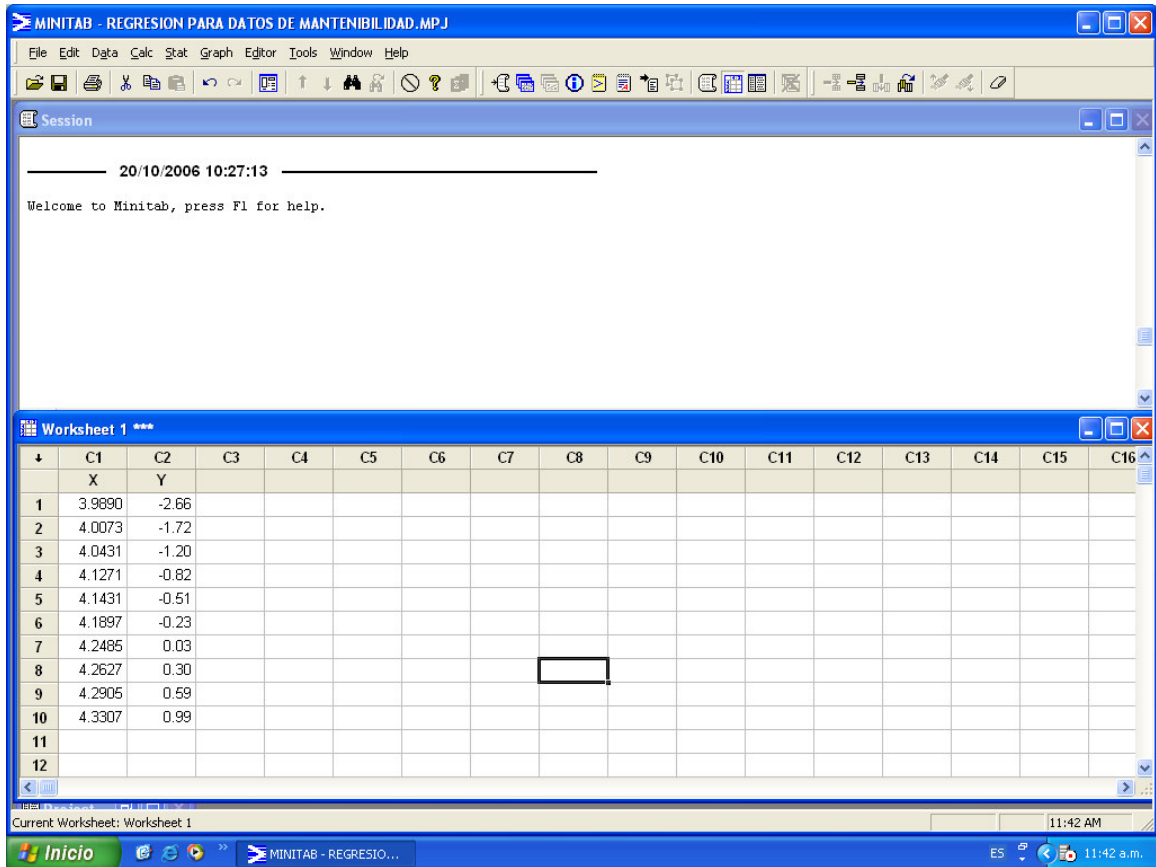
Las gráficas de las figuras 21 y 22 fueron realizadas en Excel, debido a que el valor de R^2 es mayor en la grafica de la figura 22, concluimos que nuestros datos presentan un tipo de distribución de Weibull.

Ya que sabemos a que tipo de distribución de probabilidad corresponden nuestros datos, procedemos al calculo de los parámetros de las distribución. En el capitulo IV se utilizo el papel de Weibull para el calculo de α y β , sin embargo en este caso utilizaremos el programa estadístico MiniTab para el calculo de la regresión lineal para encontrar la ecuación de la recta de la figura 22, y a través de esta calcular los parámetros de la distribución.

La razón del uso del programa estadístico MiniTab, es para no redundar en lo expuesto en el capítulo IV, y para mostrar lo sencillo que puede resultar el análisis de los datos y cálculo de los parámetros, utilizando la ayuda de software que al final es lo mas utilizado hoy en día.

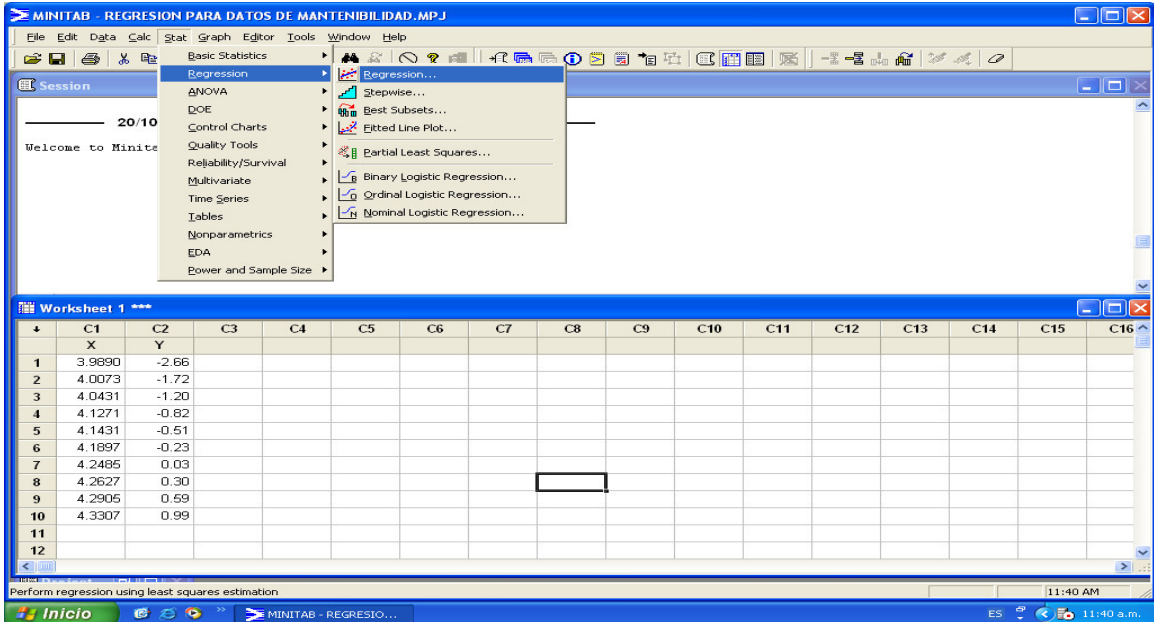
En el programa MiniTab introducimos los datos correspondientes a los puntos (X_w, Y_w) de la tabla VI como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Introducción de datos en MiniTab



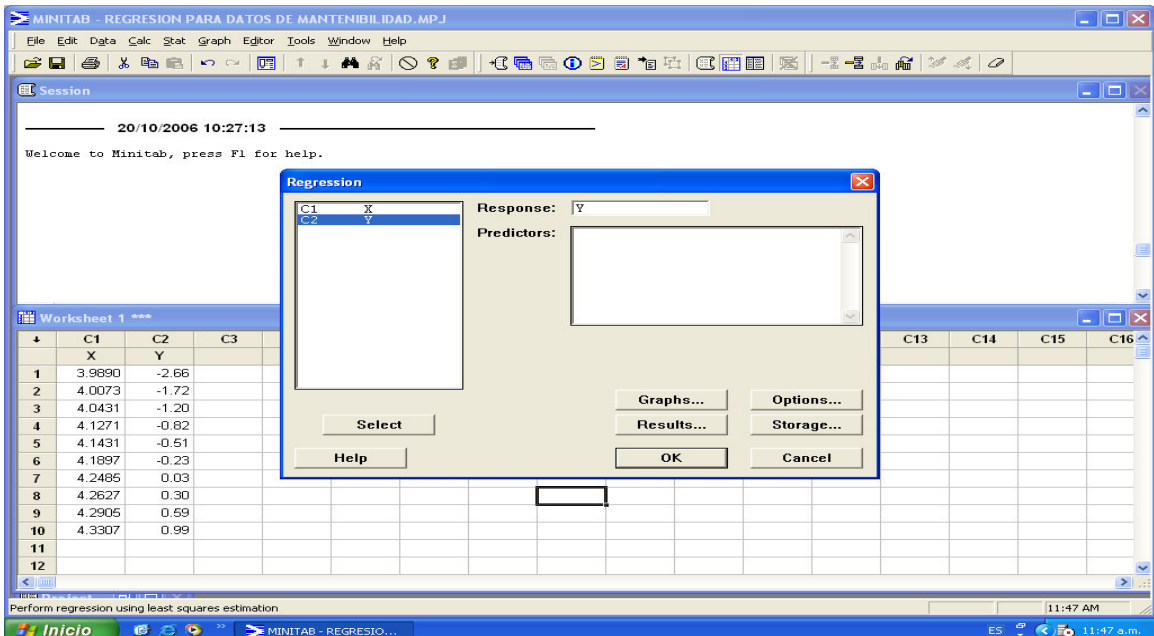
Luego se selecciona en el menú "Stat" la opción "Regresión" como se muestra en la figura 24.

Figura 24. Selección de la opción para la regression



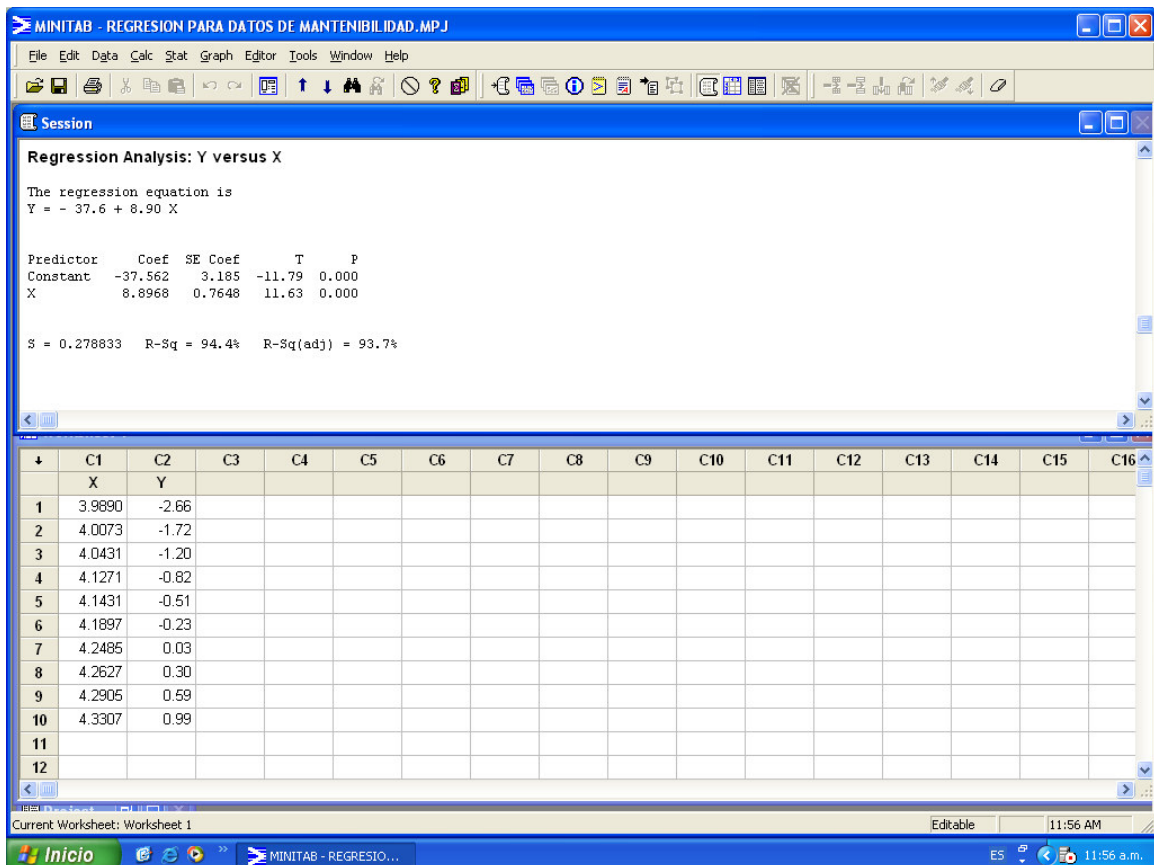
Asignamos las columnas de las variables dependientes e independientes como se muestra a continuación

Figura 25. Asignación de ejes X y Y en MiniTab



Al pulsar “OK” automáticamente el programa nos muestra la ecuación de la recta, así como el valor R^2 , como se muestra en la figura 26

Figura 26. Resultado de la regresión con MiniTab



Como se puede observar el programa nos muestra que la ecuación de la recta esta dada por:

$$Y = 8.90x - 37.6$$

Y según lo estudiado en el capítulo IV

$$\beta = 8.90$$

$$\alpha = e^{\frac{Y_0}{-\beta}} = e^{\frac{-37.6}{-8.90}} = 68.35$$

Sabiendo que los tiempos de realización de la tarea de mantenimiento analizada tienen un tipo de distribución de Weibull, y con los datos con que ya disponemos podemos estimar la Función de Mantenibilidad como sigue:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{68.35}\right)^{8.90}}$$

El tiempo medio para reparar esta dado por:

$$MTTR = 68.35\Gamma\left(1 + \frac{1}{8.90}\right)$$

El tiempo porcentual de recuperación esta dado por:

$$TTR_{\%} = 68.35\left[-\ln(1 - M(t))\right]^{1/8.90}$$

Y por último la Realización de la recuperación para t_1 y t_2 estará dada por:

$$RS(t_1, t_2) = \frac{\left[1 - e^{-\left(\frac{t_2}{68.35}\right)^{8.90}}\right] - \left[1 - e^{-\left(\frac{t_1}{68.35}\right)^{8.90}}\right]}{1 - \left[1 - e^{-\left(\frac{t_1}{68.35}\right)^{8.90}}\right]}$$

6.3 Resultados

El MTTR para la tarea de mantenimiento analizada es:

$$MTTR = 68.35\Gamma\left(1 + \frac{1}{8.90}\right)$$

$$MTTR = 68.35\Gamma(1.112)$$

$$MTTR = 68.35 * 0.94648$$

$$MTTR = 64.69$$

El cual esta expresado en minutos, y en donde para el calculo de la función Gamma $\Gamma(1.112)$ se ha utilizando Excel.

La probabilidad de que el sistema este listo en 70 minutos se calcula evaluando la función de mantenibilidad para $t=70$ por ejemplo:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{68.35}\right)^{8.90}}$$

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{70}{68.35}\right)^{8.90}}$$

$$M(t) = 0.71$$

Es decir que la probabilidad de que el equipo este listo para operar en 70 minutos, tras la realización de una tarea de mantenimiento tipo 100K es de 71%.

El tiempo para el cual el 90% del personal haya concluido la tarea de mantenimiento analizada se puede obtener evaluando $TTR_{\%}$ con $M(t) = 0.9$

$$TTR_{\%} = 68.35[-\ln(1 - M(t))]^{1/8.90}$$

$$TTR_{\%} = 68.35[-\ln(1 - 0.9)]^{1/8.90}$$

$$TTR_{\%} = 75.06$$

La realización de la recuperación indica la probabilidad de que la tarea que no se haya completado durante un tiempo digamos t_1 , sea terminada en un tiempo t_2 . Por ejemplo calculamos la probabilidad de que el mantenimiento preventivo tipo 100K que no se haya completado en 60 minutos sea terminado durante los próximos 20 minutos así:

$$RS(t_1, t_2) = \frac{\left[1 - e^{-\left(\frac{80}{68.35}\right)^{8.90}} \right] - \left[1 - e^{-\left(\frac{60}{68.35}\right)^{8.90}} \right]}{1 - \left[1 - e^{-\left(\frac{60}{68.35}\right)^{8.90}} \right]}$$

$$RS(t_1, t_2) = 0.976$$

Es decir que la probabilidad de que el mantenimiento preventivo que no se haya concluido en 60 minutos, sea concluido en 80 minutos es de 97.6%.

6.4 Comentarios finales

A través del método de ajuste de la distribución, hemos extraído de los datos empíricos toda la información necesaria para el cálculo de las medidas de mantenibilidad, como vimos los datos recabados corresponden a un tipo de distribución de probabilidad Weibull, en base a esto se utilizó el método de la regresión lineal para calcular los parámetros de la distribución, es importante hacer notar el significado físico de los parámetros de escala y forma (α, β) de la distribución, pues α representa el tiempo para el cual se abra finalizado con éxito el 63.2% de las n tareas de mantenimiento analizadas, puede comprobarse lo anterior evaluando $TTR_{63.2\%}$ lo cual nos deberá dar un valor igual o muy cercano a α .

β es el parámetro de forma y describe el grado de variación de la tasa de realización de la tarea de mantenimiento, y en este caso donde $\beta > 1$ indica que la tasa de realización se incrementa con el tiempo, lo cual es obvio pues es lógico pensar que conforme el tiempo transcurre cada uno de los técnicos ira terminando la tarea de mantenimiento asignada.

Las medidas de mantenibilidad calculadas permitirán al ingeniero a cargo del mantenimiento de los equipos, hacer predicciones en cuanto al tiempo necesario para cada tarea de mantenimiento específica y con esto poder realizar una adecuada programación de los recursos necesarios, así como la planificación de cuando proceder a realizar el mantenimiento preventivo.

CONCLUSIONES

1. La función logística de la organización y planificación del proceso de mantenimiento de equipo electrónico de impresión debe estar basada en metodologías y criterios que permitan garantizar el suministro de los recursos necesarios para la correcta realización de las tareas de mantenimiento.
2. La aplicación de metodologías que permitan estimar las medidas de mantenibilidad es una actividad imprescindible en todo proceso de mantenimiento de equipo electrónico, considerándose lo valiosa que pueda ser la información que se obtenga en cuanto a la toma de decisiones.
3. El tiempo de parada o fuera de servicio de un equipo, puede incrementarse drásticamente debido a errores logísticos en la organización de los recursos necesarios como: falta de repuestos, herramientas o indisponibilidad de instalaciones adecuadas para la ejecución de la tarea de mantenimientos correspondiente.
4. La realización de cualquier tipo de tarea de mantenimiento conlleva cierto riesgo, tanto por la probabilidad de una realización incorrecta como por las consecuencias que esto pueda tener, por lo que el personal de mantenimiento debe contar con los conocimientos y recursos necesarios que le permitan realizar de una manera adecuada su trabajo, y con estos lograr reducir el riesgo asociado a la tarea de mantenimiento.

5. La correcta aplicación de los criterios de mantenibilidad reduce el tiempo de fuera de servicio de los equipos, y por consiguiente se logra un aumento de la disponibilidad.

6. Independientemente del diseño, materiales de fabricación o metodologías de mantenimiento, los equipos presentaran fallas debido a procesos como: desgaste, fatiga, calentamiento etc., por lo que se debe estar preparado en todo sentido, para accionar en estos casos.

RECOMENDACIONES

7. Incluir en el pensum de la carrera de Ingeniería Electrónica un curso dedicado al estudio de la teoría de mantenibilidad, que permita a los estudiantes conocer los métodos para la cuantificación, evaluación y mejora de las características relativas a la recuperación de la funcionabilidad en los sistemas.
8. El uso del método de ajuste de la distribución para el análisis de mantenibilidad, debido a la eficacia de éste, con respecto al método paramétrico.
9. El uso de software estadístico como herramienta para el cálculo de las medidas de mantenibilidad.
10. La evaluación de las ventajas y desventajas de cada criterio de mantenimiento para la selección del criterio que mejor cumpla con los objetivos de la organización y planificación de cada proceso de mantenimiento en particular.
11. Toda organización debe contar con un sistema de capacitación y evaluación del personal técnico a cargo del mantenimiento de los equipos, que permita reducir el riesgo asociado a la incapacidad de realizar satisfactoriamente el trabajo asignado.

BIBLIOGRAFÍA

12. Prando, Raúl R. **Manual gestión de mantenimiento a la medida.** Guatemala: p.e. 1996. 104pp.
13. Nachlas, Joel A. **Fiabilidad.** España: p.e. 1995. 218 pp.
14. Knezevic, Jezdimir. **Mantenibilidad.** España: p.e. 1996. 210 pp.
15. Knezevic, Jezdimir. **Mantenimiento.** España: p.e. 1996. 211 pp.
16. López Ambrosio, Nery Rolando. Aplicación de técnicas de mediciones de fiabilidad para el mantenimiento de sistemas de telecomunicaciones. Tesis Usac. Esc. Mec. Ind. 1998. 128pp.
17. Blanco Barragán, Luís. **Mantenimiento de equipos electrónicos.** España p.e. 1999 251pp.
18. Sols, Alberto. **Mantenibilidad un enfoque sistémico.**
19. Walpole, Ronald E. **Probabilidad y estadística para ingenieros.** México s.e. 1999. Prentice-Hall 739pp.
20. Blanchard, Benjamín S. **Ingeniería Logística.** España: p.e. 1996. 240 pp.

21. Blanchard, Benjamín S. **Logistic Engineering and Managenent.** 3ª.
Edicion, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (EE.UU.), 1886

22. www.biomates.com junio de 2006

ANEXO 1

Un sistema paralelo falla cuando todos sus componentes fallan

$$X_1 = X_2 = X_3 = \dots \dots \dots X_n = 0 \quad \text{entonces} \quad \Phi(X) = 0$$

Demostración

$$\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i)$$

$$\Phi(X) = 1 - [(1 - X_1)(1 - X_2) \dots \dots \dots (1 - X_n)]$$

$$\Phi(X) = 1 - [(1 - 0)(1 - 0) \dots \dots \dots (1 - 0)]$$

$$\Phi(X) = 1 - [(1)(1) \dots \dots \dots (1)]$$

$$\Phi(X) = 0$$

Un sistema paralelo funciona cuando al menos uno de sus componentes funciona.

$$X_1 = X_2 = 0 \quad X_i = 1 \quad \text{entonces} \quad \Phi(X) = 0$$

Demostración

$$\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i)$$

$$\Phi(X) = 1 - [(1 - X_1)(1 - X_2) \dots \dots \dots (1 - X_i) \dots \dots (1 - X_n)]$$

$$\Phi(X) = 1 - [(1 - 0)(1 - 0) \dots \dots \dots (1 - 1) \dots \dots (1 - 0)]$$

$$\Phi(X) = 1 - [(1)(1) \dots \dots (0) \dots \dots (1)]$$

$$\Phi(X) = 1$$

ANEXO 2

Área bajo la curva normal para valores de Z desde -3.4 hasta 3.4

Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002
-3.3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
-3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
-3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
-3	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
-2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
-2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
-2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
-2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
-2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
-2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
-2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
-2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
-2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
-2	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
-1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
-1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
-1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
-1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
-1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
-1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
-1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
-1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
-1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
-1	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
-0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
-0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
-0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
-0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
-0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
-0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
-0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
-0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
-0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
-0.0	0.5	0.496	0.492	0.488	0.484	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.0	0.5	0.504	0.508	0.512	0.516	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998

ANEXO 3

Función Gamma, para valores de β entre 0.1 y 9

β	$\Gamma(1+1/\beta)$	β	$\Gamma(1+1/\beta)$
0.1	3628799.9992	4.6	0.9137
0.2	120.0000	4.7	0.9149
0.3	9.2605	4.8	0.9160
0.4	3.3234	4.9	0.9171
0.5	2.0000	5	0.9182
0.6	1.5046	5.1	0.9192
0.7	1.2658	5.2	0.9202
0.8	1.1330	5.3	0.9213
0.9	1.0522	5.4	0.9222
1	1.0000	5.5	0.9232
1.1	0.9649	5.6	0.9241
1.2	0.9407	5.7	0.9251
1.3	0.9236	5.8	0.9260
1.4	0.9114	5.9	0.9269
1.5	0.9027	6	0.9277
1.6	0.8966	6.1	0.9286
1.7	0.8922	6.2	0.9294
1.8	0.8893	6.3	0.9302
1.9	0.8874	6.4	0.9310
2	0.8862	6.5	0.9318
2.1	0.8857	6.6	0.9325
2.2	0.8856	6.7	0.9333
2.3	0.8859	6.8	0.9340
2.4	0.8865	6.9	0.9347
2.5	0.8873	7	0.9354
2.6	0.8882	7.1	0.9361
2.7	0.8893	7.2	0.9368
2.8	0.8905	7.3	0.9375
2.9	0.8917	7.4	0.9381
3	0.8930	7.5	0.9387
3.1	0.8943	7.6	0.9394
3.2	0.8957	7.7	0.9400
3.3	0.8970	7.8	0.9406
3.4	0.8984	7.9	0.9412
3.5	0.8997	8	0.9417
3.6	0.9011	8.1	0.9423
3.7	0.9025	8.2	0.9429
3.8	0.9038	8.3	0.9434
3.9	0.9051	8.4	0.9439
4	0.9064	8.5	0.9445
4.1	0.9077	8.6	0.9450
4.2	0.9089	8.7	0.9455
4.3	0.9102	8.8	0.9460
4.4	0.9114	8.9	0.9465
4.5	0.9126	9	0.9470