

TRABAJO FIN DE CURSO (2007-2008) EXPERTO UNIVERSITARIO EN MANTENIMIENTO
E INSTALACIONES INDUSTRIALES.
(MASTER EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL Y TECNICAS DE DIAGNOSIS).

FIABILIDAD

MANTENIBILIDAD

Y

MANTENIMIENTO

(CAMINO DE LA DISPONIBILIDAD)

“Una máquina sin funcionamiento posible, deja de ser máquina y se convierte en cosa.”

E. Morín. (El método)

ALUMNO: CARLOS PRIETO GARCIA

Agradecimientos.

Especialmente a Isidoro Garcia, sin cuyos apuntes y consejos, este trabajo hubiera sido mucho más laborioso.

A Julián, siempre dispuesto a compartir sus conocimientos y experiencia.

En el recuerdo de Manolo,

Un buen técnico de mantenimiento, que la carretera nos arrebató, cuando cumplía con su trabajo.

INDICE

1 FIABILIDAD

- 1. Introducción.----- Pág. 3**
- 2. Sistemas coherentes, estructuras de sistemas.----- Pág. 3**
 - 2.1 Introducción.
 - 2.2 Estructuras básicas.
 - 2.3 Equivalencia estructural.
 - 2.4 Módulos de sistemas.
- 3. Fiabilidad básica de sistemas coherentes.----- Pág. 16**
 - 3.1 Introducción.
 - 3.2 Importancia de la fiabilidad.
 - 3.3 Asignación de la fiabilidad.
 - 3.4 Forma de la función de fiabilidad.
- 4. Fiabilidad en el tiempo.----- Pág. 17**
 - 4.1 Introducción.
 - 4.2 Medidas de fiabilidad.
 - 4.3 Distribución de vida.
- 5. Los procesos de fallo.----- Pág. 20**
 - 5.1 Introducción.
 - 5.2 Modelos de fallos mecánicos.
 - 5.3 Modelos de fallos eléctricos.
 - 5.4 Riesgos proporcionales.
 - 5.5 Aceleración de la edad
 - 5.6 Cribado.
 - 5.7 Crecimiento de la fiabilidad.
- 6. Predicción de fiabilidad.----- Pág. 25**
 - 6.1 Introducción.
 - 6.2 Formulación general.
 - 6.3 Métodos de sollicitaciones de partes.
 - 6.4 Método de recuento de partes.
- 7. Mantenimiento y fiabilidad.----- Pág. 33**
 - 7.1 Introducción.
 - 7.2 Procesos de renovación y sustitución de dispositivos.
 - 7.3 Mantenimiento preventivo.
 - 7.4 Disponibilidad.
- 8. Fiabilidad humana y el software.----- Pág. 36**
 - 8.1 Introducción.
 - 8.2 Fiabilidad humana.
 - 8.3 Fiabilidad del software.
- 9. Gestión de la fiabilidad.----- Pág. 40**
 - 9.1 Introducción.
 - 9.2 Programas integrados de fiabilidad.
 - 9.3 Fiabilidad y costes asociados.
 - 9.4 Gestión de la fiabilidad por cliente.
 - 9.5 Requisitos de fiabilidad.
 - 9.6 Contratos con incentivos.

2 MANTENIBILIDAD

1. Introducción.----- Pág. 44

- 1.1 Generalidades.
- 1.2 Disponibilidad de los sistemas.

2. Concepto de mantenibilidad.----- Pág. 44

- 2.1 Definición de mantenibilidad.
- 2.2 Análisis teórico de la mantenibilidad.
 - 2.2.1 La mantenibilidad basada en el tiempo
 - 2.2.2 Mantenibilidad basada en la carga de trabajo.
 - 2.2.3 La mantenibilidad basada en la frecuencia.
 - 2.2.4 La mantenibilidad basada en los costes.
 - 2.2.5 Factores adicionales a la mantenibilidad.
- 2.3 Datos empíricos para la medida de la mantenibilidad.
 - 2.3.1 Posibles métodos de análisis de los datos existentes.
 - 2.3.2 Método paramétrico.
 - 2.3.3 Método de ajuste.

3. Ingeniería de mantenibilidad.----- Pág. 59

- 3.1 Generalidades.
- 3.2 Actividades de ingeniería de mantenibilidad.
- 3.3 Actuación sobre el diseño.
- 3.4 La mantenibilidad y la soportabilidad.

4. Asignación de la mantenibilidad.----- Pág. 68

- 4.1 Generalidades.
- 4.2 La asignación basada en la tasa de fallos
- 4.3 Asignación basada en la frecuencia de tareas.
- 4.4 Asignación basada en los costes de las tareas.
- 4.5 Asignación basada en la programación lineal (PL).

5. Predicción de la mantenibilidad.----- Pág. 74

- 5.1 Generalidades.
- 5.2 Métodos de predicción.
 - 5.2.1 Por actividades elementales.
 - 5.2.2 Por tiempos de ejecución de tareas de mantenimiento.
 - 5.2.3 Por selección aleatoria de elementos reemplazables.

6. Evaluación de la mantenibilidad.----- Pág. 86

- 6.1 Generalidades.
- 6.2 Método secuencial.
- 6.3 Método de muestra fija.

7. Evaluación antropométrica de la mantenibilidad.----- Pág. 91

- 7.1 Generalidades.
- 7.2 Identificación de la población de usuarios.
- 7.3 Identificación de los datos antropométricos de los usuarios.
- 7.4 Evaluación de los planes de ingeniería.
- 7.5 Maniqués y superponibles antropométricos.
- 7.6 Herramientas de diseño asistido por ordenador.
- 7.7 Evaluación en maquetas del sistema.
- 7.8 Validación de la evaluación antropométrica.
- 7.9 Pruebas operativas de prototipos.
- 7.10 Pruebas de demostración y de operación.
- 7.11 Aplicación.

8. La mantenibilidad y el mantenimiento.----- Pág. 96

- 8.1 generalidades.
- 8.2 Clasificación de las tareas de mantenimiento.
- 8.3 Mantenimiento centrado en la fiabilidad.
- 8.4 Niveles de mantenimiento.

3. MANTENIMIENTO.

1. Introducción.-----Pág. 102

- 1.1 Generalidades.
- 1.2 El proceso de mantenimiento.
- 1.3 El mantenimiento y la disponibilidad la seguridad y la economía.
- 1.4 El mantenimiento y el análisis de apoyo logístico.
 - 1.4.1 El mantenimiento centrado en la fiabilidad (Reliability Centered Maintenance RCM)
 - 1.4.2 Análisis del nivel de reparación (Level of Repair Analysis LORA)
 - 1.4.3 Análisis de las tareas de mantenimiento (Maintenance Task Analysis MTA)

2. Mantenimiento Total de la Producción (TPM).----- Pág. 111

- 2.1 Generalidades.
- 2.2 La producción y el mantenimiento.
- 2.3 Implantación de la estrategia del (TPM)

3. Las tareas del mantenimiento.----- Pág. 114

- 3.1 Generalidades.
- 3.2 Proceso de fallo versus tarea de mantenimiento.
- 3.3 Los retrasos logísticos.
- 3.4 Descripción de las tareas de mantenimiento.
 - 3.4.1 Tareas correctivas.
 - 3.4.2 tareas preventivas programadas.
 - 3.4.3 Tareas preventivas predictivas-condicional.

4. Estrategia de mantenimiento.----- Pág. 125

- 4.1 Generalidades.
- 4.2 Mantenimiento basado en el fallo.
- 4.3 Mantenimiento basado en la vida operativa (mantenimiento preventivo programado)
 - 4.4.1 Política de mantenimiento basada en la inspección.
 - 4.4.2 Política de mantenimiento basada en el examen de la condición (RPC).
 - 4.4.3 Política de mantenimiento basada en el control continuo de la condición.
- 4.5 Mantenimiento basado en la oportunidad.
- 4.6 Mantenimiento adaptativo.
- 4.7 Tecnologías avanzadas para el mantenimiento.
 - 4.7.1 Técnicas de vigilancia de la condición.
 - 4.7.2 Técnicas de ensayos no destructivos.
 - 4.7.3 Técnicas de diagnóstico mediante sistemas digitales.

5. Concepto de mantenimiento.----- Pág. 141

- 5.1 Requisitos de mantenimiento.
- 5.2 La soportabilidad.

6. Organización, planificación y gestión del mantenimiento.----- Pág. 146

- 6.1 El plan de mantenimiento.
- 6.2 La documentación del mantenimiento.
- 6.3 Los recursos del mantenimiento.
- 6.4 Programas de gestión de mantenimiento.
- 6.5 Mantenimiento del software.
- 6.6 Externalización del mantenimiento.

7. Coste del mantenimiento.----- Pág. 152

- 7.1 Coste de la tarea del mantenimiento.
- 7.2 Coste total directo de la política de mantenimiento correctivo.
- 7.3 Coste total directo de la política de mantenimiento preventivo.

Anexo A.-----Pág. 156

Anexo B.-----Pág. 160

Diccionario de siglas.----- Pág. 165

Glosario.----- Pág. 167

Bibliografía.----- Pág. 173

1. FIABILIDAD

1 INTRODUCCION.

Todos los usuarios de productos, equipos y sistemas, que utilizamos para satisfacer nuestras necesidades. Ya sea una tostadora de pan o un automóvil, una lavadora o una maquina de tren, un ordenador personal o un avión, todos cumplen un determinado cometido. Normalmente esos productos satisfacen nuestras necesidades y expectativas, pero inevitablemente antes o después hemos sufrido las más o menos negativas consecuencias de sus fallos. Esas consecuencias no tienen siempre el mismo impacto económico ni tienen las mismas implicaciones sobre la seguridad de los usuarios de los sistemas o sobre la capacidad de estos de seguir funcionando.

Las diferentes consecuencias que en lo económico, en lo operativo y en lo relativo a la seguridad de los usuarios pueden implicar fallos de los productos, equipos o sistemas que utilizamos.

Del estudio de los fallos de los productos, equipos y sistemas es de lo que trata la fiabilidad. En sentido coloquial, decimos que alguien o algo es fiable si podemos confiar en él o ello. Asociamos fiabilidad a la capacidad de depender con seguridad de algo o alguien. Esta noción inicial sobre el concepto de fiabilidad es suficiente, más adelante se da una definición rigurosa y formal. Los sistemas creos por el hombre tienen por objeto satisfacer una determinada necesidad. Para ello deben funcionar de una forma específica en un determinado entorno. Antes o después, todos los sistemas llegan a un instante en el que no pueden cumplir satisfactoriamente aquello para lo que fueron diseñados. El fallo del sistema tendrá unas repercusiones que dependerán del tipo de sistema, y del tipo de misión que este desempeñando y del momento en que se produzca el fallo. Es deseable que los sistemas diseñados sean fiables, en el sentido de que el usuario pueda operarlos sin que exista un elevado riesgo de fallo. El nivel de fiabilidad, o seguridad de operación satisfactoria, dependerá de la naturaleza del objetivo del sistema. El que un sistema tenga cierta fiabilidad llevara un coste y un esfuerzo asociado, por lo que la exigencia de fiabilidad para un sistema debe adecuarse a su objetivo y trascendencia.

Tengamos en cuenta, que desgraciadamente todo esto no son especulaciones teóricas, ya que manifiestan varios aspectos importantes acerca de los fallos:

- 1.- No siempre es fácil determinar el momento en que un sistema falla, por progresividad de algunos de los procesos de degradación de los componentes.
- 2.- No todos los fallos son igualmente predecibles o evitables.
- 3.- No todos los fallos producen las mismas consecuencias económico-operativas en los sistemas.
- 4.- No todos los fallos tienen las mismas repercusiones sobre la seguridad de sus usuarios.
- 5.- No todos los fallos tienen su origen en las mismas causas, pudiendo deberse su aparición a los elementos hardware del sistema, a los elementos software, a los usuarios o mantenedores, o a una combinación de ellos.

Las características comunes de los fallos son:

- (1) los fallos de los sistemas son lo suficientemente importantes como para requerir un esfuerzo de ingeniería con el fin de intentar comprenderlos y controlarlos; y
- (2) el diseño de los sistemas es complicado por lo que las causas y las consecuencias de los fallos no son obvias.

Lo que es significativo es que existen muchos productos y sistemas modernos cuyo funcionamiento operativo depende de la efectividad conjunta de algunos de los factores siguientes:

- (1) el equipo físico;
- (2) los operadores humanos;
- (3) el software;
- (4) los protocolos de gestión

En el estudio de los fallos, puede pensarse que el equipo físico es el menos importante de los cuatro. No obstante, se considera que los operadores humanos de un sistema no constituyen una población homogénea, cuyo rendimiento pueda ser representado de forma adecuada utilizando una distribución de probabilidades

La duración de un dispositivo está determinada por su diseño. La fiabilidad es una de las características del rendimiento de un sistema que se trata analíticamente en el proceso de diseño. La precisión en la evaluación de la fiabilidad de un diseño propuesto depende del conocimiento relativo al proceso de los fallos del producto.

La precisión en la predicción de la fiabilidad es también crucial desde el punto de vista económico. La fiabilidad de un producto determina la productividad operativa del mismo, así como los gastos de reparación y mantenimiento. Puede asimismo determinar el intervalo en que se distribuyen los costes operativos, y en el que se obtienen ingresos o servicios. Por tanto, la fiabilidad es un factor central para determinar el coste del ciclo de vida de un producto.

La fiabilidad es claramente un factor esencial en la seguridad de un producto. Para lograr los objetivos de un rendimiento funcional adecuado, limitación de los costes del ciclo de vida, y seguridad, la fase del diseño es el momento en que puede lograrse una influencia importante sobre los mismos. Por consiguiente, la mayoría de los estudios de fiabilidad y de los métodos desarrollados se centran en el diseño de productos.

La ingeniería de fiabilidad es el estudio de la longevidad y el fallo de los equipos. Para la investigación de las causas por las que los dispositivos envejecen y fallan se aplican principios científicos y matemáticos. El objetivo estriba en que una mayor comprensión de los fallos de los dispositivos ayudará en la identificación de las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos para aumentar su vida o por lo menos para limitar las consecuencias adversas de los fallos. Por tanto, se concede mucha importancia al diseño de los productos o a su rediseño, con anterioridad a la fabricación o a la venta.

La palabra fiabilidad tiene una definición técnica precisa y no totalmente equivalente a la entendida como fiabilidad humana. Esta es:

Definición: Fiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado.

Debe observarse que hay cuatro atributos específicos de esta definición. Estos son:

- (1) probabilidad;
- (2) un funcionamiento adecuado;
- (3) calificación con respecto al entorno;
- (4) tiempo. Los cuatro son importantes.

Lo importante es que los equipos y sistemas que diseñamos y adquirimos para satisfacer nuestras necesidades nos den las prestaciones que de ellos esperamos con un elevado nivel de seguridad y confianza en su correcto funcionamiento, que dependerá siempre tanto de la importancia que para nosotras tenga la función desempeñada por ese equipo o sistema como las consecuencias de los fallos que puedan presentarse. Y aquí es donde entra en acción la disciplina de la fiabilidad.

La ingeniería de fiabilidad es una de las disciplinas que deben integrarse en todas las fases del ciclo de vida de los sistemas. La necesidad a satisfacer dictará la fiabilidad requerida para el sistema, especificada en forma de requisitos. La fiabilidad será uno de los atributos a considerar en el diseño, especialmente en la evaluación de alternativas identificadas. Además deberá ser medida (esto es, demostrada) para el sistema desarrollado, y deberá ser validada durante la vida operativa del sistema. La retirada de servicio del sistema permitirá tomar los últimos datos a cerca de las características de fiabilidad del sistema, información que será de utilidad en futuros diseños. Es importante seleccionar, en cada aplicación concreta, las métricas de fiabilidad que realmente permitan definir la necesidad del usuario, predecir el comportamiento del sistema, o desmontarlo y validarlo. No todas las figuras de mérito (MTBF, tasa de fallos, distribución del tiempo de fallo, vida esperada, fiabilidad de misión, etc.)

son igualmente aplicables en todos los casos; la naturaleza del sistema y sus perfiles de utilización determinaran cuales deben ser empleadas en cada caso.

Aunque la fiabilidad es una disciplina de ingeniería y no un elemento de apoyo logístico, existe una relación directa entre la fiabilidad de un sistema y el apoyo logístico que este requiere. Es necesario incluir consideraciones de fiabilidad desde las fases iniciales del ciclo de vida de los equipos y sistemas, que condicionaran el diseño y desarrollo tanto del sistema propiamente dicho como de sus elementos requeridos de apoyo.

La fiabilidad incide directamente en el mantenimiento de los sistemas. A mayor fiabilidad, menor mantenimiento correctivo necesario; en mantenimiento preventivo necesario (ámbito y frecuencia de ejecución) depende mayormente del tipo de sistema y de sus perfiles de utilización. Los estudios de fiabilidad son la base de los estudios realizados con la mantenibilidad de los sistemas. Una identificación de modos de fallos y de sus consecuencias, realizada a través de análisis tales como el Análisis de Modo de Fallos, su Criticidad y sus Efectos (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA) o el Análisis de Arboles de Fallos (Fault Tree Analysis, FTA), constituirá la base para identificación de las tareas de mantenimiento necesarias, tanto preventivas como correctivas, a través de un análisis del tipo Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM). Las tareas identificadas en cuanto a su escalón preferido o recomendado de ejecución, por medio del Análisis de Nivel de Reparabilidad (Level of Repair Analysis, LORA) y posteriormente serán descritas en detalle, con la identificación de tiempos, medios y cualificaciones necesarias para su ejecución, por medio de la realización de Análisis de Tareas de Mantenimiento (Maintenance Task Analysis, MTA).

Las características de los equipos de apoyo y prueba están también relacionadas con la fiabilidad de sistema al que apoyan; a mayor fiabilidad del equipo a ser probado o apoyado, mayor fiabilidad requerida en los equipos de apoyo y prueba, cuya mantenibilidad deberá también ser considerada.

La cantidad de repuestos que necesita un sistema para apoyar su perfil previsto de utilización depende directamente de la fiabilidad de sus componentes. Una elevada fiabilidad indicará, en general una menor cantidad necesaria de repuestos requeridos. En la identificación de los repuestos requeridos deberá tenerse en cuenta tanto las características de los componentes (tas de fallos; reparabilidad o no reparabilidad; tasa de condenación de reparables; etc.) como el perfil de utilización del sistema y sus componentes (funcionamiento continuo o discontinuo; multifuncionalidad o no multifuncionalidad; etc.). Por ello, es necesario considerar la fiabilidad como una disciplina mas en el diseño de cualquier sistema, desde el análisis de la necesidad identificada hasta la retirada de servicio del sistema diseñado, y de forma integrada con el resto de disciplinas de apoyo logístico.

2. SISTEMAS COHERENTES, ESTRUCTURAS DE SISTEMAS.

2.1 Introducción.

Los modelos matemáticos permiten analizar características del comportamiento de sistemas con un esfuerzo, coste y riesgo sensiblemente inferior al que correspondería a la realización de los mismos análisis sobre el propio sistema. Por ello y por la necesidad de “saber” lo bastante a cerca del comportamiento esperable de un sistema en su fase de diseño, antes de comprometer su producción y posterior despliegue, los modelos matemáticos permiten analizar las características de fiabilidad de los sistemas en diseño, de tal forma que se pueda obtener una cierta garantía de que la configuración adoptada para el sistema valla a responder a las exigencias o requisitos que, referentes a fiabilidad, el usuario haya especificado.

El desarrollo de cualquier modelo matemático, ya sea para estudiar la fiabilidad de un sistema o cualquier otra característica, parte del establecimiento de una serie de hipótesis. En la medida en que se necesiten establecer hipótesis que “simplifiquen” la realidad con el objeto de hacer el problema resoluble matemáticamente, el modelo se alejara de la realidad y sus conclusiones no serán enteramente validas. Cuando más restrictivas sean las hipótesis sobre las que se desarrolle un modelo, menos

aplicables serán en general sus resultados. Es, por tanto, imprescindible conocer con exactitud la base del desarrollo de cualquier modelo, de forma que se sepa cómo de cerca o lejos se está de la realidad y, consiguientemente, como de veraces son los resultados.

Los modelos matemáticos constituyen ayudas valiosísimas en el proceso de diseño de sistemas, incluyendo todos los aspectos relacionados con los estudios de fiabilidad. Lo importante es siempre explicitar las bases a partir de las cuales se constituye un modelo, y no utilizar aquellos de los que se desconozcan sus hipótesis de partida y, por lo tanto, sus límites de aplicabilidad.

2.2 Estructuras básicas.

Se reconoce en general que existen cuatro tipos genéricos de relaciones estructurales entre un dispositivo y sus componentes. Estos son: (1) serie; (2) paralelo; (3) k-de-n; y (4) todas las demás.

Definición. Un sistema serie es aquel en el que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema.

En el sistema en serie, lo importante es que funcionen todos los componentes. Un ejemplo de sistema serie es el que los componentes no están físicamente conectados es el conjunto de patas de un taburete de tres patas. Otro es el conjunto de neumáticos de un coche.



Figura. Sistema en serie de tres componentes

En la estructura serie, la necesidad de que todos los componentes funcionen para que el sistema lo haga implica que $f(\mathbf{x}) = 1$ si $x_i = 1 \forall i$, y 0 de otro modo. Una forma algebraica lógica para esta condición es definir la función de estructura del sistema como:

$$\phi(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n x_i$$

Tener en cuenta que una forma igualmente correcta pero a veces menos útil es:

$$\phi(\mathbf{x}) = \min_i \{x_i\}$$

Como ejemplos, considérese un sistema serie de tres componentes y los casos:

$$x_1 = x_3 = 1 \text{ y } x_2 = 0 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 0$$

$$x_2 = x_3 = 0 \text{ y } x_1 = 1 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 0$$

$$x_1 = x_2 = x_3 = 1 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 1$$

Sólo el funcionamiento de todos los componentes hace que el sistema lo haga.

El segundo tipo de estructura es la paralela. La analogía conceptual es de nuevo el circuito eléctrico correspondiente y la definición es:

Definición. Un sistema paralelo es aquel en que el funcionamiento de cualquiera de los componentes implica el del sistema.

Un ejemplo de un sistema paralelo es el conjunto de dos motores en un avión bimotor. Mientras que funcione al menos un motor, el vuelo se mantiene. Para el sistema paralelo se puede definir la función de estructura de modo similar al sistema serie:

$$\phi(\mathbf{x}) = \max_i \{x_i\}$$

Conceptualmente, un sistema paralelo falla cuando todos sus componentes fallan, y el sistema funciona cuando se produce el complemento de «todos los componentes fallan». Por tanto, para el sistema paralelo:

$$\phi(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n x_i$$

donde definimos esta notación como:

$$\prod_{i=1}^n x_i \equiv 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i)$$

Se refiere al P (pi) invertido como a «ip». Cuando se domina, esta notación es muy útil. Algunos ejemplos son:

$$x_2 = x_3 = 0 \text{ y } x_1 = 1 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 1$$

$$x_1 = x_2 = x_3 = 0 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 0$$

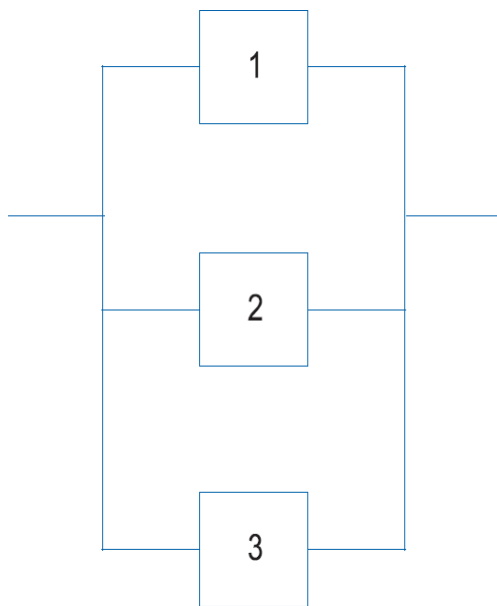


Figura. Sistema paralelo de tres componentes

El tercer tipo de estructura es la estructura k-de-n. No existe ninguna analogía conceptual para esta estructura. La definición es:

Definición. Un sistema k-de-n es uno en el que el funcionamiento de k cualesquiera de los n componentes del sistema implica el del sistema.

Un ejemplo de un sistema k-de-n es el eje trasero de un gran remolque-tractor en el que el funcionamiento de tres de las cuatro ruedas es suficiente para asegurar la movilidad.

La representación de la función de estructura para un sistema k-de-n no es tan compacta como las correspondientes a sistemas serie y paralelos. Algebraicamente, para un sistema k-de-n:

$$\phi = \phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i \geq k \\ 0 & \text{si } \sum_{i=1}^n x_i < k \end{cases}$$

Ejemplos para un sistema 3-de-4 son:

$$x_2 = x_3 = x_4 = 1 \text{ y } x_1 = 0 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 1$$

$$x_2 = x_3 \text{ y } x_1 = x_4 = 1 \Rightarrow \phi(\mathbf{x}) = 0$$

Se puede considerar que un sistema serie es un sistema n-de-n, y que un sistema paralelo es un sistema 1-de-n.

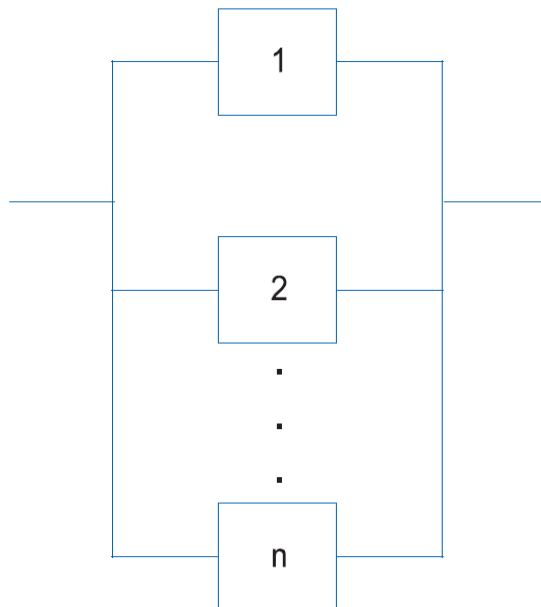


Figura. Sistema k-de-n

2.3 Equivalencia estructural

Existen otras muchas relaciones estructurales entre los componentes que pueden ser usados por un diseñador de dispositivos para obtener una capacidad específica del producto.

Aquí se desarrolla con un ejemplo popular concreto –un puente eléctrico–

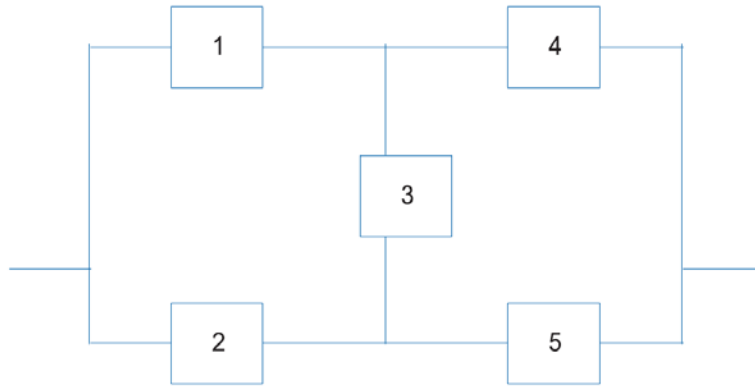


Figura. -Puente eléctrico-

Esta estructura claramente no responde a ninguna de las formas mencionadas anteriormente.

Definición 2.4. Un vector de camino es un vector de estado de los componentes \mathbf{x} para el cual $\Phi(\mathbf{x}) = 1$. El correspondiente conjunto de camino es $P(\mathbf{x})$ en donde $P(\mathbf{x}) = \{i \mid x_i = 1\}$

Un ejemplo de un vector de caminos para el puente eléctrico en la Figura anterior es $\mathbf{x} = (1, 1, 1, 0, 1)$ para el cual $\Phi(\mathbf{x}) = 1$ y $P(\mathbf{x}) = \{1, 2, 3, 5\}$. Por tanto, los vectores de camino son aquellas realizaciones de los vectores de estado de los componentes para los que el sistema funciona. De hecho, se puede decir que si \mathbf{x} es un vector de camino e $\mathbf{y} \geq \mathbf{x}$, entonces \mathbf{y} es también un vector de camino. Luego:

Definición. Un vector de camino mínimo es un vector de camino \mathbf{x} para el cual $\mathbf{y} < \mathbf{x}$ implica que $\Phi(\mathbf{y}) = 0$. El correspondiente conjunto de camino, $P(\mathbf{x})$, se designa como un conjunto de camino mínimo.

Un vector de camino mínimo es aquél cuyo conjunto de camino no tiene ningún subconjunto que sea un conjunto de camino. Físicamente, es el conjunto más pequeño de componentes cuyo funcionamiento hace que el sistema funcione.

Un ejemplo de un vector de camino mínimo para el puente eléctrico es $\mathbf{x} = (1, 0, 0, 1, 0)$ para el que $P(\mathbf{x}) = \{1, 4\}$. De hecho, es relativamente sencillo identificar los vectores de caminos mínimos para el puente. Los conjuntos mínimos de caminos son:

$$P_1 = \{1, 4\} \quad P_2 = \{2, 5\} \quad P_3 = \{1, 3, 5\} \quad P_4 = \{2, 3, 4\}$$

Recordemos que para cada vector de camino mínimo $\Phi(\mathbf{x}) = 1$. De este modo, si los componentes de cualquier camino mínimo funcionan, el sistema funciona. Es decir, se puede considerar que el sistema está integrado por los caminos mínimos en paralelo, ya que sólo es necesario que uno de los caminos mínimos funcione para que el sistema lo haga. Además, como todos los componentes en un conjunto de caminos mínimos tienen que funcionar para que funcione el camino mínimo, se puede considerar que un camino mínimo es una configuración de serie de los componentes constituyentes. Por tanto, se puede considerar el sistema como una configuración paralela de estructuras serie integradas por los componentes de los conjuntos de caminos mínimos.

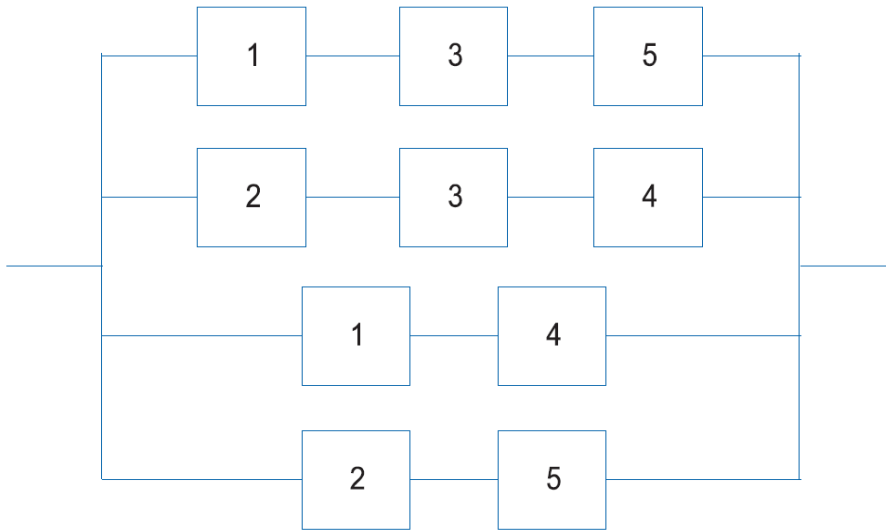


Figura. Estructura equivalente de caminos mínimos para puente eléctrico.

Merece la pena subrayar que para cada vector \mathbf{x} de estado de los componentes, el valor de la función $\Phi(\mathbf{x})$ de estado del sistema es idéntica para el sistema original (puente) y para el sistema equivalente definido con los vectores de caminos mínimos. Este es un resultado importante por dos razones. En primer lugar, demuestra que cada estructura de sistema puede ser evaluada en términos de una estructura equivalente compuesta exclusivamente de configuraciones serie y paralelas de los componentes del sistema. Por tanto, se puede hacer que la evaluación sea relativamente sencilla. Lo segundo y más importante es el hecho de que ahora está claro que siempre se puede hallar el estado de sistema con los valores de estado de los componentes. Por consiguiente, el estudio de fiabilidad se puede centrar en los componentes.

La fiabilidad de los componentes puede ser estudiada independientemente, y por tanto que las medidas resultantes pueden ser agregadas en la práctica. La aplicación subsiguiente del método de sistemas para describir las interacciones operativas es útil y apropiado.

Da la casualidad de que existe una segunda estructura equivalente que se puede obtener con un método similar.

Definición. Un vector de corte es un vector \mathbf{x} de estado de los componentes para el que $\Phi(\mathbf{x}) = 0$. El correspondiente conjunto de corte es $C(\mathbf{x})$, donde $C(\mathbf{x}) = \{i \mid x_i = 0\}$.

Los vectores de corte son las realizaciones de los vectores de estado de los componentes para los cuales ha fallado el sistema. De hecho, se puede decir que si \mathbf{x} es un vector de corte e $\mathbf{y} \leq \mathbf{x}$, entonces \mathbf{y} es también un vector de corte.

Definición. Un vector de corte mínimo es un vector de corte \mathbf{x} para el que $\mathbf{y} > \mathbf{x}$ implica que $\Phi(\mathbf{y}) = 1$. Nos referimos al correspondiente conjunto mínimo de corte, $C(\mathbf{x})$, como a un conjunto de corte mínimo.

Un vector de corte mínimo es aquel cuyo conjunto de corte no tiene un subconjunto que constituya un vector de corte. Físicamente, es el conjunto más pequeño de componentes cuyo fallo asegura el fallo del sistema.

Se debe recordar que para cada vector de cortes mínimos $\Phi(\mathbf{x}) = 0$. Por tanto, cada corte mínimo es suficiente para causar el fallo del sistema. Todos los cortes mínimos deben funcionar para que el sistema funcione. Un corte mínimo funciona si cualquiera de los componentes del conjunto de cortes mínimos funciona. Es decir, es posible considerar el sistema como integrado por los cortes mínimos dispuestos en serie, y todos deben funcionar para que funcione el sistema. Además, como el funcionamiento de cualquiera de los componentes en el conjunto de cortes mínimos implica una función de cortes mínimos, se puede considerar que un conjunto de corte mínimo está integrado por la configuración en paralelo de sus componentes constituyentes. De esta manera, se puede considerar el

sistema como una configuración serie de estructuras paralelas integradas por los componentes de los conjuntos de cortes mínimos.

La representación gráfica de la estructura equivalente de cortes mínimos se muestra a continuación en la figura siguiente.

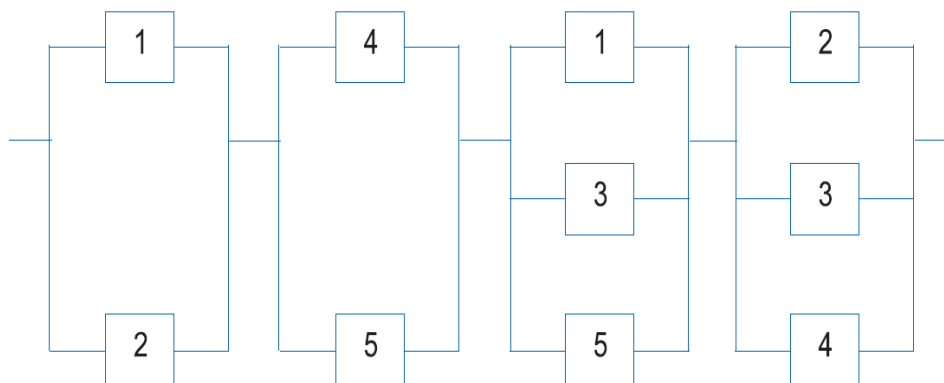


Figura. Estructura equivalente para cortes mínimos para el puente eléctrico

Una observación final relativa a las funciones de estructura de sistemas es que las estructuras serie y paralelo limitan todas las demás estructuras. Es decir, para un sistema coherente:

$$\prod_{i=1}^n x_i \leq \phi(\mathbf{x}) \leq \prod_{i=1}^n x_i$$

2.4 Módulos de sistemas

Para la mayoría de estos sistemas complejos, se pueden fortalecer los resultados obtenidos con estructuras equivalentes, ya que muchas veces es posible dividir el sistema en módulos (o subsistemas) que se pueden tratar simultáneamente como componentes del sistema total y como sistemas que constan de componentes. Al definir una jerarquía de dos o más niveles de este modo, se simplifica enormemente el análisis de estado, y por tanto las relaciones de fiabilidad. Nos referimos normalmente a este proceso de definir una jerarquía anidada de componentes como una descomposición modular.

Definición. Un sistema coherente (\mathbf{x}, ψ) es un módulo del sistema coherente (\mathbf{x}, Φ) si $\Phi(\mathbf{x}) = \theta(\psi(\mathbf{x}), \mathbf{x})$, en donde θ es una función de estructura coherente definida mediante un subconjunto de los componentes de \mathbf{x} , y θ es también una función de estructura coherente para la que (\mathbf{x}, ψ) actúa como componente.

La idea de módulo es bastante intuitiva. Muchos de los productos con los que estamos familiarizados proporcionan ejemplos. Se puede considerar que un ordenador está compuesto por una configuración de módulos para entrada/salida, lógica, memoria, y tareas de visualización. Un último paso en la formalización de la idea es:

Definición 2.9. Una descomposición modular de un sistema coherente es la división de los componentes del sistema en subconjuntos inconexos, la definición de una función de estructura coherente asociada ψ_r para cada subconjunto y la definición de una función de estructura organizativa, θ , de forma que $\Phi(\mathbf{x}) = \theta(\psi_1(\mathbf{x}), \psi_2(\mathbf{x}), \dots, \psi_r(\mathbf{x}))$.

En resumen, la definición técnica de fiabilidad sirve como punto de arranque para un estudio cuidadoso y detallado del tema. Una formulación algebraica conveniente para obtener el efecto del estado funcional de los componentes sobre el estado del sistema proporciona un medio para representar y analizar la función del sistema; además unos cuantos resultados generales aseguran que se puede evaluar eficazmente cualquier configuración de diseño de sistemas.

3 FIABILIDAD BASICA DE SISTEMAS COHERENTES.

3.1 Introducción.

La definición de fiabilidad presenta cuatro elementos: probabilidad, tiempo, entorno, y funcionamiento correcto. Es necesario hablar en términos probabilísticos al referirse al posible estado del sistema en un instante futuro; el tiempo (o parámetro equivalente, como ciclos de funcionamiento, percusiones, etc.) es esencial, ya que la probabilidad de que los componentes funcionen depende del tiempo transcurrido (en el sentido amplio de su término), por ser la mayoría de los procesos de degradación que causan sus fallos función de este; la especificación del entorno de operación es necesaria, ya que un mismo componente perderá sus cualidades de forma distinta en entornos distintos, y consiguientemente sus probabilidades de supervivencia o funcionamiento correcto serán diferentes; y por último, debe definirse lo que se entiende por funcionamiento correcto, es decir, debe establecerse la línea divisoria entre “funcionamiento” y “fallo”. Siempre que se quiera hacer referencia a la fiabilidad de un componente o sistema debe explicarse los cuatro elementos mencionados; es desgraciadamente muy frecuente ver referencias a supuestas fiabilidades como meras probabilidades de supervivencia de un equipo, sin indicar en cuánto tiempo, en que entorno, y bajo qué definición de funcionamiento correcto. En general, es este último elemento (funcionamiento correcto) el más difícil de definir, por el hecho ya mencionado de que la mayoría de los componentes tienen procesos progresivos de degradación o pérdida de sus cualidades, con lo que no siempre es trivial el trazar la línea divisoria entre “funcionamiento” y “fallo”.

Por ejemplo la, la fiabilidad de una bombilla es la probabilidad de que siga luciendo tras un cierto tiempo y en un determinado entorno; en este caso la línea divisoria entre fallo y funcionamiento correcto es fácil de situar: mientras la bombilla luce funciona satisfactoriamente, y cuando se funde se considera que ha fallado. Si consideramos ahora la rueda de un automóvil, la situación es algo más compleja. En este caso la fiabilidad es la probabilidad de que la rueda siga funcionando correctamente en un cierto entorno y tras un “tiempo” determinado. La unidad adecuada de “tiempo” sería el kilómetro o cualquier otra medida de longitud, y entorno es ciertamente importante, ya que no es lo mismo de cara a asegurar una cierta longevidad de la rueda al rodar sobre una carretera bien asfaltada que el hacerlo sobre una pista forestal y pedregosa. Sin embargo, la línea divisoria entre el funcionamiento correcto y fallo no es fácil de trazar; en el caso de un pinchazo es claro que la rueda ha fallado, pero la cuestión es, ¿Cómo se valora la pérdida de las cualidades de adherencia y tracción no son lo suficientemente satisfactorias? La multifuncionalidad de algunos elementos o componentes y la naturaleza de sus procesos de degradación hace en ocasiones muy difícil establecer una línea claramente divisoria entre funcionamiento correcto y fallo, siendo necesario establecer estados intermedios de funcionamiento.

3.2 Importancia de la fiabilidad.

A menudo, tiene sentido preguntarse cuál es el componente que debe mejorarse primero para aumentar la fiabilidad del sistema. Normalmente, la respuesta a esta pregunta es mejorar el componente que tiene el mayor efecto sobre la fiabilidad del sistema. La idea de que cada componente tiene un efecto distinto sobre la fiabilidad del sistema se ha cuantificado en el parámetro «importancia de fiabilidad» del componente, lo cual expresa que el componente para el que la fiabilidad impone el gradiente máximo sobre la función de fiabilidad de sistema es el más importante. Esto significa que el componente más débil es el más importante para determinar la fiabilidad del sistema, y es aquel en el que las mejoras producen el máximo beneficio en el nivel del sistema. Un ejemplo claro es una, cadena en la que el eslabón más débil determina la fiabilidad de la cadena.

La resolución de las cuestiones de cómo aumentar la fiabilidad de sistemas ha sido uno de los campos en que los analistas de fiabilidad han contribuido al diseño de sistemas. Las medidas de importancia de fiabilidad dan una base para evaluar la rentabilidad de las inversiones en el rediseño de componentes, u otras estrategias para lograr mejoras.

3.3 Asignación de fiabilidad

Otro planteamiento para aumentar la fiabilidad del sistema es mediante la introducción de redundancias en ubicaciones de componentes escogidos. Es decir, la configuración del sistema se altera sustituyendo un solo componente con dos o más copias del mismo en paralelo. El problema de seleccionar los componentes para los que se hace esto se conoce como el problema de asignación de fiabilidad. Se supone que cada copia de un componente incluido en el sistema tiene un coste. El coste puede en efecto representar el precio del componente, o puede representar un aumento de peso o cualquier otra consecuencia de asignar el componente al diseño. Entonces, el problema de designar las ubicaciones y magnitudes de la redundancia de componentes se puede formular como un programa de enteros. De hecho, existen dos formas algebraicas plausibles para el modelo.

Debe distinguirse entre la asignación y la distribución de fiabilidad. La distribución de fiabilidad es el proceso de asignar objetivos de fiabilidad a los subsistemas durante el diseño del sistema. Existen algoritmos para llevar esto a cabo, y el más popular es el llamado método ARINC descrito por Lloyd y Lipow (39). La dificultad principal de este método es que la tarea de distribución está basada en criterios subjetivos. En contraste, el modelo de asignación definido anteriormente se ocupa del problema de asignación de redundancias, con el fin de lograr un objetivo definido de fiabilidad. Este modelo es por tanto objetivo.

3.4 Forma de la función de fiabilidad

Otro resultado de valor considerable en la evaluación de diseño es el hecho de que para cualquier configuración de componentes idénticos, la función de fiabilidad tiene «forma de S». Es decir, la mejora de la fiabilidad de un componente tiene una influencia sobre la fiabilidad del sistema del tipo que se representa en la Figura. La función de fiabilidad del sistema es $r(p)$:

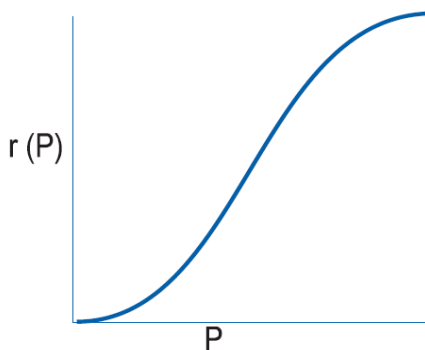


Figura: Fiabilidad del sistema en función de la de los componentes

Es importante observar las condiciones bajo las que se desarrolla el gráfico. En particular, $r(p)$ es cóncava para un sistema serie de componentes idénticos, por tanto las mejoras en la fiabilidad del sistema siempre superan la magnitud de la ganancia inicial en la fiabilidad de los componentes. Es decir, una mejora del 10% en p en el intervalo de

0,80 a 0,88 en sistemas de serie con tres componentes produce un aumento del 33% en la fiabilidad del sistema (de 0,521 a 0,682). En el caso más general en que los

componentes no son idénticos, el aumento de la fiabilidad de un componente en un porcentaje dado proporciona el mismo aumento porcentual en la fiabilidad del sistema. Según la lógica correspondiente, $r(p)$ para un sistema paralelo de componentes idénticos es convexa, por tanto los beneficios resultantes del aumento de la fiabilidad de los componentes son menores. En general, la forma «S» de la función de mejora proporciona una guía efectiva para evaluar el interés relativo de invertir en el aumento de fiabilidad de los componentes.

4. FIABILIDAD EN EL TIEMPO

4.1 Introducción.

La definición de fiabilidad que se dio en capítulos anteriores indica que la fiabilidad es la probabilidad de funcionamiento satisfactorio a lo largo del tiempo. El supuesto subyacente implícito es que en una muestra de dispositivos idénticos, la supervivencia (o duración de vida) se dispersa de una manera que se modela bien con la probabilidad y , por tanto, con una función de distribución. Por tanto,

la extensión de las medidas de fiabilidad para incluir el tiempo implica la especificación de las distribuciones de probabilidad, las cuales deben ser modelos razonables de la dispersión de duración de vida.

4.2 Medidas de fiabilidad.

La variable aleatoria que implica la definición de fiabilidad es la duración del funcionamiento o duración de vida.

La función de distribución sobre la duración de vida es la base de cuatro descriptores algebraicos equivalentes de la longevidad. Estos son $F(t)$, (t) , la función de densidad y la función de riesgo. Cuando existe, la función de densidad, $f(t)$, se define como:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t)$$

de forma que proporciona una cuantificación de la dispersión de la más probabilística de la distribución de vida. Para construir la función de riesgo, consideremos una muestra de dispositivos que empiezan a funcionar al mismo tiempo, al que denominaremos $t = 0$. Si transcurrido algún tiempo observamos esta muestra, puede que algunos hayan fallado mientras que otros todavía funcionen. Quizá queramos evaluar la probabilidad de supervivencia (o fallo) para aquellos dispositivos que han sobrevivido hasta el momento de nuestra observación. Es decir, quizá queramos determinar la probabilidad condicional de la supervivencia continuada.

La función de riesgo, algunos la llaman la función de tasa de fallos y otros la denominan la función de intensidad. Es la probabilidad condicional instantánea de fallo en cualquier instante. Como tal, es útil para caracterizar el comportamiento de fallos de una muestra de dispositivos.

La función de riesgo es una cantidad fundamental en el análisis de fiabilidad. Es bastante común que el comportamiento de fallos de dispositivos sea descrito en términos de sus funciones de riesgo. De hecho, la idea de la curva de la bañera forma la base conceptual para gran parte del estudio de fiabilidad. La idea de la curva de la bañera es que la función de riesgo para una muestra de dispositivos evoluciona como se muestra a continuación en la Figura siguiente. En concreto, al principio de la vida de los dispositivos, los más débiles fallan a una tasa relativamente alta como consecuencia de un fenómeno de «mortalidad infantil», quizá debido a una fabricación defectuosa. Como los primeros fallos retiran de la muestra las copias débiles de los dispositivos, la tasa de riesgo decrece. De un modo parecido, al final de la vida de los dispositivos, los supervivientes fallan como consecuencia del «desgaste», de modo que aumenta la tasa de riesgo. En el intervalo transcurrido entre estos dos comportamientos, la muestra de dispositivos exhibe un riesgo relativamente bajo y aproximadamente constante. Este intervalo se denomina frecuentemente como la vida funcional del dispositivo. En este contexto pueden hacerse dos comentarios significativos:

(1) que los humanos y otros seres biológicos muestran un comportamiento de mortalidad análogo y

(2) que durante mucho tiempo las políticas normales de adquisición de equipos militares y para el gobierno han incluido requisitos de prueba («run-in») para intentar evitar la compra de dispositivos que fallen al principio de su vida.

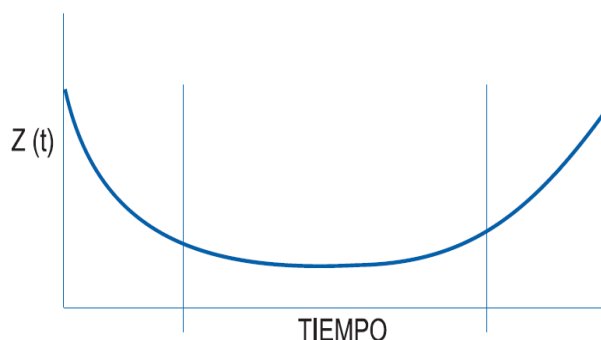


Figura ejemplo de curva de la bañera

En los últimos años ha habido una polémica considerable acerca de la exactitud de la descripción proporcionada por la curva de la bañera. En vista de las pautas de obsolescencia y de los nuevos resultados de las investigaciones, existen razones para poner en duda el concepto.

No obstante, como subraya la relación existente entre la fiabilidad de los dispositivos y la forma de la función de riesgo, la idea de la curva de la bañera proporciona un punto de partida excelente para la definición de los modelos de distribución de probabilidades.

Se debe observar que hay dos formas algebraicas adicionales extensamente utilizadas en el estudio de fiabilidad de dispositivos. Estas son la distribución de vida residual y la función acumulativa de riesgo. La distribución de vida residual es la distribución sobre la duración de vida que sigue a la supervivencia hasta un momento específico en el tiempo. En realidad es la distribución de vida condicional en cualquier momento.

4.3 Distribuciones de vida.

En principio, se puede utilizar cualquier función de distribución para crear un modelo de duración de equipos. En la práctica, las funciones de distribución que tienen funciones de riesgo monotónicas parecen más realistas y, dentro de esta clase, existen unas pocas que son consideradas como aquellas que proporcionan los modelos más razonables de fiabilidad de dispositivos. La función de distribución que se utiliza más a menudo para modelar la fiabilidad es la distribución exponencial. Esta es un modelo de fiabilidad de dispositivos tan popular porque:

- (1) es sencillo algebraicamente y por tanto tratable y
- (2) se considera representativo del intervalo de vida funcional del ciclo de vida del dispositivo.

Algunas personas creen que las empresas gestionan sus componentes o dispositivos envejeciéndolos a lo largo del ciclo de vida inicial antes de ponerlos en servicio. Se espera que los dispositivos estén obsoletos antes de llegar al período de desgaste, de forma que un modelo apropiado de fiabilidad de dispositivos es uno que tiene un riesgo constante. Este punto de vista es controvertido. No obstante, se utiliza mucho el modelo exponencial.

La distribución exponencial es la única distribución de probabilidad que tiene una función de riesgo constante. La expresión general de la exponencial es:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad 0 \leq t < \infty$$

Un modelo de distribución de vida alternativo que también se utiliza mucho es la distribución Weibull (61). Se puede presentar de varias maneras. La más general es:

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

La distribución Weibull se utiliza extensivamente en el desarrollo de modelos de fiabilidad. Tiene la ventaja de la flexibilidad a la hora de crear modelos de varios tipos de comportamiento de riesgo, y también es manejable algebraicamente. Además, como con cualquier distribución con dos parámetros, puede describir bastante bien muchas situaciones reales. Existen otras dos razones por las que se utiliza tan extensamente la distribución Weibull. Una es que cuando Weibull desarrolló la forma de distribución por primera vez, lo hizo para representar el comportamiento de fallos de muestras extensibles, y la otra es que la distribución Weibull es una distribución de valores extremos. Si se considera que un dispositivo puede fallar debido a alguna de varias causas posibles, el primer mecanismo de fallo que ocurra (tiempo mínimo hasta su aparición) determina el fallo del dispositivo. Por tanto, el tiempo de fallo es el valor mínimo de un conjunto, y debe ser representado utilizando una distribución de la clase de distribuciones de valores extremos.

Otro modelo popular es el de la distribución normal. Debido a que no es tratable algebraicamente, la distribución normal se expresa generalmente en términos de su función de densidad:

$$f(t) = \frac{e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

La distribución normal muestra un riesgo creciente y la demostración de este hecho es un ejercicio interesante. Se suele considerar que la distribución normal es un modelo muy apropiado para la fiabilidad de componentes estructurales.

Por otra parte, se considera frecuentemente que la distribución logarítmica normal es un modelo representativo de la duración de vida de ciertos componentes electrónicos.

Hay otra distribución que se utiliza extensamente para el desarrollo de modelos de fiabilidad. Esta es la distribución gamma. La representación de la función de densidad para la distribución gamma es:

$$f(t) = \frac{\lambda^\beta}{\Gamma(\beta)} t^{\beta-1} e^{-\lambda t}$$

Su desventaja es que es bastante difícil tratarla algebraicamente, pero su ventaja es que surge naturalmente como la convolución de distribuciones exponenciales. Por tanto, tiene un interés práctico considerable con relación a los procesos de fallos físicos.

Un último modelo que merece la pena mencionar es el sugerido por Hjorth (30). Ninguna de las funciones de distribución mencionadas previamente proporciona realmente funciones de riesgo en forma de curva de la bañera. Reconociendo esto, Hjorth sugiere el uso de lo que él llama una distribución IDB (Increasing, Decreasing, Bathtub) para la que la expresión general de la función de distribución es:

$$F(t) = 1 - \frac{e^{-\delta t^2/2}}{(1 + \beta t)^{\theta/\beta}}$$

A pesar de su aparente complicación, Hjorth señala que es posible lograr que esta distribución muestre un comportamiento creciente, decreciente o de curva de la bañera (de aquí el nombre IDB) si se seleccionan los parámetros de forma adecuada.

En conclusión, se observa que existen muchos tipos de dispositivos. Algunas personas distinguen entre sistemas mecánicos o estructurales y eléctricos o electrónicos, mientras que otras definen las clases de equipos aun más minuciosamente. Probablemente existen ejemplos en que cada una de las distribuciones mencionadas proporciona un modelo efectivo.

5. LOS PROCESOS DE FALLO

5.1 Introducción.

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

Una parte sustancial del esfuerzo científico y de ingeniería que ha constituido la evolución de la disciplina de la fiabilidad se ha centrado en el estudio y en la realización de modelos de los procesos de degradación de componentes.

5.2 Modelos de fallos mecánicos.

Tradicionalmente se han desarrollado modelos de fallos desde una perspectiva mecánica o eléctrica. A menudo se considera que la fiabilidad de los equipos mecánicos depende de la integridad estructural, la cual es influenciada por las cargas aplicadas y la fuerza inherente. Por contraste, la fiabilidad de dispositivos eléctricos se ha considerado usualmente como dependiente de la estabilidad material, a pesar de exposiciones a reacciones químicas hostiles como la oxidación. Sólo recientemente algunos analistas han sugerido que ambos tipos de fiabilidad son el resultado de clases comunes de fenómenos. De este modo, los modelos elementales desarrollados para procesos de fallos han sido diferentes para dispositivos mecánicos y eléctricos.

Una representación inicial y todavía popular de la fiabilidad de un dispositivo mecánico es el modelo de «interferencia de tensión fuerza». Bajo este modelo, existe una dispersión aleatoria de la tensión, y , la cual es resultado de las cargas aplicadas. La tensión puede ser modelada por la función de distribución $H(y)$. Análogamente, hay también una dispersión aleatoria en la fuerza inherente de los dispositivos, x , la cual puede ser modelada por $G(x)$. Entonces, la fiabilidad de los dispositivos corresponde al fenómeno de que la fuerza es mayor que la tensión. Es decir:

$$R = P[X > Y] = \int_0^{\infty} \int_y^{\infty} h(y) g(x) dx dy = \int_0^{\infty} \int_x^{\infty} h(y) g(x) dy dx$$

para la que existen las expresiones equivalentes:

$$R = P[X > Y] = \int_0^{\infty} h(y) (1 - G(y)) dy = \int_0^{\infty} H(x) g(x) dx$$

La probabilidad de fallos es el complemento de la fiabilidad. Puesto que la expresión anterior es independiente del tiempo, la definición del modelo de fiabilidad se centra en la selección de las distribuciones G y H , y en la representación de la evolución en el tiempo de estas distribuciones. Un modelo popular de este tipo está basado en la suposición de que la tensión tiene una distribución normal con una media y varianza constantes, mientras que la fuerza también es normal pero con una media decreciente y una varianza creciente.

Un modelo alternativo que se utiliza de manera más extendida es el modelo de daños cumulativos. El modelo de daños cumulativos elemental empieza con la hipótesis de que un dispositivo está sujeto a «choques» que ocurren de modo aleatorio en el tiempo. Cada choque transmite una cuantía aleatoria de daños en el dispositivo, el cual falla cuando se excede un umbral de capacidad o de tolerancia. La realización más común de este modelo incluye la suposición de que los choques ocurren de acuerdo con un proceso de Poisson con intensidad λ , que y las cantidades de daños por choque se distribuyen independiente e idénticamente.

Hay varias extensiones del modelo de daño cumulativo que proporciona un mayor realismo si ello es necesario. Una extensión consiste en que las funciones de daño evolucionen en el tiempo para reflejar el hecho de que los choques posteriores dañan más al dispositivo. Otras extensiones hacen que el umbral de los fallos sea una función decreciente de tiempo para representar una menor tolerancia al daño. Otras características del modelo son la correlación en el proceso de choque o la posibilidad de tipos de múltiples choques. En cada uno de estos casos, la distribución de vida resultante es IFRA.

5.3 Modelos de fallos electrónicos.

Los modelos de fiabilidad de dispositivos eléctricos y electrónicos se deben a observaciones empíricas y fueron desarrollados con posterioridad a los modelos de fiabilidad mecánicos. La rápida evolución de los dispositivos electrónicos, especialmente los microelectrónicos, supuso un empuje considerable en el desarrollo de los modelos de fiabilidad para dispositivos electrónicos. Además, debido a que un sistema complejo, como el de un avión, incluye muchos más

componentes electrónicos que mecánicos, y también porque la duración de los primeros dispositivos electrónicos era considerablemente más corta que la de los dispositivos mecánicos, la fiabilidad de los dispositivos electrónicos ha recibido una gran atención.

La mayoría de los modelos desarrollados se basan en la idea de que los procesos de degradación de los dispositivos electrónicos son esencialmente reacciones de conversión química, que tienen lugar en los materiales que integran los dispositivos. Consecuentemente, muchos modelos están basados en la ecuación de tasa de reacción de Arrhenius, que tomó su nombre del químico del siglo XIX que desarrolló la ecuación durante el estudio de reacciones irreversibles como la oxidación. La forma básica de la ecuación es que la tasa de reacción, ρ , es:

$$\rho = \eta e^{-E_a/KT}$$

donde η es un factor de frecuencia de electrones, K es la constante de Boltzmann ($8,623 \times 10^{-5}$ eV/°K), T es la temperatura en grados Kelvin, y E_a es la energía libre de activación de Gibb. Para la realización de modelos de fiabilidad, el producto de la tasa de reacción, ρ , y del tiempo da la extensión del progreso de la reacción de deterioro, y por tanto se considera que corresponde al riesgo acumulativo en el tiempo t .

5.4 Riesgos proporcionales.

El modelo de riesgos proporcionales, que originalmente fue propuesto por Cox (17), ofrece una representación más unificada de la relación entre el entorno y el proceso de fallos. Hay muchas formas de describir este modelo. Una forma general, conceptualmente interesante, es:

$$z = z(t, \mathbf{x})$$

en donde t de nuevo representa el tiempo y \mathbf{x} es un vector de variables del entorno. La forma propuesta inicialmente por Cox es:

$$z = z(t, \mathbf{x}) = z_0(t) e^{\gamma' \mathbf{x}}$$

donde el producto vectorial $\gamma' \mathbf{x}$ es un producto ordinario que da un escalar. La idea es que la función de riesgo correspondiente a la distribución sobre la duración de vida varía según (de hecho, como una función de) las características del entorno en el que opera un dispositivo. La forma anterior hace que el riesgo bajo un conjunto específico de condiciones, descritas por el vector \mathbf{x} , sea proporcional a un riesgo base.

Una generalización lógica del modelo de riesgos proporcionales es permitir que el coeficiente de tasa de cambio sea dependiente del tiempo. Parece ser que esta forma del modelo global debería proporcionar un formato para la unificación de los modelos de distribución de vida de los dispositivos mecánicos y electrónicos.

5.5 Aceleración de la edad

La manipulación del entorno de funcionamiento se puede utilizar para incrementar la tasa de envejecimiento de una muestra de dispositivos. Esto tiene dos aplicaciones útiles. Se hace referencia a la primera como «pruebas de vidas aceleradas», y a la segunda como «cribado».

Como implica el término, las pruebas de vidas aceleradas consisten en el uso de la aceleración de edad para estudiar la longevidad de dispositivos. Se pueden obtener estimaciones de los valores de los parámetros de distribución de vida, o por lo menos acotaciones de tolerancia sobre la fiabilidad. Se puede reconocer un rendimiento de fiabilidad insatisfactorio o se puede investigar una sensibilidad a factores específicos del entorno. El enfoque recae en las pruebas y en el apoyo al diseño y desarrollo de productos. Para muchos tipos de dispositivos, la fiabilidad es suficiente para excluir la posibilidad de pruebas bajo condiciones normales, durante un intervalo de tiempo lo suficientemente

largo como para evaluar la fiabilidad de dispositivos. Por ejemplo, los dispositivos microelectrónicos modernos suelen tener una duración de vida media entre 25 y 50 años. La aceleración de edad ofrece un método para el estudio de la fiabilidad de nuevos diseños en un intervalo de tiempo aceptable.

En contraposición a las pruebas de vida acelerada, la investigación de condiciones extremas es el uso de la aceleración de la edad para envejecer una muestra de dispositivos más allá de la primera fase de vida, y justo antes de su uso por parte del cliente.

Para ambas aplicaciones se modifica el entorno de funcionamiento de un dispositivo dentro de los límites que éste debería ser capaz de tolerar. Es decir, es importante mantener la naturaleza de los procesos de fallos para que el comportamiento del envejecimiento observado sea consistente. Si se hace esto, se cree normalmente que el tipo de riesgos proporcionales del aumento de la tasa de riesgo se obtiene de tal manera que la forma de la distribución se mantiene. Así, la aceleración de la edad sólo comprime la escala de tiempo y:

$$F_a(t) = F(a \cdot t)$$

donde «a» es un factor de aceleración de edad. Es decir, la distribución de vida bajo aceleración es igual a la distribución original cuando se implementa para una escala de tiempo que se comprime por el factor «a».

En el caso de los dispositivos electrónicos, también se puede calcular el factor de aceleración, como el ratio entre la tasa de la reacción de degradación en el entorno del diseño y la tasa prevalente en el entorno de condiciones extremas. La ecuación de Arrhenius proporciona un ejemplo oportuno y muy utilizado:

$$a = \frac{\rho_a}{\rho_0} = \frac{e^{-E_a/KT_a}}{e^{-E_a/KT_0}} = e^{\frac{E_a}{K} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_a} \right)}$$

Otro modelo de aplicación de condiciones extremas es el modelo Eyring para los efectos combinados de tensiones de temperatura y voltaje. Esto realmente es una extensión de la ecuación Arrhenius. La forma general es que la tasa de reacción está dada:

$$\rho = \eta e^{-E_a/KT} e^{\gamma_1 V - \gamma_2 V/KT}$$

donde γ_1 y γ_2 corresponden a energías de activación. Entonces el factor de aceleración es:

$$a = \rho_a / \rho_0 = e^{\frac{E_a}{K} \left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_a} \right]} e^{\gamma_1 (V_a - V_0) + \frac{\gamma_2}{K} \left[\frac{V_0}{T_0} - \frac{V_a}{T_a} \right]}$$

El modelo de Eyring también ilustra el hecho de que se pueden utilizar tensiones múltiples para lograr una aceleración de edad aun mayor.

La situación de los modelos de fallos mecánicos es bastante diferente a la de los de dispositivos electrónicos. En electrónica, se considera que los modelos como la ecuación de Arrhenius y el modelo de Eyring se aplican a diversas clases de dispositivos y, de hecho, se pueden aplicar de forma generalizada. En contraste, se han desarrollado muy pocos modelos de aceleración de edad para los dispositivos mecánicos, y aquellos que existen están asociados con productos específicos. No hay modelos de aceleración de edad de aplicación general para dispositivos mecánicos. Por tanto, las pruebas de vida de componentes mecánicos se basan normalmente, en una frecuencia creciente de actuación para los componentes. Un ejemplo clásico de esto es la manipulación de la bisagra de la puerta de un coche, utilizando una máquina que abra y cierre la puerta continuamente. La edad no se acelera. En cambio, la tasa de uso (o actuación) se incrementa, con el fin de obtener los datos de la prueba en un tiempo razonable.

5.6 Cribado.

La aceleración de la edad se utiliza en segundo lugar en «cribado». Ésta se utiliza especialmente en los equipos electrónicos para reducir la frecuencia de fallos de campo. El concepto es que todas las copias de un dispositivo funcionan en un entorno modificado durante el tiempo suficiente para envejecer todos los dispositivos que sobrevivan más allá de su primera etapa de vida, cuando la tasa de riesgo es alta, hasta el tiempo de vida funcional, cuando el riesgo es relativamente más bajo y constante.

Se han definido modelos de optimización para seleccionar el régimen de tensión más rentable. En estos modelos, los costes de la aplicación de tensión del entorno a los dispositivos y los costes de producto perdido se equilibran, ya que se evitan los costes de los fallos que se hubiesen experimentado como resultado de fallos durante el uso del producto por parte del cliente. Las soluciones obtenidas indican que, para muchos tipos de dispositivos electrónicos, el cribado es una estrategia valiosa para gestionar la fiabilidad de los dispositivos.

5.7 Crecimiento de la fiabilidad

Otro aspecto del estudio de procesos de fallos es la creencia de que el diseño y el desarrollo de un nuevo dispositivo, y la evolución de los métodos de fabricación del nuevo diseño, tienen como resultado una mejora en la fiabilidad de una muestra de dispositivos. Esta mejora se puede describir como una reducción en la función de riesgo «basada en la experiencia».

J.T. Duane observó que el número cumulativo de fallos producidos durante las pruebas dividido por el tiempo de prueba cumulativo decrecía, y era una función casi lineal del logaritmo doble del tiempo de prueba cumulativo. Duane examinó sus datos y llegó a la conclusión que la función de la ley de potencia proporcionaría una buena aproximación al comportamiento observado:

$$N(T) = \delta T^n$$

en donde $N(T)$ es el número cumulativo de fallos observados y T es el tiempo de prueba cumulativo. Duane entonces sugirió que la derivada de $N(T)$ debería corresponder a una estimación de la «tasa instantánea de fallos», lo cual es equivalente a una función de riesgo:

$$z(T) = \frac{d}{dT} N(T) = \delta n T^{n-1}$$

Duane (23) supone que el fallo se rige por un proceso de riesgo constante y la expresión anterior representa la mejora realizada en la tasa de riesgo como consecuencia de modificaciones en el diseño y del aprendizaje en la fabricación de un dispositivo.

Crow propuso una mejora al modelo de Duane basada en el reconocimiento de que los datos de muestra observados presenta una variabilidad estadística de modo que $N(T)$ es una realización de un proceso aleatorio. Crow afirmó que la manera de incluir esta faceta probabilística consiste en tratar el proceso de fallos como un proceso no homogéneo de Poisson. El resultado es que el modelo de ley de potencia se aplica al valor esperado de $N(T)$:

$$E[N(T)] = \delta T^n$$

pero todos los demás aspectos de la definición son los mismos. Consecuentemente, ambos modelos dan los mismos patrones de crecimiento. La diferencia es que el modelo basado en la probabilidad de Crow está sujeto al análisis estadístico. Como consecuencia, el modelo de Crow y su análisis estadístico se incluyen en un estándar militar de los Estados Unidos y son muy utilizados.

6. PREDICCIÓN DE FIABILIDAD

6.1 Introducción.

La necesidad de evaluar la fiabilidad de sistemas durante el proceso de diseño, y por tanto antes de que se fije la estructura específica del sistema, motivó la evolución de las estrategias de la predicción de fiabilidad. Ésta es el proceso de calcular medidas aproximadas aunque verosímiles de fiabilidad de los equipos antes de que el diseño de los mismos se haya definido completamente, y por supuesto antes de que se fabriquen. Tres de los objetivos primarios del proceso son:

- (1) permitir la comparación de diseños alternativos,
- (2) servir de guía para la definición de la configuración de componentes, y
- (3) verificar la viabilidad de lograr los niveles requeridos de fiabilidad.

Gran parte del ímpetu para el desarrollo de métodos de predicción de la fiabilidad se originó en las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos y, en un grado menor, con las organizaciones del programa espacial. En ambos casos, la intención fue el prestar la atención adecuada a la fiabilidad por parte de los suministradores de equipos, durante el diseño de equipos eléctricos y electrónicos. La dependencia creciente de las Fuerzas Armadas de componentes electrónicos complejos fue reconocida en los años 50, y condujo a la formación del grupo consultor sobre fiabilidad de equipos electrónicos (Advisory Group of Reliability of Electronic Equipment, AGREE) por el Departamento de Defensa en 1957. Este grupo inició el desarrollo de métodos formales de predicción de fiabilidad que en la actualidad están codificados en el Manual 217 de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (MIL-HDBK-217), y en un número creciente de guías análogas que están siendo desarrolladas en otros países. El interés resultante en el uso de métodos de predicción ha motivado el desarrollo actual de un estándar militar para la predicción de la fiabilidad de sistemas mecánicos.

El proceso de predicción de la fiabilidad y su herramienta primordial, MIL-HDBK-217 (68), han sido sujetos a una controversia considerable. Hay muchos que objetan a la idea de que medidas de fiabilidad aparentemente precisas pero no verificables se definan para equipos que todavía no existen. Otros objetan las cifras específicas de fiabilidad que aparecen en el MIL-HDBK-217, y a los modelos de fiabilidad descritos. Sin tomar posición en este debate, que a veces es acalorado, parece indicado que describamos aquí el proceso de predicción y el MIL-HDBK-217.

6.2 Formulación general

La predicción de fiabilidad comienza con la hipótesis de que la fiabilidad de los componentes determina la fiabilidad del sistema. También se supone que la fiabilidad de los componentes depende del entorno de operación. Por último, se supone que como consecuencia de la manipulación correcta de los componentes, estos muestran un comportamiento constante de riesgo. Para componentes electrónicos, MIL-HDBK-217 define dos métodos diferenciados de predicción. Estos se designan método de «análisis de solicitaciones de partes», y método de «recuento de partes». Ambos métodos empiezan con un modelo elemental y una función de riesgo básica (tasa de fallos). Ambos aplican luego manipulaciones estándar a los modelos básicos. La diferencia entre los dos métodos se basa en el nivel disponible de información. El método de solicitaciones de partes es bastante detallado y tiene como objetivo su utilización en diseños relativamente maduros, en los que se dispone de una información específica considerable relativa a la elección de los componentes. El método de recuento de partes es más primitivo, y tiene como objetivo su utilización en conceptos iniciales de diseño para los que sólo se han identificado clases generales de componentes.

6.3 Método de solicitaciones de partes

Este método se utiliza en diseños relativamente maduros para los que puede especificarse selecciones específicas de componentes y configuraciones probables de los mismos.

RELACIÓN DE POTENCIA DE OPERACIÓN A POTENCIA NOMINAL

T(°C)	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
0	0,00061	0,00074	0,00091	0,0011	0,0014
10	0,00067	0,00082	0,0010	0,0012	0,0015
20	0,00073	0,00091	0,0011	0,0014	0,0017
30	0,00080	0,0010	0,0013	0,0016	0,0019
40	0,00088	0,0011	0,0014	0,0017	0,0022
50	0,00096	0,0012	0,0015	0,0020	0,0025
60	0,0011	0,0013	0,0017	0,0022	0,0028
70	0,0012	0,0015	0,0019	0,0025	0,0032
80	0,0013	0,0016	0,0021	0,0028	0,0036
90	0,0014	0,0018	0,0024	0,0031	0,0040
100	0,0015	0,0020	0,0026	0,0035	0,0045
110	0,0017	0,0022	0,0029	0,0039	0,0051
120	0,0018	0,0024	0,0033	0,0043	0,0058
130	0,0020	0,0027	0,0036	0,0049	0,0065
140	0,0022	0,0030	0,0040	0,0054	
150	0,0024	0,0033	0,0045		
160	0,0026	0,0036			
170	0,0029				

Tabla1 Tasas básicas de fallo, λ_b (fallos/ 10^6 h) para resistencias fijas de película Mil-10509 y MIL-55182

El punto de partida del análisis es la selección de la tasa básica de fallos, λ_b , a partir de los valores tabulados en la base de datos. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de tabulación de la tasa de fallos copiada del manual.

Los datos de la tabla son los valores de λ_b expresados como número de fallos por cada 10^6 horas de operación. Nótese que los datos están indexados por la temperatura de operación, y también por la relación entre la potencia de operación y la potencia nominal.

Los ajustes de la aplicación reflejan el hecho de que se supone que la fiabilidad depende directamente de la temperatura de operación y de las características eléctricas del uso de los componentes. Lo mismo que con la temperatura se ha observado que, cuando un componente se utiliza a un voltaje (o potencia) mayores, la fiabilidad disminuye. Por consiguiente, la tasa de fallos puede ser reducida «disminuyendo el valor nominal», el cual es la operación de un componente a un valor nominal inferior al del diseño. Las tasas básicas de fallo reflejan estas hipótesis.

El método de predicción de solicitaciones de partes en condiciones extremas se basa en el cálculo de una tasa de fallos de uso, λ_u , obtenida a partir de la tasa básica de fallo y varios factores de ajuste, π , utilizando un modelo como el siguiente:

$$\lambda_u = \lambda_b \left(\prod_i \pi_i \right)$$

El modelo específico cambia de acuerdo con el tipo particular de componente.

Por ejemplo, el modelo para las resistencias es:

$$\lambda_u = \lambda_b (\pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_R)$$

en donde π_r es un factor de resistencia, π_e es un factor de entorno, y π_q es un factor de calidad. Nótese que π_e y π_q se incluyen en casi todos los modelos de componentes, mientras que π_r son específicos para

el tipo de componentes, de forma que su uso también está definido en el manual. Un ejemplo de enumeración de los factores de ajuste específico para tipos de componentes se muestra en la Tabla 2, la cual ha sido también obtenida del manual.

Los factores π_E y π_Q se incluyen en casi todos los modelos de componentes. El uso de los factores π_Q se basa en la codificación de niveles de calidad estándar para varios tipos de componentes. En particular, varios tipos de componentes han sido evaluados con relación a una «especificación militar», y por consiguiente se designan de acuerdo con «una especificación de calidad de multinivel», y se considera que tienen designaciones de «fiabilidad establecida» (Established Reliability, ER). Un ejemplo de la codificación de las designaciones ER y de los factores asociados de calidad se dan en las Tablas 3 y 4. Dentro de las especificaciones de calidad, se enumeran criterios detallados de clasificación de componentes. Las partes no incluidas en la especificación de calidad multinivel se designan como partes que no son ER, y se clasifican en uno de tres niveles –superior, especificación militar, e inferior– cada uno de los cuales tiene un factor correspondiente π_Q .

El factor de entorno tiene como objetivo reflejar las influencias de las características del entorno de operación (distintas de las eléctricas y térmicas) sobre la fiabilidad de los componentes. Los factores de ajuste se definen en términos generales como se muestra a continuación en la Tabla 5. Nótese que los factores de ajuste de entorno, π_E , están específicamente tabulados para cada tipo de componente según la categoría del entorno.

Como ejemplo, la Tabla 6 muestra los factores para resistencias. Obsérvese la dispersión de los valores de los factores en función de la hostilidad anticipada del entorno de los equipos.

FACTOR π	DESCRIPCIÓN
resistencias	
π_R	resistencia – basada en intervalo de resistencia
π_T	temperatura – ajuste por temperatura de la caja
π_V	voltaje – ajuste por pérdida de potencia
π_{NR}	número de resistencias – refleja el número de resistencias en uso
π_{TAPS}	factor de conexión – tiene en cuenta el efecto de las conexiones del potenciómetro
transistores de baja frecuencia	
π_S	factor de demanda de voltaje – ajuste por el voltaje aplicado del colector
π_A	factor de ampliación – basado en la potencia de salida
microcircuitos – memorias magnéticas	
π_W	factor de escritura del ciclo de operación – basado en la relación entre la carga de lectura y escritura
π_T	temperatura – ajuste por los efectos de la temperatura de la conexión
microcircuitos – VHSIC y VLSI CMOS	
π_{CD}	factor de corrección por la complejidad del molde – refleja la dificultad de fabricación
π_T	factor de temperatura – ajuste por los efectos de la temperatura de la conexión
π_{PT}	factor del tipo de empaquetamiento – corrección por los efectos del empaquetamiento

Tabla 2 Factores π para el análisis de demandas sobre partes

PARTE	DESIGNADORES DE CALIDAD
Microcircuitos	S, B, B-1, Otros
Semiconductores discretos	JANTXV, JANTX, JAN
Condensadores (ER)	D, C, S, R, B, P, M, L
Resistencias (ER)	S, R, P, M
Bobinas, moldeadas (ER)	S, R, P, M
Relés (ER)	R, P, M, L

Tabla 3 Designaciones de nivel de calidad multinivel

DESIGNADOR DE CALIDAD	π_Q
B	1,0
B-1	2,0
JANTXV	0,7
JANTX	1,0
JAN	2,4
S	0,03
R	0,1
P	0,3
M	1,0
L	1,5

Tabla 4 Factores de calidad π_Q

ENTORNO	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
Terreno, benigno	G _B	Inmóvil, entornos con temperatura y humedad controlados, fácilmente accesibles al mantenimiento
Terreno, fijo	G _F	Entornos moderadamente controlados como la instalación en estantes permanentes, con aire de refrigeración adecuado y posible instalación en edificios sin calefacción
Terreno, móvil	G _M	Equipos instalados en vehículos con ruedas o cadenas y equipos transportados manualmente
Naval, protegido	N _S	Incluye condiciones protegidas o bajo cubierta en buques y equipos instalados en submarinos
Naval, no protegido	N _U	Equipos no protegidos en buques, expuestos a las condiciones climáticas y equipos inmersos en agua salada
Aviones, áreas no habitadas, compartimiento de carga	A _{IC}	Condiciones típicas en compartimientos de carga que pueden ser ocupados por la tripulación. Las condiciones extremas de presión, temperatura, shock y vibración son mínimas
Aviones, habitáculos, Cazas	A _{IF}	Igual a A... pero instalados en aviones de altas prestaciones como cazas
Aviones, áreas no habitadas	A _{UC}	Áreas con ambientes no controlados que no pueden ser habitadas por la tripulación durante el vuelo. Las condiciones extremas de presión, temperatura y shock pueden ser severas
Aviones, áreas no habitadas, Cazas	A _{UF}	Igual a A... pero instalados en aviones de altas prestaciones como cazas
Helicópteros	A _{RW}	Equipos instalados en helicópteros, incluye equipos montados en el exterior e interior
Vuelo espacial	S _F	Órbita terrestre, próxima a condiciones de terreno benignas, vehículo ni en vuelo propulsado ni en la fase libre no propulsado
Vuelo de misiles	M _F	Condiciones relacionadas con el vuelo propulsado de misiles en la atmósfera, y con el vuelo libre no propulsado
Lanzamiento de misiles	M _L	Condiciones extremas relativas al lanzamiento de misiles, puesta en órbita del vehículo espacial y retorno del vehículo a la atmósfera
Lanzamiento desde cañones	C _L	Condiciones extremas relacionadas con el lanzamiento de proyectiles dirigidos desde cañones

Tabla 5 Símbolos de factores ambientales

ENTORNO	π_{E}
G _B	1,0
G _F	2,0
G _M	8,0
N _S	4,0
N _U	14,0
A _{IC}	4,0
A _{IF}	8,0
A _{UC}	10,0
A _{UF}	18,0
A _{RW}	19,0
S _F	0,2
M _F	10,0
M _L	28,0
C _L	510,0

Tabla 6 Factores de entorno π_{E}

6.4 Método de recuento de partes

A veces se considera que vale la pena calcular una medida inicial de la fiabilidad del sistema, incluso antes de que se hayan elegido específicamente sus componentes. El método es esencialmente igual para este caso, excepto que se asume y que se utiliza una menor información. El modelo elemental de tasa de fallos es:

$$\lambda_u = n \lambda_G \pi_Q$$

en donde n es el número de copias del componente que se espera usar en el equipo, λ_G es una tasa de fallos genérica (básica), y π_Q es un factor de ajuste para el nivel de la calidad de los componentes. Nótese que las tasas genéricas de fallos se tabulan de acuerdo con el tipo de aplicación. Esto se ilustra con el listado de ejemplo mostrado en las Tablas 7a para condensadores y 7b para resistencias. Los factores de ajuste de calidad son los mismos que los utilizados en el método de solicitudes de partes, excepto que las partes que no son ER se supone que tienen un $\pi_Q=1,0$.

TIPO DE PARTE	ESTILO	G _B	G _F	G _M	N _S	N _U	A _{IC}	A _{IF}	A _{UC}	A _{UF}	A _{RW}	S _F	M _F	M _L	C _L
		T=30	40	45	40	45	55	55	70	70	55	30	45	50	40
Papel, by-pass	CP	0,0036	0,0072	0,033	0,018	0,055	0,023	0,03	0,07	0,13	0,083	0,0018	0,044	0,12	2,1
	CA	0,0038	0,0087	0,042	0,022	0,070	0,035	0,047	0,19	0,35	0,13	0,002	0,056	0,19	2,5
Papel/plástico	CZR	0,0047	0,0096	0,044	0,034	0,073	0,030	0,040	0,094	0,15	0,11	0,0024	0,058	0,16	2,7
	CPV	0,0021	0,0042	0,017	0,010	0,030	0,0088	0,013	0,026	0,048	0,044	0,0010	0,023	0,063	1,1
	COR	0,0021	0,0042	0,017	0,010	0,030	0,0088	0,013	0,026	0,048	0,044	0,0010	0,023	0,063	1,1
Mica (bañada)	CM	0,0005	0,0015	0,0091	0,0044	0,014	0,0068	0,0095	0,054	0,069	0,031	0,00025	0,012	0,046	0,45
Mica (botón)	CB	0,018	0,037	0,19	0,094	0,31	0,10	0,14	0,47	0,60	0,48	0,0091	0,25	0,68	11,0
Materiales cerámicos (uso general)	CK	0,0036	0,0074	0,034	0,019	0,056	0,015	0,015	0,032	0,048	0,077	0,0014	0,049	0,13	2,3
Materiales cerámicos (chip)	CDR	0,00078	0,0022	0,013	0,0056	0,023	0,0077	0,015	0,053	0,12	0,046	0,00039	0,017	0,065	0,68
Tántalo (sólido)	CSR	0,0018	0,0039	0,016	0,0097	0,028	0,0091	0,011	0,034	0,057	0,055	0,00072	0,022	0,66	1,0
Tántalo (no sólido)	CLR	0,0061	0,013	0,069	0,039	0,11	0,031	0,061	0,13	0,28	0,16	0,0030	0,089	0,26	4,0
Óxido de Aluminio	CUR	0,024	0,061	0,42	0,18	0,59	0,46	0,55	2,1	2,6	1,2	0,012	0,49	1,7	21,0
Aluminio (seco)	CR	0,029	0,081	0,58	0,24	0,83	0,73	0,88	4,3	5,4	2,0	0,015	0,68	2,8	28,0

Tabla 7a Ejemplo de tasas genéricas de fallo para condensadores para el método de recuento de partes

TIPO DE PARTE	ESTILO	G _B	G _F	G _M	N _S	N _U	A _{IC}	A _{IF}	A _{UC}	A _{UF}	A _{RW}	S _F	M _F	M _L	C _L
		T=30	40	45	40	45	55	55	70	70	55	30	45	50	40
Composición	RCR	0,00050	0,0022	0,0071	0,0037	0,012	0,0052	0,0065	0,016	0,025	0,025	0,00025	0,0098	0,035	0,36
Película, aislada	RLR	0,0012	0,0027	0,011	0,0054	0,020	0,0063	0,013	0,018	0,033	0,030	0,00025	0,014	0,044	0,69
Película, potencia	RD	0,012	0,025	0,13	0,062	0,21	0,078	0,10	0,19	0,24	0,32	0,0060	0,18	0,47	8,2
Embobinado	RBR	0,0085	0,0182	0,10	0,045	0,16	0,15	0,17	0,30	0,38	0,26	0,0068	0,13	0,37	5,4
Embobinado, potencia	RWR	0,014	0,031	0,16	0,077	0,26	0,073	0,15	0,19	0,39	0,42	0,0042	0,21	0,62	9,4
Termistor	RTH	0,065	0,32	1,4	0,71	1,6	0,71	1,9	1,0	2,7	2,4	0,032	1,3	3,4	62,0

Tabla 7b Tasas genéricas de fallo para resistencias para el método de recuento de partes.

7. MANTENIMIENTO Y FIABILIDAD

7.1 Introducción.

La mayor parte de los equipos modernos se diseñan bajo la hipótesis de que serán mantenidos de algún modo. Generalmente se espera que los equipos complejos operen durante períodos largos de tiempo, de forma que las operaciones de servicio se supone que forman parte de la experiencia de funcionamiento del dispositivo.

Esencialmente hay dos tipos de mantenimiento: preventivo y correctivo, y para cada uno de éstos hay numerosos procedimientos específicos. En el mantenimiento preventivo, el objetivo es incurrir en gastos modestos de servicio del equipo, con el fin de evitar fallos potencialmente caros durante su funcionamiento. Normalmente, el equipo deja de funcionar durante el mantenimiento preventivo, y el efecto físico de las actividades de mantenimiento es paliar los efectos del funcionamiento previo. En contraste, el mantenimiento correctivo (o reparación) es la respuesta al fallo del equipo con el fin de devolverlo a un estado de funcionamiento. Para ambas clases de mantenimiento, puede asumirse que existen varios tipos de estructuras de coste y varios tipos de patrones de comportamiento de los equipos. Por consiguiente, hay bastantes casos de modelos distintos.

Es importante notar que el modelado y análisis de los procedimientos de mantenimiento de equipos requieren a menudo considerar el sistema completo en vez de sus componentes individuales.

Otro punto importante es que interrumpir el funcionamiento de una muestra de equipos para un mantenimiento ocasional implica ajustes a las leyes de probabilidad que gobiernan su comportamiento. Por consiguiente, los modelos usados para representar el comportamiento de los equipos deben estar basados en procesos regenerativos en vez de distribuciones de vida sencillas. Excepto para unos pocos casos en que se utilizan procedimientos complicados de mantenimiento, el subconjunto de procesos regenerativos denominado procesos de renovación pueden ser utilizados pero incluso estos modelos pueden ser bastante complicados.

7.2 Procesos de renovación y sustitución de dispositivos.

Un dispositivo se utiliza hasta que falla, en cuyo momento es inmediatamente sustituido por un dispositivo idéntico nuevo que también se utiliza hasta su fallo. Si este proceso se repite sin fin, la secuencia de los tiempos de funcionamiento de los dispositivos constituye un proceso de renovación.

Definición. Un proceso de renovación es una secuencia de variables aleatorias no negativas independientes e idénticamente distribuidas, por ejemplo T_1, T_2, \dots

La aplicación de este modelo a componentes individuales de sistemas no tiene dificultad.

Otras cuestiones también son pertinentes tanto por lo que respecta al estudio general de los procesos de renovación como a la fiabilidad. Cinco cuestiones de interés son: el número esperado de renovaciones, la identidad de la densidad de renovaciones, los momentos superiores de la distribución de renovaciones, la distribución de los tiempos de recurrencia hacia atrás, y la distribución de los tiempos de recurrencia hacia delante.

Consideremos algunas aplicaciones específicas a la fiabilidad de equipos. Comencemos con las definiciones:

Definición. Una distribución de vida $F(t)$ se dice que es Nueva Mejor que Usada (New Better than Used, NBU) si:

$$\bar{F}(x+y) \leq \bar{F}(x)\bar{F}(y)$$

y Nueva Peor que Usada (New Worse than Used, NWU) si:

$$\bar{F}(x+y) \geq \bar{F}(x)\bar{F}(y)$$

Se tiene que observar, que estas condiciones implican que la probabilidad condicional de supervivencia de un dispositivo de edad x es o menor que (para NBU) o mayor que (para NWU) la probabilidad correspondiente de supervivencia para un dispositivo nuevo. Es decir:

$$\bar{F}(y|x) = \frac{\bar{F}(x+y)}{\bar{F}(x)} \leq \bar{F}(y)$$

para NBU, de forma que una copia nueva del dispositivo tiene una mayor fiabilidad que otra usada. Una clasificación adicional más débil pero a menudo útil es:

Definición. Una distribución de vida $F(t)$ se llama Nueva Mejor que Usada en Esperanza (New Better than Used in Expectation, NBUE) si:

$$\int_t^{\infty} \bar{F}(x) dx \leq \mu \bar{F}(t)$$

y se llama Nueva Peor que Usada en Esperanza (New Worse than Used in Expectation, NWUE) si:

$$\int_t^{\infty} \bar{F}(x) dx \geq \mu \bar{F}(t)$$

Esta definición también es consistente con la intuición puesto que las condiciones se reducen a:

$$\frac{1}{\bar{F}(t)} \int_t^{\infty} \bar{F}(x) dx \leq \mu$$

para NBUE, lo cual significa que la media de la distribución de vida residual condicionada a sobrevivir hasta el tiempo t es menor que la vida media para una copia nueva de un dispositivo. Otra observación relativa a las definiciones anteriores es que resultan en una clasificación anidada de distribuciones de vida.

Luego, los resultados para procesos de renovación aplicables a la fiabilidad de los equipos se definen normalmente en función del comportamiento de riesgo de las distribuciones de vida.

También es posible definir límites de la probabilidad de un funcionamiento continuado de un dispositivo que funciona en el presente. Para hacer esto comencemos con:

Definición. En un proceso de renovación, la edad de un dispositivo en cualquier instante y es una variable aleatoria $\alpha(y)$, y la distribución de la vida remanente de dispositivos de edad α de una muestra común se llama distribución de vida residual. La vida residual se denota por $\gamma(\alpha)$ y la distribución de vida residual está dada por:

$$\mathfrak{S}_{\alpha}(\gamma) = F(\gamma + \alpha | \alpha) = 1 - \frac{\bar{F}(\gamma + \alpha)}{\bar{F}(\alpha)}$$

En el caso de un uso único de copias de un dispositivo, la distribución de vida residual de la definición anterior es bastante sencilla de determinar y de analizar. Por otra parte, para un proceso de renovación, la edad de un dispositivo en cualquier instante de tiempo es una variable aleatoria.

Al concluir la descripción de los modelos de comportamiento de dispositivos en procesos sencillos de renovación, es oportuno observar que los sistemas cuyos componentes son todos NBU serán también NBU; pero esta afirmación no se aplica a NBUE, NWU o NWUE. Además, la convolución de distribuciones NBU es también NBU, lo mismo que la convolución de NBUE; pero esto no es verdad para distribuciones NWU o NWUE.

7.3 Mantenimiento preventivo.

En algunos casos, vale la pena sustituir un dispositivo que funciona antes de que falle. En general, el motivo por el que se sustituye un dispositivo que funciona es que el coste de hacerlo es pequeño en comparación con el coste de responder a un fallo que ocurra durante el funcionamiento del dispositivo, un fallo en el campo. Históricamente, se han definido dos tipos de políticas de mantenimiento preventivo. Se designan como «sustitución por edad» y «sustitución en bloque». Ambas pueden ser analizadas utilizando los conceptos de procesos de renovación desarrollados anteriormente. Más recientemente, se ha hecho la distinción entre una «reparación mínima», en la que un dispositivo que ha fallado se pone de nuevo en funcionamiento sin que ello modifique el riesgo, y una reparación completa que resulta en una función de riesgo correspondiente a un nuevo dispositivo.

Una política de sustitución por edad implica el cambio de un dispositivo por otro nuevo, siempre que el dispositivo falla o alcanza la edad preestablecida. Con la sustitución en bloque, el dispositivo en funcionamiento se sustituye en tiempos espaciados uniformemente independientemente de su edad en dichos instantes de tiempo. Los valores óptimos de los tiempos de la política pueden ser determinados analizando los modelos apropiados de costes.

Una implicación importante de este resultado y de los enumerados a continuación es que, para dispositivos NBU, el mantenimiento preventivo reduce estocásticamente el número de fallos que ocurren en cualquier intervalo. Por esta razón, el mantenimiento preventivo se usa más comúnmente con dispositivos que tienen distribuciones de vida que son elementos de la clase de distribuciones NBU.

La distinción entre fallos y sustituciones es que las sustituciones incluyen tanto a los dispositivos cambiados debido a fallos como a los reemplazados preventivamente antes del fallo.

La motivación para utilizar un programa de mantenimiento preventivo es que al hacer sustituciones planificadas (reparaciones), la frecuencia de fallos de campo no planificados será reducida y presumiblemente esto significará un ahorro de costes.

Tiene el atractivo intuitivo de que la longitud del intervalo de sustitución depende directamente de la relación de costes de reparación.

La solución analítica de este tipo de mantenimiento confirma la intuición de que el mantenimiento preventivo sólo es útil cuando los nuevos dispositivos proporcionan una ventaja clara sobre el uso continuado de los existentes.

7.4 Disponibilidad.

Si se extienden los análisis anteriores de forma que incorporen el proceso de mantenimiento, esto conduce a la definición de una nueva medida de rendimiento, es decir, la disponibilidad. En concreto hay cuatro medidas de disponibilidad usadas comúnmente, todas las cuales están relacionadas entre sí. Estas se definen del modo siguiente:

Definición. La disponibilidad (puntual) $A(t)$ de un dispositivo es la probabilidad de que esté funcionando en cualquier tiempo, t . Es decir:

$$A(t) = P[x(t) = 1] = E[x(t)]$$

Definición 8.7. La disponibilidad límite A de un dispositivo es el límite de $A(t)$. Es decir:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$$

Definición. La disponibilidad media A_{av} en un intervalo $[0, t]$ de un dispositivo es:

$$A_{av}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A(t) dt$$

Definición. La disponibilidad media límite A_{∞} de un dispositivo es el límite de la disponibilidad media:

$$A_{\infty} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} A_{av}(\tau) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A(t) dt$$

Obsérvese que de acuerdo con estas definiciones la disponibilidad se transforma en fiabilidad cuando no es posible la reparación.

Cuando entramos en un nivel superior al de las definiciones elementales y de los comentarios anteriores, el análisis de la disponibilidad puede hacerse bastante complejo. Este análisis se realiza normalmente con relación a una afirmación definida muy cuidadosamente sobre las condiciones de funcionamiento supuestas. Esto se debe a que pequeñas diferencias en el plan de operación pueden tener un efecto muy pronunciado sobre la identidad del modelo apropiado y su solución.

Los modelos elementales de mantenimiento y reparación son generales, y sirven para ilustrar los métodos utilizados para evaluar los planes de mantenimiento. No obstante, los resultados obtenidos se refieren solamente a dispositivos aislados y no a sistemas. Mientras que existen algunos casos en que un sistema puede ser tratado como una entidad única, normalmente es más apropiado estudiar los efectos sobre el rendimiento del sistema del mantenimiento a nivel de componentes. Puesto que los sistemas se gestionan de muchas formas diferentes, el análisis de la disponibilidad del sistema debe ser realizado en el contexto de un supuesto modo de operación específico. Hay varios entornos de operación razonablemente representativos que pueden ser considerados.

8. FIABILIDAD HUMANA Y DEL SOFTWARE

8.1 Introducción

Los estudios de fiabilidad han estado tradicionalmente orientados al hardware. La mayor parte de los métodos y modelos desarrollados en esta disciplina se refieren básicamente a los elementos hardware de los sistemas. Sin embargo, en los sistemas y equipos modernos el software desempeña un papel cada vez más importante y más un, el elemento humano es esencial, tanto en la utilización como en el mantenimiento. Ello significa que en los estudios de fiabilidad no debe olvidarse que los equipos y sistemas constan de tres tipos de elementos, que además se interaccionan entre sí. Estos son el elemento humano, el hardware y el software. La consideración aislada de hardware llevará a predicciones optimistas de fiabilidad, al despreciarse la presencia e influencia de los otros dos elementos. La dificultad estriba en que las definiciones y métricas establecidas para el estudio de la fiabilidad del hardware no son directamente aplicables al software y al elemento humano. En los párrafos siguientes se comenta las principales diferencias existentes en la aplicación del concepto de fiabilidad a los tres tipos mencionados de elementos. Pero antes recordemos la definición de fiabilidad (del hardware) como probabilidad de funcionamiento satisfactorio, en un entorno determinado y durante un cierto tiempo.

8.2 Fiabilidad humana.

El comportamiento de los operadores y mantenedores de los equipos y sistemas depende de muchos factores, tales como experiencia, motivación, entrenamiento, presión psicológica, etc. Estos factores no son ciertamente, el resultado de un proceso de diseño; además, todos ellos cambian con el tiempo y no necesariamente de una forma controlable o predecible. Un número no despreciable de los fallos experimentados por los sistemas son inducidos por los propios usuarios o mantenedores. Por ello, al analizar la fiabilidad de un sistema debe considerarse también la de su componente humano.

La fiabilidad del elemento humano puede definirse como la probabilidad de que su respuesta o actuación sea la correcta, en cada instante o situación. El estudio y tratamiento de la fiabilidad humana no puede realizarse de la misma manera que la fiabilidad del hardware. Es necesario un conjunto de métricas y métodos específicos, que incluyan las características específicas del hombre diferencia de la de los elementos hardware de un sistema. Estas métricas y métodos no están desarrolladas como las correspondientes al hardware; sin embargo; las interacciones hombre-máquina y la confianza en la respuesta humana son estudiadas y consideradas cada vez en el desarrollo de nuevos sistemas. Los modos de fallos humanos deben incluirse en los estudios de fiabilidad, especialmente en los análisis de modos de fallos y sus efectos, y en los análisis de árboles de fallos.

Según se ha comentado el comportamiento humano no es fácilmente predecible; sin embargo, si puede influirse positivamente en él. La formación, la motivación, la satisfacción en general con el entorno de trabajo, la adecuación de las responsabilidades asignadas a las capacidades y cualidades que se tengan, una buena definición del trabajo a desarrollar, etc, son algunos de los factores que influyen directamente en la manera en que desempeñamos nuestro trabajo. Es por ello que una adecuada actitud preventiva puede rendir magníficos resultados. Cuanto más se cuiden los aspectos indicados, mas fácil será que los fallos que sufra el sistema no tengan su origen en los usuarios. En la figura siguiente se muestra la incidencia de esos aspectos en la fiabilidad del ser humano.

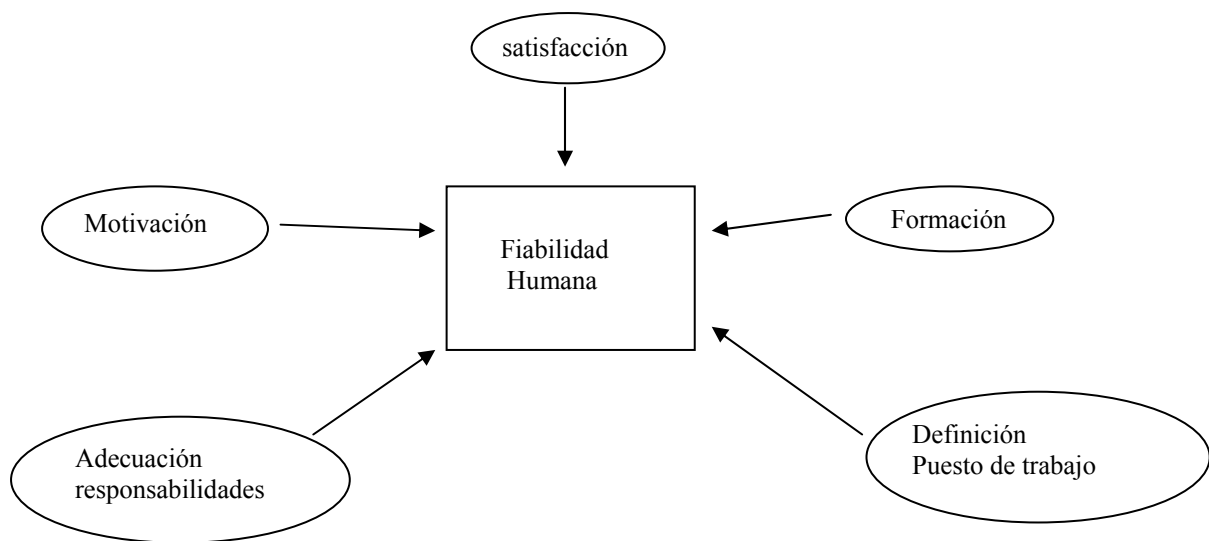


Figura: Incidencia de diversos aspectos en fiabilidad humana

8.3 Fiabilidad del software

El software es un elemento más de muchos sistemas modernos, y desempeña un papel importante en su utilización y mantenimiento. También el software puede ser responsable directo de fallos del sistema, y el tratamiento y estudio de la fiabilidad del software requiere igualmente de métricas y métodos específicos. A diferencia del hardware, el software no se deteriora con el tiempo, y un fallo descubierto y corregido no vuelve a producirse. Los elementos o componentes mecánicos, eléctricos, hidráulicos, etc. de un sistema se deterioran con el uso y el tiempo, pero no ocurre igual con el software; si una rutina funciona correctamente, lo seguirá haciendo mientras no se modifique. De hecho, así como el mantenimiento preventivo está orientado a evitar la aparición de fallos en el hardware, no existe un concepto análogo de “mantenimiento preventivo” del software. El software sólo es mantenido cuando se detecta algún fallo (mantenimiento correctivo), cuando se desea mejorar una rutina existente (mantenimiento modificativo); en cualquier caso, el mantenimiento del software es siempre una fuente potencial importante de introducción de fallos.

A pesar de que no existe una definición universalmente aceptada de fiabilidad de software, es frecuente ver definida la fiabilidad del software como la probabilidad de que su funcionamiento sea el esperado. El elemento tiempo y el elemento entorno no forman parte de la definición, a diferencia de la empleada para las fiabilidades del hardware y del elemento humano.

Al no depender del tiempo la fiabilidad del software, sino de su uso, no es posible realizar pruebas aceleradas del estilo de las realizadas para el hardware. La única alternativa es probar todas las posibilidades o alternativas que permita una determinada aplicación del software. La complejidad de la mayoría de las aplicaciones hace virtualmente imposible probar todas las posibilidades, por lo que siempre hay un riesgo o probabilidad de ocurrencia de un fallo (fallos que existen debido al diseño o a la codificación, pero que no han sido detectados y corregidos por no haber sido exhaustivas las pruebas).

La naturaleza impredecible de la aparición de fallos del software, no basada en el tiempo ni en su deterioro, sino en la ejecución de las rutinas que contiene “fallos latentes”, hace que la tasa de fallos del software presente un aspecto errático. En la tabla 1 se comparan las características de fiabilidad del hardware y del software.

CONCEPTO	HARDWARE	SOFTWARE
Dependencia del tiempo	La fiabilidad del hardware es función del tiempo	La fiabilidad del software no depende del tiempo
Entorno	El entorno(temperatura, vibraciones, humedad...) influye en la fiabilidad del hardware	El entorno no influye en la fiabilidad del software.
Predicciones de fiabilidad	La fiabilidad del hardware puede predecirse de forma teórica, en base al conocimiento del diseño y la utilización prevista del sistema.	Los fallos del software no pueden predecirse, ya que éstos se deben a fallos de diseño y no al deterioro de los componentes.
Predecibilidad de fallos	Los fallos de hardware ocurren, en cierta medida, de forma predecible a partir del conocimiento de las solicitaciones a que someterá al sistema	Los fallos del software no son predecibles.
Componentes	Son el nivel más bajo en la descomposición funcional del sistema.	No existe el concepto de “componente” en el software, aunque podrían considerarse como tales las rutinas de más bajo nivel.
Depuración	Es el proceso de detectar y corregir problemas del diseño y/o fabricación.	Es el proceso de detectar y corregir problemas del diseño y/o codificación.
Tasa de fallos	Tasa a la que ocurren los fallos en un determinado periodo de tiempo.	Tasa a la que ocurren los fallos durante las pruebas del sistema.
Mantenibilidad	Medida de la facilidad con la que un sistema o componente es mantenido en, o devuelto a, su condición operativa.	Medida de facilidad con la que una aplicación software es modificada, o corregida cuando se detectan fallos.

Tabla 1: Fiabilidad del hardware vs. Fiabilidad del software

Los errores en el software pueden surgir de defectos en la especificación de requisitos, en el diseño o en la codificación (o programación). Un error en cualquiera de esas tres fases inevitablemente se pasará a las siguientes, manifestándose finalmente como un error en el código. Siempre que hay varias acciones encadenadas, un error en una se transmite irremediamente a las que le siguen, afectando al producto final. Por ello es esencial que en los desarrollos del software asegurar la coherencia de los requisitos especificados antes de iniciar el diseño, y posteriormente hacer lo propio con el diseño antes acometer la fase de programación. Esta práctica de hacer las cosas bien desde el principio es especialmente relevante en este campo y es la manera más sencilla y económica de disponer al final del producto software requerido por el usuario, libre de errores. La documentación debe de ser esencialmente cuidada, de forma que cuando se manifiesten errores resulte más sencillo identificarlos hasta su causa y corregirlos. Una documentación deficiente puede convertirse en el peor fallo de un producto software.

Si en ámbito del hardware era posible aumentar la fiabilidad de un sistema mediante la disposición de elementos de redundancia, activa o pasiva, también en el campo del software puede hacerse algo similar. La diferencia fundamental radica en que como elementos redundantes no deben emplearse elementos idénticos ya que por su naturaleza, si en una rutina de software existe un fallo latente, ese fallo se manifestará siempre que esa rutina sea ejecutada. Lo que debe hacerse es redundar una rutina con otra que haga lo mismo (es decir, que sea funcionalmente equivalente), pero que lo haga de otra manera. El problema es decidir cuál es la que funciona correctamente y cuál ha fallado cuando no generan resultados idénticos. Por ello se recurre a sistemas en los que existen tres rutinas diferentes en paralelo. Al ser un número impar, cuando una de las rutinas genera un resultado distinto al de las otras dos, el sistema sabe que esa rutina es la que no funciona correctamente, siendo entonces descartada. Ese primer fallo en una rutina no incide en la operatividad del sistema, por lo que se dice que dicho sistema (o su arquitectura) es tolerante al fallo. A partir de ese momento seguirá funcionando con las dos rutinas restantes hasta que sus resultados no coincidan, momento en el que el sistema fallará por ser incapaz de determinar cuál de las dos rutinas es la correcta.

En conclusión los sistemas están integrados por elementos hardware y software, y por el propio ser humano. Ello implica, bajo la perspectiva del enfoque sistémico, la necesidad de considerar esos tres tipos de elementos y las realizaciones entre ellos a la hora de estudiar la fiabilidad de los sistemas. Las enormes diferencias entre esos tres tipos de elementos hace necesario contar con diferentes modelos para analizar sus características de fiabilidad. La tabla 2 resume los principales elementos de las definiciones de fiabilidad de los diferentes elementos de los sistemas, y la Tabla 3 muestra la evolución con el tiempo de sus fiabilidades.

Fiabilidad hardware	Fiabilidad software	Fiabilidad humana
Probabilidad	Probabilidad	Probabilidad
Funcionamiento satisfactorio	Funcionamiento satisfactorio	Funcionamiento satisfactorio
Tiempo		Tiempo
Entorno (físico)		Entorno (físico, sensorial, fisiológico, psicológico)

Tabla 2 Principales elementos de la definiciones de fiabilidad

Elementos del sistema	Fiabilidad
Hardware	Decrece con el tiempo
Software	Permanece constante
Ser humano	Cambia continuamente (a veces aumenta, a veces disminuye no siempre de forma apreciable)

Tabla 3 Evolución de la fiabilidad con el tiempo (sin considerar el efecto de mantenimiento)

Finalmente resaltar que para elementos software operativos no es posible aplicar algún tipo de mantenimiento preventivo que mejore sus características de fiabilidad; la única y mejor prevención es la correcta realización de las fases de especificación de requisitos, diseño y programación. Por otra parte, para el ser humano si existe una actitud preventiva eficaz y recomendable, que consiste en actuar sobre todo en aquellos aspectos que inciden en la eficacia con la que el ser humano desarrolla sus cometidos (estar motivado, tener unas tareas bien definidas, poseer la formación adecuada, tener un entorno de trabajo satisfactorio, etc.)

9. GESTIÓN DE FIABILIDAD

9.1 Introducción.

Un programa realmente efectivo de fiabilidad sólo puede existir en una organización donde el cumplimiento de los objetivos de fiabilidad sea reconocido como parte integrante de la estrategia corporativa y reciba, por lo tanto, atención de los altos niveles directivos. De no ser así, el programa de fiabilidad es normalmente de los primeros en ser recortados en cuanto haya presiones de coste o plazos. La calidad y la fiabilidad de los productos deben ser objetivos irrenunciables de la empresa. Es significativo que en Japón el gobierno haya hecho de la calidad un objetivo nacional, con el requisito de que un producto alcance un determinado estándar de calidad como condición para que le sea concedida la licencia de exportación.

9.2 Programas integrados de fiabilidad.

La fiabilidad debe ser siempre tratada como una parte integral del diseño y del desarrollo de un sistema, y no como una actividad paralela desconectada del resto. Por ello la responsabilidad del cumplimiento de los objetivos de fiabilidad debe tenerla el jefe de cada proyecto; así se garantizará la correcta asignación de recursos y de tiempo entre las diferentes disciplinas del diseño y desarrollo del producto o sistema.

Dado que la calidad en la producción será el determinante final de la fiabilidad, el control de la calidad es una parte integral del programa de fiabilidad. El control de la calidad no puede compensar deficiencias de la etapa de diseño, pero por contra si puede perjudicar notablemente el esfuerzo realizado en ella. El programa de control de calidad debe estar basado en los requisitos de fiabilidad y no ir dirigido únicamente a reducir costes de producción y a constituir la prueba final de aceptación. El programa de control de calidad contribuirá de forma efectiva al de fiabilidad si los procedimientos del primero están ligados a factores que puedan influir en el segundo, y no sólo a formas o funciones, si los datos de pruebas de control de calidad están integrados con el resto de datos de fiabilidad, y si el personal de control de calidad está formado para reconocer la relevancia de su trabajo a la fiabilidad, así como motivado para contribuir a su cumplimiento.

9.3 Fiabilidad y costes asociados.

Alcanzar objetivos elevados de fiabilidad resulta costoso, especialmente cuando el producto o sistema es complejo o se trata de tecnología poco experimentada. No obstante, la experiencia demuestra que todos los esfuerzos de un programa de fiabilidad bien gestionados son rentables, dado que es en general menos costoso descubrir y corregir deficiencias durante el diseño y desarrollo que corregir el resultado de fallos producidos durante el funcionamiento del producto o sistema.

Dependiendo de la naturaleza del programa se hablará de un coste u otro. Si se trata del diseño de un producto para colocar en un mercado se hablará del coste de fiabilidad; por el contrario, si se trata del diseño de un sistema por encargo específico de un cliente se hablará del coste de ciclo de vida. El coste de fiabilidad incluye todos los costes incurridos durante el diseño y la producción, los costes derivados del periodo de garantía del producto, y de forma no tan tangible los posibles costes

De pérdida de reputación y de imagen corporativa. El coste del ciclo de vida lo integran todos los costes incurridos por el sistema a lo largo de su vida, desde su concepción y diseño hasta su retirada al final de la vida operativa. El primero está basado en la perspectiva del cliente-usuario abarcando todo el ciclo de vida, y el segundo está basado en la perspectiva del fabricante con una responsabilidad limitada durante la vida del producto. La figura siguiente muestra los elementos integrantes de los costes de fiabilidad y del ciclo de vida.

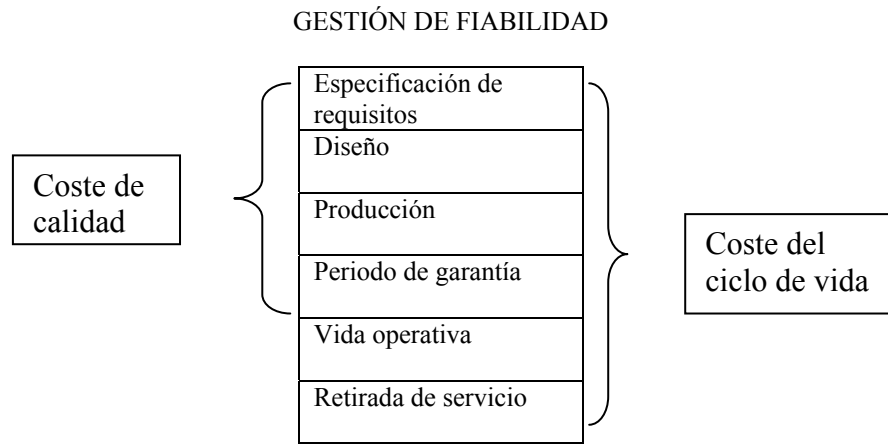


Figura Coste de fiabilidad y del ciclo de vida.

Los costes derivados de una baja fiabilidad en servicio deben ser evaluados en las etapas preliminares de la concepción del sistema o producto, de forma que los objetivos de fiabilidad estén fundamentamente establecidos.

Los programas de fiabilidad están normalmente limitados por los recursos que se les puedan destinar durante las fases de diseño y desarrollo. La asignación de recursos a las actividades de un programa de fiabilidad deben estar basadas en una consideración de los riesgos asociados; el valor de un programa de fiabilidad es, en gran medida, un juicio subjetivo basado en la experiencia del jefe de proyecto.

Existe una relación directa entre fiabilidad de un sistema y su coste de diseño y desarrollo, siendo éste mayor cuanto más elevado es el requisito de fiabilidad que se establezca. Igualmente, cuanto mayor sea la fiabilidad de un sistema, menor será su coste de operación, por el menor número de averías que se presentarán. Dado que el coste del ciclo de vida de un sistema integra tanto a los costes de diseño y desarrollo como a los de utilización y mantenimiento, la relación entre fiabilidad de un sistema y su coste del ciclo de vida tiene el aspecto mostrado en la figura siguiente.

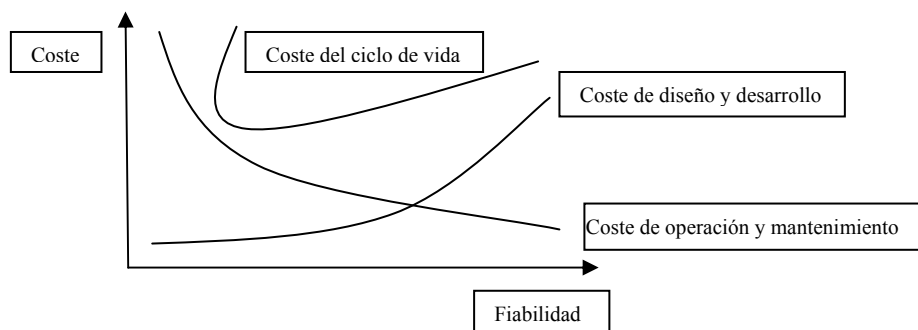


Figura. Costes de fiabilidad y del ciclo de la vida

Según se observa, no siempre es rentable seguir mejorando la fiabilidad de un sistema, llega un momento en que los esfuerzos adicionales que se realizan para mejorar la fiabilidad no se ven

compensados por los ahorros logrados en el mantenimiento u otros conceptos. Existe pues en relación con la fiabilidad un valor mínimo de coste de ciclo de vida (a igualdad de resto de las características del sistema), que no podrá ser reducido aunque siga mejorándose la fiabilidad. Aunque es prácticamente imposible establecer ese mínimo de forma analítica, si debe tenerse conceptualmente presente, para evitar esfuerzos muy costosos de mejora de fiabilidad que puedan no rendir los beneficios esperados.

9.4 Gestión de la fiabilidad por cliente.

Cuando un sistema o producto se desarrolla bajo contrato, que es el caso habitual en las adquisiciones de defensa, la organización contratante tiene un papel importante en los programas de fiabilidad y calidad. Normalmente dichas organizaciones tienen normas de aplicación a los programas de desarrollo, incluyendo las referentes a fiabilidad.

Las principales responsabilidades de una organización contratante referentes al desarrollo del programa de fiabilidad son:

1. Especificar los requisitos de fiabilidad.
2. Especificar las normas y métodos a seguir.
3. Especificar los requisitos de informes.
4. Establecer el marco contractual.
5. Controlar el cumplimiento del contrato.

9.5 Requisitos de fiabilidad.

Los diseños están basados en requisitos que definen la naturaleza de la necesidad a satisfacer. Es relativamente sencillo validar un diseño contra características determinísticas tales como peso, dimensiones, etc. Validar la fiabilidad de un diseño, por el contrario, no es tan sencillo ya que ésta depende de factores externos tales como cargas y entorno de operación.

Las especificaciones de requisitos de fiabilidad deben incluir lo siguiente:

1. Una definición de fallos relacionada con las funciones del sistema (incluyendo todos los modos de fallo que sea relevantes;
2. Una descripción completa de los entornos en los que el producto o sistema será almacenado, transportado, utilizado o mantenido;
3. Una especificación clara y concreta de requisito de fiabilidad.
4. Una relación de modos de fallos y sus efectos que sean particularmente críticos y que deban tener, por consiguiente, una probabilidad muy baja de ocurrencia.

Debe tenerse un cuidado especial al definir los fallos de forma que éstos no sean ambiguos. Los fallos deben estar relacionados siempre a un parámetro que se pueda medir o a una clara indicación, libre de interpretaciones subjetivas. No obstante, es inevitable que existan variaciones subjetivas al validar los fallos, especialmente cuando los datos no proceden de pruebas controladas.

Las especificaciones de entorno deben incluir las cargas, temperaturas, humedades, vibraciones y cualesquiera otros aspectos que puedan condicionar la probabilidad de fallo del producto o sistema.

Los requisitos de fiabilidad deben establecerse en modo tal que sean verificables, y deben tener sentido en relación con el uso previsto del producto o sistema. Los requisitos de fiabilidad basados en parámetros deben estar relacionados con las distribuciones correspondientes.

9.6 Contratos con incentivos.

Algunos sectores, como el de defensa y el aeronáutico, han desarrollado contratos con incentivos de fiabilidad. El tipo más popular es el llamado Garantía de Mejora de Fiabilidad (Reliability Improvement Warranty, RIW). Un contrato RIW requiere que el contratista se encargue de todo el mantenimiento durante un periodo fijo (varios años) por una cantidad prefijada. La motivación del contratista es maximizar su beneficio mejorando la fiabilidad (y reduciendo por tanto los costes del

mantenimiento). La organización contratante se beneficia a su vez por no tener que seguir tan de cerca el desarrollo del programa de fiabilidad y por no tener que encargarse del mantenimiento durante el tiempo acordado.

Los aspectos fundamentales a considerar en un contrato tipo RIW son:

1. Solo deben establecerse éste tipo de incentivos cuando se trate de productos o sistemas en los que no exista un elevado riesgo de desarrollo, y para los que se prevea una utilización relativamente estable.
2. La cantidad prefijada debe ofrecer al contratista un beneficio sustancial con un riesgo razonable.
3. Pueden presentarse dificultades prácticas si se establece incentivos tipo RIW junto con otras prácticas convencionales de reparación. Los equipos sujetos al RIW requerirán etiquetado y manipulación especial para asegurar que no sean reparados por personas que no sean del contratista.
4. El contratista debe tener cierta libertad para modificar los equipos de cara a mejorar sus fiabilidades, pero al mismo tiempo la organización contratante puede desear mantener cierto control sobre los cambios ya que éstos pueden afectar a las prestaciones del producto o sistemas o a su interoperabilidad.
5. El contrato debe estipular en qué forma el producto o sistema debe ser usado o mantenido, ya que dichos aspectos pueden afectar su fiabilidad.

2. MANTENIBILIDAD

1. INTRODUCCIÓN

1. Generalidades

El hombre, a lo largo de su existencia, trata de obtener objetos y sistemas que satisfagan las necesidades que continuamente le surgen, o mejor, como dijo A. Einstein "Todo lo que la raza humana ha realizado y pensado está relacionado con la satisfacción de necesidades y el alivio del dolor".

A lo dicho por A. Einstein (con lo que se puede estar total o parcialmente de acuerdo), y para los que estamos involucrados en el ámbito de la logística, debemos añadir el factor tiempo a esa satisfacción y alivio para que estos sean dados durante la mayor cantidad de tiempo posible del periodo de vida esperada de los objetos/sistemas obtenidos o a obtener.

Debido a que la característica común inherente a todo lo que obtiene el hombre es su "vida limitada", característica que comparte con todos los seres de la naturaleza, surge la necesidad de la constante sustitución de lo obtenido, utilizado y eliminado, por algo nuevo a obtener. Si a esta característica unimos el miedo del hombre a no disponer de la materia prima requerida para las nuevas obtenciones, por el peligro de agotamiento de la misma, ello nos está llevando a tener que analizar cuál debe ser el límite más adecuado de la vida (esperanza de vida) de los sistemas (*de aquí en adelante obviaremos el término "objeto", para referirnos, en todo lo que sigue, solamente al término "sistema"*) para que ese agotamiento no se produzca, por lo menos a corto plazo "humano", y sea compatible con el crecimiento de la humanidad, lo que actualmente se está llamando "Crecimiento sostenible".

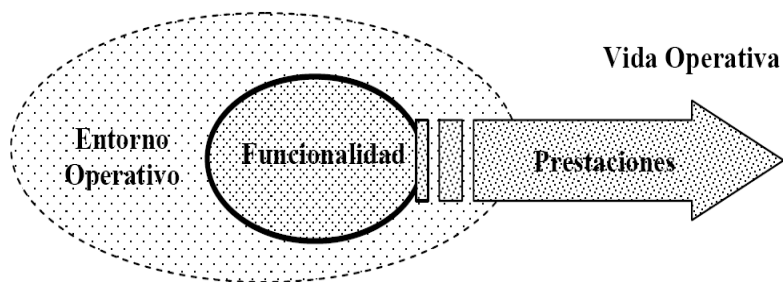
Por lo tanto es la vida, como medida de tiempo de la existencia de todo lo que el hombre obtiene, un factor previsible que debe estar muy presente en toda las decisiones a tomar durante las distintas fases de la existencia de los sistemas, ya que el que esa vida previsible no se cumpla quiere decir, en la mayoría de los casos, que se han cometido errores en la toma de esas decisiones. Pero para que esa vida previsible pueda ser alcanzada es fundamental que el sistema esté compuesto y organizado (su configuración) de elementos que permitan dicho objetivo, lo que significa que esos elementos han de tener a su vez una vida igual o superior a la prevista para el sistema del que forman parte y si ello no es así debe ser posible sustituirlos cuando convenga, a fin de que el objetivo de la vida prevista del sistema se cumpla.

Esa posibilidad de sustitución de elementos que, formando parte del sistema, han llegado al final de su vida nos está introduciendo de lleno en el concepto de **mantenibilidad**.

Por otra parte, y esto es también común a todos los sistemas creados por el hombre, la satisfacción de las necesidades se debe a que mediante la realización de sus funciones (funcionalidad) bajo unas condiciones especificadas (condiciones operativas o entorno operativo), suministra las prestaciones requeridas. Por consiguiente, se deben reunir los aspectos de *funcionalidad*, *entorno operativo* y *prestaciones* a fin de obtener una imagen completa del sistema que satisfaga la necesidad.

La cualidad inherente de los sistemas que reúnen dichos aspectos es su **Operatividad**. Por ello decimos que un sistema está operativo si dispone, en el momento de su vida que estamos considerando, de dicha cualidad y decimos que está inoperativo si ocurre lo contrario. Por otra parte es necesario que recordemos que esta cualidad califica a los términos que intervienen en la efectividad de los sistemas y que son: su **capacidad operativa**, su **disponibilidad operativa** y su **confiabilidad operativa**.

OPERATIVIDAD DE LOS SISTEMAS



El hecho de que sea prácticamente imposible diseñar sistemas que dispongan permanentemente de la cualidad de la operatividad, implica la necesidad de realizar determinadas acciones para devolverles dicha cualidad cuando la han perdido. La capacidad que tienen los sistemas de recuperar la operatividad nos introduce de lleno en el término **mantenibilidad** y las acciones requeridas para ello en el término **mantenimiento**.

1.2 Disponibilidad de los sistemas

El que un sistema esté disponible para operar, es decir tenga operatividad, depende fundamentalmente de que mantenga su funcionalidad (esté o no funcionando) lo que significa que no hay anulación de dicha funcionalidad, ya sea esta anulación debida a un fallo del sistema o a una anulación voluntaria realizada por el usuario del mismo. Según esto debemos distinguir claramente dos estados complementarios en la vida de los sistemas: el *estado operativo* y el *estado inoperativo* y saber que el paso del uno al otro se produce por la intervención de tres características de los sistemas que son: la **fiabilidad (R)** como probabilidad de fallos en alguno de los componentes del mismo, la **mantenibilidad (M)** como probabilidad de ser mantenido en un tiempo determinado y la **soportabilidad (S)** como probabilidad de que los retrasos debidos al apoyo logístico no sean superiores a un tiempo determinado.

Si bien es la *utilidad* de los sistemas, como relación entre su *efectividad* y su *coste del ciclo de vida*, el aspecto más determinante en la selección del que mejor va a satisfacer la necesidad planteada, es la **disponibilidad (A)** la característica que más va a preocupar al utilizador del sistema a lo largo de su vida útil, ya que ella es la medida del tiempo que va a poder utilizar el sistema para obtener los beneficios consiguientes a la satisfacción de la necesidad.

En Ingeniería de Sistemas la disponibilidad es una medida de la relación entre el tiempo operativo y el periodo de tiempo de vida considerado. Como éste es, a su vez, la suma del tiempo operativo más el tiempo inoperativo, podemos decir que la disponibilidad es:

$$A = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo operativo} + \text{Tiempo inoperativo}}$$

Pero también, la disponibilidad es una función de la fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad debido a la influencia determinante que estas tres características probabilísticas de los sistemas tienen sobre el cambio entre los estados operativo e inoperativo de los mismos, y por ello también la disponibilidad es, a su vez, una probabilidad y función de las tres: $A = F(R, M, S)$

Si representamos R, M y S por los parámetros que las caracterizan nos encontramos ante la fórmula más importante de la logística, que es la de la **Disponibilidad Operativa (AO)**:

$$A_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MLDT}$$

Donde:

MTBF = Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre Fallos). Parámetro que caracteriza la fiabilidad de los sistemas y representa su tiempo medio operativo. Es un valor intrínseco de los mismos.

MTTR = Mean Time To Repair (Tiempo Medio De Reparación). Parámetro que caracteriza la mantenibilidad de los sistemas y forma parte de su tiempo medio inoperativo. Es un valor intrínseco de los mismos.

MLDT = Mean Logistic Delay Time (Tiempo Medio de Retrasos Logísticos). Parámetro que caracteriza la soportabilidad de los sistemas y forma parte de su tiempo medio inoperativo. Es un valor que representa la capacidad que tiene el usuario de mantener su sistema mediante el apoyo logístico disponible. No es, por lo tanto, un valor intrínseco de los mismos.

De los tres parámetros que hemos considerado dos, el MTBF y el MTTR, son considerados como intrínsecos de los sistemas y por lo tanto van a depender del diseño, la fabricación y la instalación del mismo; el otro el MLDT es un parámetro que depende de la organización logística del usuario (su sistema logístico) y del apoyo logístico que facilita el fabricante con el sistema entregado. Por lo tanto, el diseñador, fabricante e instalador del sistema debe entregar el mismo con una disponibilidad intrínseca que por lo general obedece a un requisito del cliente. Esta disponibilidad se denomina **Disponibilidad Inherente (Ai)** y se representa por:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

La disponibilidad inherente depende de la fiabilidad y de la mantenibilidad y por lo tanto una mejora en la misma se deberá a las posibles mejoras en la fiabilidad, incrementando el tiempo medio entre fallos (MTBF), o en la mantenibilidad, disminuyendo el tiempo de reparación (MTTR). Veamos en qué medida se ejerce esa influencia:

Incrementando la fiabilidad

$$\Delta(A_i) / \Delta(MTBF) = \frac{MTTR}{(MTBF + MTTR)^2}$$

Incremento de mantenibilidad

$$\Delta(A_i) / \Delta(MTTR) = \frac{-MTBF}{(MTBF + MTTR)^2}$$

De donde podemos deducir que, en principio, una mejora de la mantenibilidad tiene una influencia en la disponibilidad inherente muy superior a la que se obtendría por una mejora de la fiabilidad. Si además tenemos en cuenta que en la fiabilidad influye el diseño del sistema y el de sus componentes, y los materiales de fabricación de los mismos, y que en la mantenibilidad solamente va a influir el diseño, como disposición de los componentes en el sistema instalado, casi siempre será menos costoso mejorar la mantenibilidad que la fiabilidad.

No obstante hay que aclarar que en ingeniería de sistemas la fiabilidad es un factor de calidad de orden superior al de la mantenibilidad ya que la carencia de fiabilidad repercute en la seguridad del sistema (posibilidad de fallos catastróficos) y en la continuidad del periodo operativo (incumplimiento del periodo de la misión), por lo que proponer una mejora de la disponibilidad inherente, mediante la mejora de la mantenibilidad, debe ser hecho cuando la fiabilidad requerida haya sido alcanzada.

2 CONCEPTO DE MANTENIBILIDAD

2.1 Definición de mantenibilidad

La Mantenibilidad es una característica inherente de cada elemento, y la podemos definir como:

1).-Una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionalidad de un producto, y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación, predicción y mejora.

2).-La mantenibilidad es la característica inherente de un elemento, asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria según se especifica.

La relativa facilidad y economía de tiempo y recursos con que un elemento (sistema) es devuelto a su condición operativa especificada, cuando una acción de mantenimiento es realizada:

- por el personal adecuado,
- usando los procedimientos y recursos asignados,
- en el nivel de mantenimiento y reparación previsto.

También la podemos entender o aceptar como la medida de la ponderación de la dificultad del mantenimiento, tanto si se plantea como objetivo en la obtención (diseño, fabricación y construcción) de un equipo o sistema, como si es el resultado de la utilización, a lo largo del ciclo de vida, del equipo o sistema.

Una de las creencias comunes es que la mantenibilidad es simplemente la capacidad de llegar a un componente para reemplazarlo. Sin embargo, eso es sólo un pequeño aspecto. En realidad, la mantenibilidad es una dimensión de la fabricación del sistema y una política de gestión del mantenimiento del sistema

Para poder usarla, en la práctica de ingeniería, debemos cuantificarla y expresarla numéricamente. De esa forma, las características cualitativas pasan a ser traducidas en medidas cuantitativas lo que nos permite definir la mantenibilidad como atributo cuantificado (parámetro, o figura de mérito) del elemento. Esta cuantificación se puede expresar en términos de factores tales como *tiempo empleado en mantenimiento, frecuencia de mantenimiento y coste de mantenimiento*. Estos términos pueden ser presentados como características diferentes para definir la mantenibilidad según una combinación de factores como:

1) Una característica de diseño e instalación expresada como, la probabilidad de que un sistema retorne a su condición de operativo dentro de un periodo dado de tiempo cuando una acción de

mantenimiento se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos especificados. **El parámetro más consecuente con este factor será el Tiempo Medio de Reparación (Mean Time To Repair, MTTR).**

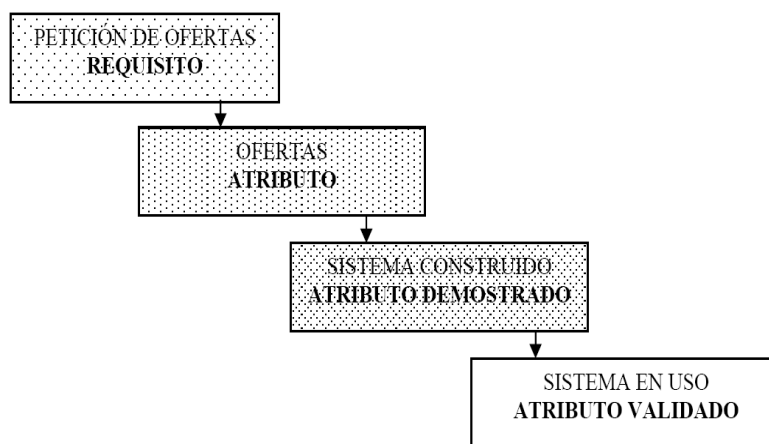
2) Una característica de diseño e instalación expresada como, la probabilidad de que no se necesitarán más de x acciones de mantenimiento en un periodo dado, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos. **El parámetro más consecuente con este factor será el Tiempo Medio Entre Mantenimientos (Mean Time Between Maintenance, MTBM).**

3) Una característica de diseño e instalación expresada como, la probabilidad de que el coste de mantenimiento de un sistema no supere una cantidad de dinero especificada, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos. **El parámetro más consecuente con este factor será el coste medio del mantenimiento por cada hora de funcionamiento (o de disponibilidad) del sistema (Maintenance mean cost per operating hour, MMC/OH).**

Aunque estas tres maneras de cuantificar la mantenibilidad son teóricamente posibles, el enfoque basado en el tiempo empleado en el mantenimiento es, de lejos, el más usado en la práctica.

El poder cuantificar la mantenibilidad como atributo nos va a permitir conocer el valor del mismo para diferentes tipos de módulos y equipos instalados en sistemas ya operativos y establecer una base de datos sobre la misma. El conocimiento de estos datos y en base a la necesidad a satisfacer, permitirá, tanto al cliente como a los diseñadores, decidir el requisito de mantenibilidad para el nuevo sistema a obtener. Por lo tanto, la mantenibilidad podrá ser especificada por los clientes en forma de diferentes requisitos, al igual que ocurre con el resto de atributos del sistema, en los documentos que acompañan a los lanzamientos de las correspondientes peticiones de ofertas. Por otra parte, el parámetro que represente la mantenibilidad de los sistemas ofertados por los contratistas podrá ser utilizado como uno de los atributos a considerar en la evaluación de alternativas identificadas y ofertadas. Por último, la mantenibilidad como atributo del sistema a suministrar, deberá ser demostrada y, durante la vida en servicio del sistema, validada.

Parámetro de mantenibilidad



Como ya indicamos en la introducción, la vida prevista de los sistemas ha de estar presente en la toma de decisiones relacionadas con su utilización, por ello, a la hora de considerar los requisitos de mantenibilidad de un sistema es esencial hacer referencia a la misión del sistema y a sus perfiles previstos de utilización, es decir el uso que el cliente va a hacer del mismo.

En la definición de una tarea de mantenimiento, ya sea preventiva o correctiva, no siempre lo mejor va a ser minimizar su tiempo de ejecución. Lo importante es ligar tanto los requisitos de mantenibilidad como el diseño de las tareas a los requisitos globales del sistema y a los perfiles previstos de utilización. Por ejemplo, podemos pensar en la tarea de mantenimiento consistente en cambiar una rueda de automóvil. Cuando dicha tarea se realiza sobre un bólido de Fórmula 1 y en el transcurso de una carrera, lo esencial es que la tarea se realice en el menor tiempo posible; gracias al concurso simultáneo de media docena de técnicos y al empleo de herramientas especiales se consigue reemplazar las cuatro ruedas en unos

pocos segundos. Por el contrario, para cambiar la rueda de un automóvil lo importante es asegurar que la rueda pueda ser cambiada por una sola persona (pues no debe suponerse o exigirse que deba haber más de un ocupante en el automóvil), aunque ello implique que la realización de la tarea del cambio de una sola rueda lleve normalmente de diez a quince minutos.

La naturaleza del perfil de utilización de cada sistema condiciona, de una manera muy clara, su plan de mantenimiento y los métodos de ejecución de las tareas de mantenimiento, por lo que los correspondientes requisitos de mantenibilidad se verán a su vez condicionados. Así, en los sistemas de utilización única (sistemas “one shot”, como son, entre otros los misiles y las sondas ionosféricas), el mantenimiento se centra en las labores de comprobación y prevención que se realizan antes de su utilización, ya que normalmente no es factible acceder a ellos una vez ha comenzado su perfil de misión si es que se detectan anomalías de funcionamiento que debieran ser corregidas, por lo que los requisitos de mantenibilidad se enfocarán a que se desarrolle un plan de mantenimiento preventivo que asegure una alta fiabilidad del sistema en su misión. En los de utilización intermitente (como son los televisores, los automóviles, los aviones y los buques) los períodos (programados o no) de inactividad ofrecen una posibilidad extraordinaria de realizar tareas de mantenimiento que, de otra manera, podrían implicar la no disponibilidad del sistema en un momento en el que su utilización es necesaria; por ello los requisitos de mantenibilidad se enfocarán para conseguir una alta disponibilidad del sistema en sus periodos operativos. Finalmente, los sistemas de utilización continua (como son las centrales de generación de electricidad y las plantas petroquímicas) requieren un plan de mantenimiento que evite largas paradas del sistema; en este caso los requisitos de mantenibilidad se enfocarán a conseguir una alta disponibilidad del sistema en todo su ciclo de vida.

Una fiabilidad aumentada significa menos fallos que reparar. Una mantenibilidad aumentada implica tiempos de mantenimiento más cortos.

En definitiva, dentro del enfoque sistémico y concurrente, la mantenibilidad (como el resto de las disciplinas de las ingenierías de sistemas y logística) no es un fin en sí misma, sino que es un factor más que contribuye a que los productos o sistemas sean eficaces al coste y como tal debe ser contemplada.

2.2 Análisis teórico de la mantenibilidad

La mantenibilidad, como característica inherente de un sistema para ser mantenido con un consumo de tiempo y un empleo de recursos humanos, materiales y económicos determinado, no puede expresarse a través de un único parámetro o figura de mérito. Existen diferentes factores, tales como tiempos invertidos o transcurridos, costes horarios de personal de mantenimiento, frecuencia de actividades de mantenimiento, etc., que representan en alguna medida la mantenibilidad de un sistema. Por tanto, ésta debe especificarse y medirse a través de la combinación de parámetros más adecuados en cada caso.

El análisis de los parámetros, o métricas, de mantenibilidad de los sistemas, se plantea mediante los siguientes cuatro enfoques:

- Métricas basadas en el tiempo empleado
- Métricas basadas en la carga de trabajo
- Métricas basadas en la frecuencia, y
- Métricas basadas en el coste de las tareas.

2.2.1 La Mantenibilidad Basada en el Tiempo Empleado.

Para explicar el significado físico de la mantenibilidad, es necesario establecer el enlace entre una tarea especificada de mantenimiento y el tiempo empleado en su realización. Así, la mantenibilidad puede ser expresada cuantitativamente mediante el tiempo T empleado en la ejecución física de las actividades que componen dicha tarea de mantenimiento, con los recursos de apoyo especificados.

La primera pregunta que surge inmediatamente aquí es: *¿es T constante para cada ejecución de la tarea de mantenimiento considerada, o difiere de unas ejecuciones a otras?*. Si se analiza el tiempo empleado en la ejecución, a lo largo de varios ensayos de una tarea determinada de mantenimiento, puede comprobarse que para cada uno de ellos el intervalo de tiempo empleado es diferente, por lo que podemos deducir que el tiempo empleado en completar la tarea de mantenimiento es una característica específica del ensayo.

La siguiente pregunta que se provoca es ¿por qué son necesarios diferentes tiempos para la ejecución de tareas de mantenimiento idénticas? La respuesta exige analizar todos los factores, externos e internos, que intervienen. Como estos pueden ser infinitos solamente indicaremos los más influyentes, reunidos en los siguientes grupos:

1) 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 involucrado.

2) Factores *condicionales*, que representan la influencia de la configuración y disposición del elemento y del entorno físico donde está ubicado (mantenibilidad de diseño), así como las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, la geometría y forma del elemento en recuperación.

3) Factores de *entorno*, que representan la influencia de la temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, etc. en el personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea.

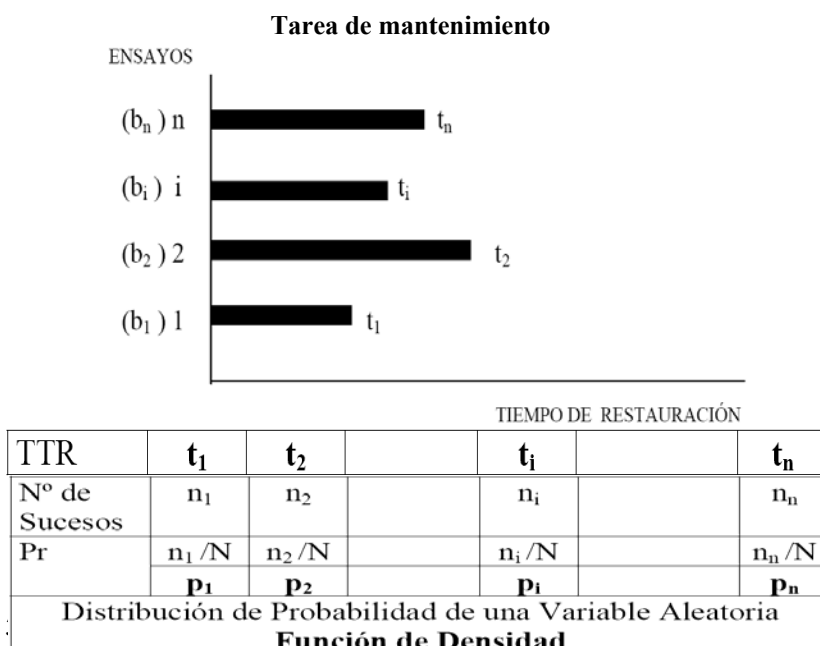
Consecuentemente T podría expresarse por la siguiente ecuación:

$$T = f(\text{factores personales, condicionales, y de entorno})$$

Debido al elevado número de factores en cada grupo, por un lado, y a su variabilidad, por otro, es imposible encontrar la regla que describa de forma determinista la compleja relación que representa "f". El único camino posible en el análisis de mantenibilidad es recurrir a la teoría de probabilidades, que ofrece una herramienta para la descripción probabilística de la relación definida por la expresión anterior.

En conclusión podría decirse que es imposible dar una respuesta determinista respecto al intervalo de tiempo en que se produce la transición del periodo de fallo al de funcionamiento, para cualquier ensayo individual de la tarea de mantenimiento en consideración. Solo es posible asignar una cierta probabilidad de que ocurra en un cierto instante de tiempo de mantenimiento, o de que un determinado porcentaje de ensayos sean o no completados antes de un tiempo determinado.

Así, la restauración de la operatividad de un sistema podría ser considerado como un experimento aleatorio, y la transición del sistema al estado de operativo, como el suceso elemental que corresponde al resultado de ese experimento. La función que asigna un valor numérico correspondiente t_i a cada suceso elemental b_i del espacio muestral S, es una variable aleatoria, que en este caso se llamará Tiempo de Restauración o Tiempo de Reparación, (Time To Restore, ttr). Así, la probabilidad de que la variable aleatoria ttr tome el valor t_i , es $p_i = P(ttr = t_i)$. Los valores numéricos tomados por las variables aleatorias y la probabilidad de su realización, definen una distribución de probabilidad que puede definirse por diferentes indicadores. Veamos cómo se estructura:



De la distribución de probabilidad obtenida podemos formar la gráfica correspondiente y mediante el paso de la variable aleatoria a una continua, definir su *función de densidad* utilizando procedimientos de regresión lineal o el de máxima verosimilitud. De la función de densidad asignada se van a derivar las siguientes características de la mantenibilidad:

1. Función de Mantenibilidad (Función de Distribución de Mantenibilidad)
2. Tiempo porcentual de reparación. TTR_p
3. Tiempo medio de reparación.
4. Seguridad de reparación.

que, a continuación, se analizara en profundidad.

1) Función de mantenibilidad.

La función de distribución de cualquier variable aleatoria representa la probabilidad de que dicha variable tenga un valor igual o menor que uno determinado. Si X es una variable aleatoria y F es su función de distribución, la probabilidad de que X sea menor o igual que un cierto valor Y es:

$$F(Y) = \Pr [X \leq Y]$$

La función de distribución de la variable aleatoria ttr tiempo de reparación se denomina función de mantenibilidad y se representa por M(t). La variable aleatoria ttr representa el tiempo de un ensayo de realización de una tarea de mantenimiento cualquiera, ya sea preventiva o correctiva. Por tanto, la función de mantenibilidad de un módulo o componente que sea objeto de una tarea de mantenimiento viene dada por:

$$M(t) = \Pr [ttr \leq t] = \int_0^t m(t) dt$$

donde m(t) es la función de densidad de la variable aleatoria ttr.

La siguiente tabla muestra la función de mantenibilidad de varias distribuciones teóricas bien conocidas, donde A_m, B_m y C_m son los parámetros de escala, forma y origen de la distribución de probabilidad, y Φ es la función normal de Laplace.

DISTRIBUCIÓN	EXPRESIÓN M(t)	DOMINIO
Exponencial	$1 - \exp(-t/A_m)$	$t \geq 0$
Normal	$\Phi[(t - A_m)/B_m]$	$-\infty < t < +\infty$
Log-normal	$\Phi[(\ln(t - C_m) - A_m)/B_m]$	$t \geq C_m, C_m \geq 0$
Weibull	$1 - \exp(-[(t - C_m)/(A_m - C_m)]^{B_m})$	$t \geq C_m, C_m \geq 0$

Debido a que no pueden existir tiempos de reparación inferiores a cero debe tenerse mucha precaución al considerar distribuciones para representar m(t) que tengan cierta masa probabilística a la izquierda de t=0, como ocurre por ejemplo con la distribución normal.

La experiencia indica que la distribución log-normal suele ser la mejor aproximación para caracterizar $m(t)$. Ello se debe a que la distribución de los tiempos de ejecución de las tareas de mantenimiento debe ser asimétrica. La mayoría del personal de mantenimiento estará familiarizado con el sistema y con la mayoría de las tareas que sobre él se realicen; sin embargo, periódicamente aparecerán tareas complejas y poco frecuentes o se incorporará personal con menos experiencia, y ello implicará tiempos más largos de ejecución de las tareas. Por lo tanto, la distribución tendrá una cola hacia la derecha.

Una vez definida la función de distribución que representa los tiempos de ejecución de la tarea de mantenimiento, nos interesa obtener, a partir de dicha función, los parámetros que son representativos de la mantenibilidad y que podremos utilizar de forma práctica y fácil en todos los análisis de la Ingeniería de Sistemas.

2) Tiempo porcentual de reparación. TTR_p

TTR_p representa el tiempo de mantenimiento o reparación para el cual un porcentaje p de las veces que la tarea de mantenimiento ensayada hace que el elemento sea devuelto a su estado operativo. Analíticamente:

$$TTR_p = t // M(t) = \Pr [ttr \leq t] = \int_0^t m(t) dt = p$$

El valor más habitual es TTR_{90} , que representa la duración del tiempo de reparación por debajo del cual el 90 por ciento de las acciones de mantenimiento serán completadas. Es decir:

$$TTR_{90} = t // M(t) = \Pr [ttr \leq t] = \int_0^t m(t) dt = 0.9$$

En literatura orientada al entorno militar y en contratos que tratan de sistemas de armas, el valor numérico de TTR_{95} se adopta como tiempo máximo de reparación y se representa por $M_{max} = TTR_{95}$.

3) Tiempo medio de reparación.

La esperanza, como valor más esperado, de la variable aleatoria ttr es el tiempo medio de reparación MTTR (Mean Time to Repair). Analíticamente se representa por la esperanza matemática:

$$MTTR = E[ttr]$$

MTTR puede expresarse en función de la función de mantenibilidad,

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

Para el caso de una función exponencial, el tiempo medio de reparación resulta ser:

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt$$

que representa el área bajo la función complementaria de la de mantenibilidad.

El Tiempo Medio de Reparación (Mean Time To Repair, MTTR) es el valor más empleado en la ingeniería de mantenibilidad y se le considera como el parámetro representativo de la mantenibilidad en ingeniería de sistemas. Este valor puede representar, de forma idéntica, la mantenibilidad de una sola tarea de mantenimiento, que como ya hemos visto representa el tiempo medio de su ejecución, la mantenibilidad de un módulo reparable, la de un equipo o la de un sistema, y en todos ellos representa el valor medio de ejecución de todas las tareas de mantenimiento que se realizan sobre los mismos.

La utilización de este parámetro requiere matizaciones y cuidados, al igual que en la disciplina de fiabilidad debe procederse con el de 'tiempo medio entre fallos' (Mean Time Between Failures, MTBF).

Dos alternativas de diseño pueden ser tales que las distribuciones de los correspondientes tiempos de reparación sean distintas, y que sin embargo posean el mismo valor de MTTR. Por ejemplo, una distribución normal de media 30 minutos y desviación típica 10 posee una media de MTTR=30 minutos, al igual que otra de media 30 minutos y desviación típica 20. La media no dice nada de cómo de grandes son los valores mayores que pueden presentarse, es decir, cómo de largas pueden llegar a ser las ejecuciones de las tareas de mantenimiento. Por ello es necesario considerar otros valores de la función de la distribución aplicada, como es la desviación típica, u otras métricas, aquí consideradas, para tener mayor información sobre la mantenibilidad.

La siguiente tabla muestra el MTTR para las distribuciones teóricas ya conocidas, donde Γ es el símbolo de la función Gamma.

DISTRIBUCIÓN	EXPRESIÓN MTTR
Exponencial	A_m
Normal	A_m
Log normal	$\exp(A_m + 1/2(B_m)^2)$
Weibull	$A_m \Gamma(1 + 1/B_m)$

4) Seguridad de reparación.

La función de mantenibilidad $M(t)$ representa la probabilidad de que el sistema sea reparado antes de un determinado tiempo t . En la práctica interesa conocer la probabilidad de que un sistema sea reparado antes de un cierto tiempo t_2 , supuesto que no había sido reparado a un tiempo anterior t_1 ($t_1 < t_2$). A esa probabilidad condicional se le conoce como seguridad de reparación en el intervalo $[t_1, t_2]$, y se le representa por:

$$SR[t_1, t_2] = \Pr [t_1 \leq t_{tr} \leq t_2] = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)}$$

Si el extremo inicial del intervalo es el origen de tiempos, la seguridad de reparación coincide con la función de mantenibilidad en el extremo final,

$$SR[0, t_2] = \Pr [0 \leq t_{tr} \leq t_2] = \frac{M(t_2) - M(0)}{1 - M(0)} = M(t_2)$$

Esta medida de la mantenibilidad proporciona una información muy útil para los ingenieros de mantenimiento.

5) Ejemplo práctico de cálculo.

Para una tarea de mantenimiento, cuyo tiempo de recuperación podría ser modelizado por la distribución de Weibull con los parámetros A_m (α) = 29, B_m (β) = 2,9 y $C_m = 0$ determinar:

- la probabilidad de que el sistema será recuperado en 20 minutos y en 35 minutos;
- el tiempo en el que el 20 % y el 95 % de las tareas serán completadas con éxito;

c) el tiempo esperado de recuperación, MTTR; d) la probabilidad de que la tarea de mantenimiento que no haya sido completada durante los 29 primeros minutos lo sea en los siguientes 10 minutos.

a) Haciendo uso de la tabla de funciones de mantenibilidad típicas, esta tarea particular está modelizada por la expresión:

- Para 20 minutos:

$$M(20) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(20 - 0)}{(29 - 0)}\right]^{2,9}\right\} = 0,288$$

- Para 35 minutos:

$$M(35) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(35 - 0)}{(29 - 0)}\right]^{2,9}\right\} = 0,82$$

b) El tiempo TTRp representa el tiempo de recuperación en el cual se completará un porcentaje dado de una tarea de mantenimiento. Para la distribución Weibull se puede calcular usando la ecuación resultante de despejar la t en la expresión de la M(t):

$$t = Am\left\{-\ln[1 - M(t)]^{1/Bm}\right\}$$

$$TTR_{20} = 29\left\{-\ln[1 - 0,20]\right\}^{1/2,9} = 17,29 \text{ minutos}$$

$$TTR_{95} = 29\left\{-\ln[1 - 0,95]\right\}^{1/2,9} = 42,33 \text{ minutos}$$

c) Tiempo esperado de recuperación. Ya sabemos que este valor es esperanza matemática de la variable aleatoria ttr y que se denomina Tiempo Medio de Reparación (Mean Time To Repair, MTTR). El valor lo podemos calcular usando la tabla de expresiones del MTTR para las funciones de mantenibilidad típicas:

$$MTTR = Am \Gamma(1 + 1/Bm)$$

$$MTTR = 29 \times \Gamma[1 + 1/2,9] = 29 \times 0,892 = 25,87 \text{ minutos.}$$

El valor numérico para $\Gamma[1 + 1/2,9]$ se puede obtener de tablas que están desarrolladas en multitud de documentos.

b) La realización de la recuperación viene representada por la probabilidad de que un elemento sea recuperado a su estado de funcionamiento en un tiempo t2, no habiéndolo sido en el tiempo t1. Esto es un ejemplo de probabilidad condicional que se puede definir usando:

$$RS(t_1, t_2) = \Pr[TTR \leq t_2 \mid TTR > t_1] = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)}$$

$$RS(29, 39) = \frac{M(39) - M(29)}{1 - M(29)}$$

Así para la distribución de probabilidad de Weibull obtenemos:

$$M(29) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(29 - 0)}{(29 - 0)}\right]^{2,9}\right\} = 0,632$$

$$M(39) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(39 - 0)}{(29 - 0)}\right]^{2,9}\right\} = 0,906$$

Por lo tanto:

$$RS(29, 39) = \frac{0,906 - 0,632}{1 - 0,632} = 0,745 = 74,5 \%$$

Lo que significa que prácticamente que hay una probabilidad del 75 % de que la tarea de mantenimiento, que no ha sido completada en los primeros 29 minutos lo sea durante los 10 restantes.

2.2.2 La Mantenibilidad Basada en la Carga de Trabajo.

No sólo es importante el tiempo invertido en la realización de las tareas de mantenimiento a la hora de considerar la mantenibilidad de un sistema. Es necesario considerar además el esfuerzo humano requerido para mantener el sistema en estado operativo. Un porcentaje elevado de las tareas de mantenimiento de un sistema podrían ser completadas en un tiempo aceptable, pero a expensas de requerir la presencia de varios técnicos de mantenimiento, lo cual implicará con certeza un incremento en el coste de ejecución de la tarea. En cada caso habrá que valorar qué aspectos son más importantes, si el tiempo total transcurrido en la ejecución de la tarea, o el esfuerzo humano requerido, o el coste, etc. Cada caso debe analizarse individualmente, de forma que el usuario determine la mantenibilidad que requiere del sistema y lo que está dispuesto a pagar por ella. El análisis de la necesidad a satisfacer con el sistema determinará la utilidad (efectividad/coste) requerida, que deberá ser expresada en términos de mantenibilidad, entre otros.

Las principales figuras de mérito de mantenibilidad basadas en la carga de trabajo (volumen de mantenimiento requerido) son las siguientes:

Horas hombre de mantenimiento por hora de operación del sistema (Maintenance man hours per operating system hour, MMH/OH). Si se considera que mientras se realizan tareas de mantenimiento el sistema no está disponible, las horas-hombre de mantenimiento por hora de operación del sistema son un buen indicador del porcentaje máximo de la vida en servicio del sistema en que éste estará disponible para desempeñar las misiones para las que fue diseñado. Es por tanto un buen indicador de la eficiencia del sistema.

- a) Horas hombre de mantenimiento al año (Maintenance man hours per year, MMH/Year). Esta figura de mérito es un buen indicador del esfuerzo humano requerido (y del coste asociado) anualmente para el mantenimiento del sistema. Este indicador es similar al anterior, y refleja bien la eficiencia del sistema. Puede ser un parámetro útil en la elaboración de presupuestos anuales de mantenimiento y en la identificación de recursos necesarios (plantilla de técnicos, turnos de trabajo, etc).
- b) Horas hombre de mantenimiento por acción de mantenimiento (Man maintenance hours per maintenance action, MMH/MA). Da una idea, junto con la duración media de las tareas de mantenimiento, del número medio de personas requeridas para la realización de las tareas. Tan importante (o más) como el tiempo total transcurrido en la ejecución de las tareas es el tiempo total invertido por el personal de mantenimiento, ya que en muchas tareas es necesario, al menos durante parte de su ejecución, el concurso simultáneo de varios técnicos. Valores elevados de este indicador pueden ser síntoma de un mal diseño y, por tanto, una mala mantenibilidad.

2.2.3 La Mantenibilidad Basada en la Frecuencia.

Al igual que se han considerado figuras de mérito de mantenibilidad basadas en el tiempo o en la carga de trabajo, debe considerarse además la frecuencia de las tareas necesarias para mantener el sistema en estado operativo. Unas frecuencias relativamente altas pueden ser incompatibles con un determinado perfil deseado de utilización (por ejemplo, misiones de larga duración).

Las principales figuras de mérito de mantenibilidad basadas en la frecuencia de las tareas de mantenimiento son las siguientes:

- a) Tiempo medio entre acciones de mantenimiento (Mean Time Between Maintenance, MTBM). Indica la frecuencia de tareas requeridas de mantenimiento, ya sean preventivas o correctivas y se puede calcular como:

$$MTBM = \frac{1}{1/MTBM_p + 1/MTBM_c}$$

donde $MTBM_p$ es el intervalo medio de mantenimiento programado (preventivo) y $MTBM_c$ es el intervalo medio de mantenimiento no programado (correctivo). Los recíprocos de $MTBM_p$ y $MTBM_c$ constituyen las tasas de mantenimiento, en términos de acciones de mantenimiento, en términos de acciones de mantenimiento por hora de operación del sistema. $MTBM_c$ debería estar próximo MTBF que empleamos en fiabilidad de sistemas.

El factor de frecuencia de mantenimiento, MTBM, es un parámetro importante en la determinación de la disponibilidad operativa y efectiva del sistema.

- b) Tiempo medio entre reemplazos (Mean Time Between Replacement, MTBR). Indica la frecuencia de tareas de mantenimiento, ya sean preventivas o correctivas, que requieren el reemplazo de un elemento por otro de repuesto. Es un parámetro importante para determinar requisitos de repuestos. Un objetivo de la ingeniería de mantenibilidad en el diseño del sistema es maximizar este valor cuando sea posible. El MTBR es un factor del MTBM y siempre se cumple que MTBR será igual o mayor que el MTBM.

En esencia, MTBR es un factor significativo, aplicable tanto en acciones de mantenimiento correctivo como de mantenimiento preventivo que exijan sustitución de elementos, y es un parámetro clave en la determinación de requisitos de apoyo logístico. Un objetivo de mantenibilidad en el diseño del sistema es maximizar MTBR, cuando sea posible.

2.2.4 La Mantenibilidad Basada en los Costes.

Análogamente, es necesario considerar los costes asociados a la ejecución de las tareas de mantenimiento. La mantenibilidad de un sistema será mayor cuanto menor sean los costes asociados a la realización de sus tareas de mantenimiento.

Las principales figuras de mérito de mantenibilidad basadas en los costes de las tareas de mantenimiento son las siguientes

Coste medio de tarea de mantenimiento (Mean Maintenance Task Cost, MMTTC). El coste de una tarea depende de su tiempo requerido de ejecución, del número de técnicos que sean necesarios, de los equipos o instalaciones requeridas, etc.

- Coste de mantenimiento por hora de operación del sistema (Maintenance mean cost per operating hour, **MMC/OH**). Esta figura de mérito es especialmente importante en sistemas comerciales (fines lucrativos), ya que es un elemento básico en los cálculos de rentabilidad.
- Coste anual de mantenimiento (Annual maintenance cost, AMC). Este parámetro es especialmente importante para realizar presupuestos anuales de costes operación y mantenimiento de sistemas.
- Relación de coste de mantenimiento al coste de ciclo de vida (Ratio of maintenance cost to life-cycle cost, **MC/LCC**). Esta figura de mérito indica la contribución del mantenimiento al coste de ciclo de vida del sistema.

2.2.5 Factores adicionales a la mantenibilidad.

Es evidente del análisis del proceso de mantenimiento llevado a cabo, que hay varios factores adicionales que están estrechamente relacionados con las medidas de mantenimiento, de las que dependen considerablemente. Según Blanchard (4) se incluyen varios factores logísticos, como:

1. Respuesta de aprovisionamiento o probabilidad de tener un repuesto disponible cuando se necesite, tiempos de demora en la entrega de ciertos elementos, niveles de inventario, etc.
2. Efectividad de equipos de prueba y apoyo, fiabilidad y disponibilidad del equipo de prueba, uso del equipo de prueba, minuciosidad de la prueba del sistema, etc.
3. Disponibilidad y uso de las instalaciones de mantenimiento.
4. Tiempos de transporte entre las instalaciones de mantenimiento.
5. Eficacia de la organización del mantenimiento y del personal.

Hay muchos otros factores logísticos que deben ser especificados, medidos y controlados si se quiere cumplir la misión primordial.

La mantenibilidad, como característica de diseño, está estrechamente relacionada con el área del apoyo del sistema, ya que los resultados de la mantenibilidad afectan directamente a los requisitos de mantenimiento. Así, cuando se especifican los factores de la mantenibilidad, se deben también considerar los requisitos cualitativos y cuantitativos para apoyo del sistema, a fin de determinar los efectos de un área en otra.

2.3 Datos empíricos para las medidas de la mantenibilidad

Durante las fases de diseño, adquisición y fundamentalmente operación de los sistemas los ingenieros de mantenibilidad y técnicos de mantenimiento realizan ensayos y toman datos relativos al tiempo necesario para completar la tarea de mantenimiento considerada. Así, el producto final de este esfuerzo es una serie de números t_{tr} que representan, cada uno de ellos, el tiempo necesario para completar con éxito la tarea analizada. Estos datos son el punto de partida para la inferencia estadística a utilizar en el análisis de la mantenibilidad.

2.3.1 Posibles métodos de análisis de los datos existentes.

La inferencia estadística es, en general, un proceso para sacar conclusiones sobre una población completa de objetos, acontecimientos o tareas similares, basándose en una muestra pequeña. Se usan principalmente los dos siguientes métodos de inferencia estadística.

- a) Paramétrico, que está asociado principalmente con la inferencia sobre determinadas medidas características de las distribuciones (media, varianza, etc.). Este método está basado en suposiciones explícitas sobre la normalidad de las distribuciones y los parámetros de la población.
- b) Ajuste de distribución, que está asociado con la inferencia sobre la distribución total de probabilidad, libre de suposiciones relativas a los parámetros de la población estudiada.

2.3.2 Método paramétrico.

Siguiendo los principios estadísticos principales de interés para el método paramétrico, basados en el teorema central del límite, en la práctica actual de la ingeniería de mantenibilidad se calcula el valor numérico del tiempo medio de recuperación, $MTTR^*$, de una determinada muestra de tamaño n , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$MTTR^* = \sum_{i=1}^n \frac{t_{tr_i}}{n}$$

Como el resultado obtenido representa el valor medio de esta muestra en particular, seleccionada al azar, es necesario determinar el intervalo en el que se encuentra la media de la población global. Por eso, si se está preparado para aceptar la posibilidad de estar equivocado, por ejemplo el 10 % de las veces, que corresponde al 90 % del límite de confianza, entonces se deberá determinar el límite superior del tiempo medio de reparación, $MTTR^U$ de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$MTTR^u = MTTR^* + z\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

donde: σ representa la desviación típica de los datos empíricos obtenidos, σ/\sqrt{n} se conoce como error típico, y el valor de z se elige de la tabla de la distribución Normal, basado en el nivel de confianza deseado. Esto quiere decir prácticamente que, por ejemplo para $z=1,28$, hay un 90% de posibilidades de que el MTTR de la población total sea menor que el valor obtenido para $MTTR^u$.

Una vez que se han calculado los valores numéricos de $MTTR^*$ y de σ de acuerdo con esta aproximación, el tiempo máximo de mantenimiento, M_{max} , puede obtenerse según la siguiente expresión:

$$M_{max} = \text{antilog}(\log MTTR^* + 1,65 \times \sigma_{\log(t_{tr_i})})$$

donde $\sigma_{\log(t_{tr_i})}$ es la desviación típica del logaritmo de los valores iniciales de t_{tr_i} , para $i = 1, 2, \dots, n$. La expresión para el cálculo de $\sigma_{\log(t_{tr_i})}$ se puede encontrar en [2]. Según [4], el análisis de los datos de mantenibilidad específica relativos a M_{max} , muestra variaciones desde 2,4 a 4 veces el $MTTR^*$, dependiendo de la desviación típica.

Sin embargo, siendo conscientes del volumen de conocimiento estadístico disponible y su gran cantidad de aplicaciones en muchas disciplinas científicas, es necesario resaltar que:

la ecuación anterior, que se usa en los cálculos de mantenibilidad práctica, carece de justificación teórica para una aplicación universal y por tanto, debe tratarse con una precaución extrema en la práctica diaria de ingeniería.

Las medidas de mantenibilidad como función de mantenibilidad, realización de la recuperación, etc., no pueden calcularse de ninguna manera si adoptamos este método.

A pesar de estas limitaciones, el método paramétrico, descrito anteriormente, ha sido:

- a) recomendado por normas militares existentes;
- b) promovido por la literatura técnica; y
- c) adoptado por muchos clientes/usuarios como principal requisito contractual relativo a temas de mantenibilidad en un gran número de proyectos.

2.3.3 Método de ajuste

Generalmente, los datos empíricos disponibles capturan mucha más información que aquella que puede revelar el método paramétrico descrito anteriormente. Para usar a fondo la información contenida en los datos de mantenibilidad existentes, debe aplicarse a su análisis el método de ajuste de distribución. Según este método, las medidas de mantenibilidad se expresan mediante la distribución de probabilidad del tiempo de recuperación, TTR, que se trata como una variable aleatoria de distribución no predeterminada. Las investigaciones muestran que el tipo de distribución y sus parámetros ejercen una influencia significativa en las medidas de mantenibilidad. Este método revela una mejora importante en la eficacia de la información extraída de los datos empíricos existentes.

De acuerdo con el método del ajuste de distribución, los datos de mantenibilidad existentes se usan como base para la selección de una de las distribuciones de probabilidad teórica, como: Weibull, normal, exponencial, logarítmico-normal, etc., para modelizar con más precisión la tarea de mantenimiento considerada. Esto puede lograrse aplicando uno de los métodos siguientes:

- Gráfico, donde se usan papeles especiales de probabilidad como herramienta para la inferencia estadística.
- Grafo-analítico, donde se apoya el método gráfico con algunas técnicas analíticas para aumentar la precisión de la inferencia estadística.
- Analítico, donde se emplea el procedimiento matemático riguroso para suministrar un alto nivel de precisión del proceso de inferencia.

El resultado final es la selección de la familia más adecuada, entre las distribuciones teóricas de probabilidad existentes, para la modelización de la tarea de mantenimiento considerada, y la determinación de los parámetros correspondientes que definen totalmente el miembro específico de esa familia. Para esta actividad existen ayudas informáticas que permiten obtener los resultados con rapidez y eficacia.

Es necesario hacer hincapié en que el método de ajuste de distribución para los análisis de mantenibilidad no requiere ningún tiempo adicional de ensayos, lo que significa en la práctica que toda la información adicional puede obtenerse sin un coste adicional de ensayos.

En el futuro, al reducirse la inversión en los recursos necesarios para la operación y mantenimiento de equipo moderno y complejo, será mayor el nivel de mantenibilidad/disponibilidad requerido. Consecuentemente, tendrá un importante papel a jugar la eficacia del método elegido para el análisis de los datos de mantenibilidad.

3. INGENIERÍA DE MANTENIBILIDAD

3.1 Generalidades

Tanto la Ingeniería de Sistemas como la estrategia industrial "Ingeniería Concurrente" exigen la introducción de métodos de análisis de fiabilidad y mantenibilidad en la concepción, diseño, fabricación e instalación de sistemas y que, aunque se las debe conceptuar como dos disciplinas de la Ingeniería de Sistemas, también se las denomina como Ingenierías de Fiabilidad y Mantenibilidad dada la especialización y actividades que comportan.

La *Ingeniería de Mantenibilidad* surgió como respuesta a cuestiones tales como: ¿Cuánto tiempo va a estar inoperativo un sistema?, ¿Cuánto van a durar las tareas de mantenimiento?, o ¿Cómo se pueden reducir los costes de mantenimiento?, y se la definió como "*una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la operatividad de un sistema, y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación, predicción y mejora*". Su objetivo fundamental es preparar los equipos/sistemas, durante el proceso de obtención, para un mantenimiento eficaz al coste.

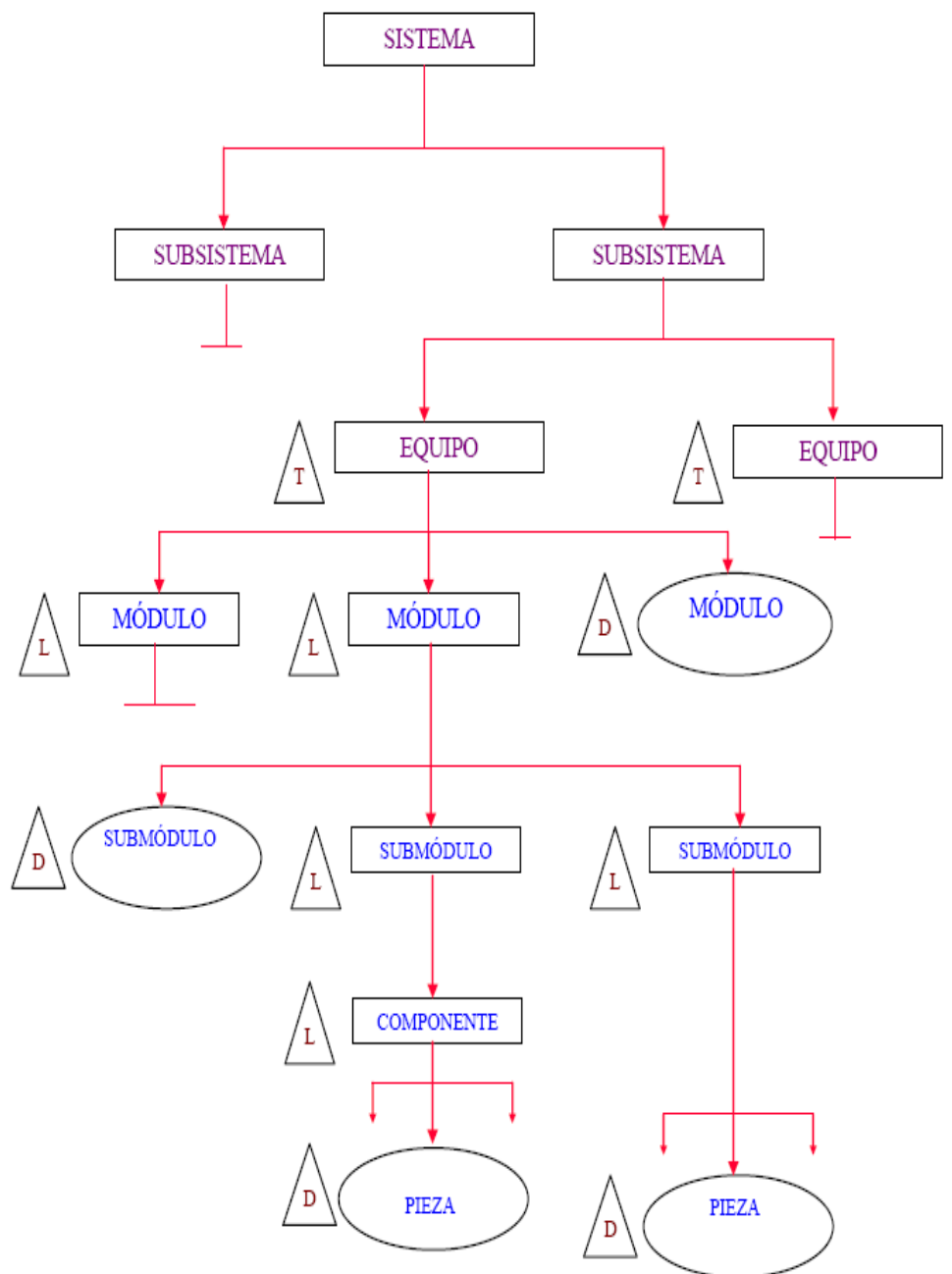
La Ingeniería de Mantenibilidad agrupa una serie de métodos científicos (la estadística, como ya hemos visto) y prácticas ingenieriles (reparto de objetivos, utilización de modelos a escala, criterios de diseño, etc.) que tienen como objetivo influir en el diseño de los sistemas con el propósito de optimizar su plan de mantenimiento y conseguir así una alta disponibilidad del mismo al menor coste posible. La Ingeniería de Mantenibilidad se lleva a efecto, en cada programa de obtención de sistemas, mediante el correspondiente Plan (o programa) de Mantenibilidad, el cual especifica todas las actividades que han de ser desarrolladas por el grupo de mantenibilidad (Ingenieros, técnicos, etc.). Durante la fase de utilización del sistema, los grupos de mantenimiento que han de llevar a efecto el plan de mantenimiento del mismo, desarrollan actividades de ingeniería de mantenibilidad cuando actualizan el plan de mantenimiento y lo optimizan progresivamente mediante cambios en los métodos de realización de las tareas de mantenimiento que reducen, en base a la experiencia, los tiempos requeridos por las mismas.

Los requisitos de mantenibilidad, ya sean impuestos o creados, no son sagrados, y se deben someter a crítica periódicamente. Esta crítica de la necesidad y validez de todos y cada uno de los requisitos de diseño (incluidos los de mantenibilidad) es el elemento básico de la función de ingeniería de costes. Así, la eliminación de requisitos de mantenibilidad innecesarios e irrelevantes durante las etapas iniciales de un programa, pueden ahorrar tiempo, esfuerzo y dineros considerables, así como incrementar la cantidad de recursos que se pueden concentrar en la solución de otros problemas de diseño.

En el diseño de un sistema complejo es necesario descomponer el requisito, meta u objetivo de mantenibilidad global en objetivos parciales para los elementos del diseño (módulos o equipos independientes). Esta asignación o reparto es realizada normalmente por la función de integración del diseño o lo realiza en su nombre la función de mantenibilidad. Generalmente a las áreas de diseño de

gran complejidad o a aquellas en las que se requieren los mayores avances del estado del arte, se les debe asignar los requisitos de mantenibilidad más bajos posibles, mientras que las áreas de diseño que son sencillas y usan principios de diseño bien conocidos y comprobados, tendrán los requisitos de mantenibilidad más rigurosos.

Los análisis de diseños responsables y completos deben discutir frecuentemente las cifras de mantenibilidad asignadas. A medida que el diseño madura, la gestión de diseño hace normalmente algunos ajustes en los requisitos de mantenibilidad, basándose en el progreso relativo de las diversas áreas de diseño. Se pueden imponer en el diseño limitaciones específicas de mantenibilidad, como parte de un requisito de diseño global. Esto significa que los diseñadores pueden ver prohibido el uso de ciertos elementos de ensamblaje, herramientas, materiales, piezas o procedimientos. Similarmente, mantenibilidad puede exigir también a los diseñadores que sigan determinados procedimientos de mantenibilidad, usen ciertas herramientas, equipos o instalaciones, y sigan ciertas prácticas de diseño.



ELEMENTO NO REEMPLAZABLE



ELEMENTO REEMPLAZABLE



PUNTO PRUEBA (TEST)



PUNTO DE LOCALIZACIÓN DEL FALLO



PUNTO DE AISLAMIENTO DEL FALLO

3.2 Actividades de ingeniería de mantenibilidad.

La Ingeniería de Mantenibilidad está presente en todas las fases del ciclo de vida de los sistemas, desde su concepción inicial hasta su retirada de servicio, ya que los requisitos de mantenibilidad propuestos por los clientes han de ser tratados desde el primer momento. La Tabla 3-1 muestra las principales actividades de la Ingeniería de Mantenibilidad relacionadas con la mantenibilidad, como característica de los sistemas, y el mantenimiento, como conjunto de actividades de apoyo al sistema, en las diferentes fases del ciclo de vida de los sistemas.

Tabla 3-1. Principales actividades de mantenibilidad

1.- ANÁLISIS DE LA NECESIDAD <ul style="list-style-type: none">• Identificación de las características básicas de mantenibilidad requeridas del sistema.• Identificación de las métricas de mantenibilidad aplicables y apropiadas.
2.- ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS <ul style="list-style-type: none">• Establecimiento de requisitos de mantenibilidad del sistema :<ul style="list-style-type: none">- concepto de mantenimiento (o Apoyo)- tiempo medio de tareas de mantenimiento- coste medio de tareas de mantenimiento- mantenimiento por hora de operación del sistema• Requisitos sobre actividades relacionadas con el diseño<ul style="list-style-type: none">- estandarización- accesibilidad- modularización- testabilidad- ergonomía• Elaboración del Programa de Mantenibilidad.• Establecimiento de pruebas de demostración de mantenibilidad.
3.- DISEÑO <ul style="list-style-type: none">• Asignación de objetivos de mantenibilidad• Análisis de mantenibilidad.• Análisis del diseño y actividades relacionadas• Análisis de mantenimiento centrado en la fiabilidad.• Análisis del nivel de reparación.• Evaluación de alternativas (respecto a la mantenibilidad).• Actualización del Programa de Mantenibilidad• Descripción preliminar de las tareas de mantenimiento (borrador de Plan de Mantenimiento)
4.- PRODUCCIÓN <ul style="list-style-type: none">• Demostraciones de mantenibilidad; análisis de datos y adopción de medidas correctoras.• Actualización del Programa de Mantenibilidad• Descripción detallada de las tareas de mantenimiento (Plan de Mantenimiento).
5.- VIDA OPERATIVA <ul style="list-style-type: none">• Validación de predicciones de mantenibilidad.• Toma de datos, análisis, y determinación de las características reales de mantenibilidad del sistema.• Actualización de las tareas de mantenimiento (actualización del Plan de Mantenimiento).
6.- RETIRADA DE SERVICIO <ul style="list-style-type: none">• Toma de datos y análisis final de las características de mantenibilidad del sistema.

El seguimiento de las actividades de ingeniería de mantenibilidad se desarrolla, a lo largo del programa de obtención del sistema, mediante los informes de análisis de mantenibilidad. Un informe de este tipo incluye, normalmente, las siguientes secciones:

- 1) *Introducción*: que describe el sistema o elemento, física y funcionalmente y los requisitos de mantenibilidad globales y repartidos.
- 2) *Conclusiones y Recomendaciones*: que representa la parte más importante del informe, en el que se identifican las áreas de diseño que necesitan mejoras, y proponer esas mejoras para que se tomen medidas correctivas.
- 3) *Diagrama de bloques de mantenibilidad*: que muestra los elementos significativos de mantenimiento del sistema y su situación relativa (serie o paralelo) con respecto a la ejecución de las actividades de mantenimiento de los mismos.
- 4) *Estimación de la mantenibilidad del sistema*: conduce a una estimación numérica de la mantenibilidad del sistema, realizada por el personal de diseño y mantenibilidad. Deben exponerse todas las suposiciones efectuadas durante el proceso de estimación. Se incluyen:

escenario operativo, datos de fiabilidad, características de durabilidad, así como las políticas adoptadas para mantenimiento e inspección.

- 5) *Análisis de mantenibilidad*: contiene información que proviene de ingeniería de fiabilidad (como son los resultados del proceso FMECA), y además informa sobre detección y corrección de fallos, la accesibilidad del sistema o elementos de vida limitada, requisitos de mantenimiento e instrucciones de servicio sugeridas, y recomendaciones logísticas.

3.3 Actuación sobre el diseño.

El desarrollo de las actividades más importantes de la Ingeniería de Mantenibilidad tienen lugar, fundamentalmente, durante la fase de diseño de los sistemas, pero también ha de estar presente en las actividades de los procesos de producción e instalación. Los ingenieros de mantenibilidad actúan sobre los planos de disposición de equipos/sistemas, sobre su topología y sobre la configuración física y espacial de los mismos con objeto de optimizar las actividades de mantenimiento en relación con criterios de diseño tales como:

Estandarización. Entre los criterios de diseño que van a facilitar la optimización del apoyo logístico de los equipos/sistemas, la estandarización de sus componentes es uno de los más importantes, ya que permite reducir drásticamente el coste del apoyo logístico necesario debido a una menor cantidad de adiestramientos, a la consiguiente reducción de los stocks de repuestos y al menor número de herramientas y de documentación necesarios. Adicionalmente, la estandarización o normalización, permite incidir en la simplificación de componentes. Su efecto sobre la mejora del tiempo de mantenimiento se debe fundamentalmente a la especialización del grupo de mantenimiento (similares actividades de mantenimiento, utilización de las mismas herramientas, etc.).

Modularidad. Este criterio de diseño permite concebir y construir los equipos/sistemas mediante módulos que pueden ser sustituidos en las acciones de mantenimiento de primera línea con una mínima cantidad de tiempo, lo que reduce el tiempo de inoperatividad manifiestamente. Los módulos pueden ser, posteriormente, reacondicionados en talleres especializados, para ser reutilizados en una nueva acción de mantenimiento de primera línea.

Accesibilidad. Una de las mayores pérdidas de tiempo que se produce con cierta normalidad en el mantenimiento de sistemas complejos es debida a una inadecuada accesibilidad al equipo o componente a mantener. Esta carencia de accesibilidad no solo obliga a alargar los periodos de inoperatividad, sino que además provoca un mayor consumo de horas/hombre por la necesidad de desmontajes de elementos que impiden dicho acceso. Minimizar esas pérdidas de tiempo es función de los diseñadores y de los ingenieros de mantenibilidad, los cuales a la hora de ubicar los equipos han de tener en cuenta los siguientes aspectos:

- *Áreas de servidumbre.* Se deben prever áreas libres alrededor de los equipos que permitan el desmontaje de módulos o piezas a sustituir en los mantenimientos sin que haya necesidad de desmontaje de otros accesorios o elementos circundantes. Para definir dichas áreas los diseñadores han de tener en cuenta la documentación que aportan los fabricantes de los componentes y ayudarse de los modernos sistemas de CAD en 3D.
- *Remoción.* Para aquellos equipos que tengan un mantenimiento por sustitución completa, según el plan de mantenimiento previsto, habrá que prever una fácil desconexión y/o desernado así como el espacio circundante necesario para su fácil evacuación.
- *Rutas de Desmontaje.* En ciertos sistemas complejos - central nuclear, buque de guerra, avión, etc. - es normal que haya equipos que no puedan ser mantenidos "in situ", por lo que es necesario transportarlos a talleres exteriores a los mismos. Para ello se han de diseñar las rutas por donde han de transcurrir las evacuaciones de los mismos a través de los recintos del resto del sistema. Estas rutas deben cumplir, como mínimo, con las siguientes condiciones:

- 1.- Han de ser fácilmente despejables.
- 2.- Deben contar con los medios adecuados de transporte.

En ciertos sistemas complejos la definición de las Rutas de Desmontaje debe informar sobre los siguientes aspectos:

- a) Equipos a los que apoya la ruta, sus dimensiones y peso.
 - b) Locales donde se encuentran ubicados los equipos.
 - c) Medios con los que cuenta la ruta para el transporte de los equipos, como pueden ser cáncamos, carretillas, polipastos, escaleras, etc.
 - d) Elementos restrictivos de las rutas como pueden ser puertas, muros, escaleras, etc.
 - e) Elementos fijos que interfieren las rutas, como tuberías, cableados, equipos, etc. los cuales han de poder ser desmontados con facilidad.
- *Control y Observación.* Para los equipos que requieran un control de su estado mediante indicadores, situados sobre los mismos, estos han de ser visibles para el controlador. Si el análisis de la condición se realiza mediante aparatos portátiles de prueba, el aspecto más importante a tener en cuenta por los ingenieros de mantenibilidad es que el aparato pueda ser conectado al equipo con la mayor facilidad posible y con los mínimos problemas de accesibilidad a los puntos de conexión.

Testabilidad. Es la cualidad de ciertos equipos, fundamentalmente los electrónicos, para poder ser analizados e inspeccionados, sin necesidad de desmontajes, mediante Built-in Test Equipment (BITE) o Automatic Test Equipment (ATE). Esta cualidad nos permitirá conocer la condición de estado así como captar ciertos síntomas que nos permiten determinar fallos potenciales antes de que ocurra la avería y por lo tanto se podrán reducir los mantenimientos preventivos programados del equipo.

Los análisis de vibraciones en equipos rotativos, mediante el correspondiente ATE, es uno de los métodos de mantenimiento basados en la condición que más están evolucionando actualmente y cuya aplicación ha tomado un auge muy considerable en los últimos años.

Ergonomía. Al considerar las interfaces de usuarios y personal de mantenimiento con el sistema, se deben tener en cuenta las características antropomórficas del hombre. Por consiguiente, el objetivo principal del análisis ergonómico sobre la configuración de diseño y en relación con la mantenibilidad, es evaluar el acceso al sistema, la localización, la disposición, el peso y el tiempo de reparación y verificar que el diseño propuesto para el nuevo sistema permitirá al personal de mantenimiento acceder, retirar e instalar equipos con eficacia, dentro de los límites de trabajo del sistema y de su entorno de mantenimiento operativo.

En el caso de equipos y sistemas complejos y de alta tecnología, como pueden ser los motores de aviación, automóviles, sistemas de combate, aviones y buques de guerra, etc., los ingenieros de mantenimiento recurren a modelos a escala (Hard o Soft) e incluso a prototipos para una mejor actuación sobre la disposición de los componentes y en relación con los criterios de diseño anteriormente indicados. También, durante esta actuación, se toman los datos necesarios para el diseño de las herramientas especiales requeridas para las acciones de mantenimiento.

3.4 La mantenibilidad la fiabilidad y la soportabilidad

El objetivo de la mantenibilidad en el contexto de la ingeniería de sistemas es ayudar a que los sistemas alcancen la disponibilidad deseada por los usuarios, facilitando la consecución de la efectividad adecuada a un coste del ciclo de vida razonable. Esa contribución se logra tanto con la ejecución de tareas que eviten la aparición de fallos como con la de otras que devuelvan el sistema a estado operativo, una vez que éste haya fallado. Para definir esas tareas es necesario conocer previamente qué puede fallar y cómo puede hacerlo. Es aquí donde se manifiesta la integración de las disciplinas de fiabilidad y mantenibilidad bajo la perspectiva del enfoque sistémico. No es posible

concebir el desarrollo de unos estudios de mantenibilidad de un sistema sin que exista una profunda conexión entre ellos y los análisis de fiabilidad; de hecho, entre ambos tipos de análisis existe una fuerte realimentación, debida a la naturaleza iterativa del diseño (Véase Figura 3-1).

La realización de los estudios de fiabilidad permite identificar qué componentes del sistema pueden fallar, de qué modo y con qué frecuencia pueden hacerlo, y cuál es la severidad o trascendencia de esos modos de fallos tanto en la operatividad del sistema como en la seguridad de sus usuarios. Ese conocimiento es la aportación básica de la fiabilidad a la mantenibilidad en el diseño de los sistemas. Para ello, los modos de fallo son identificados a través de análisis tales como el análisis de modos de fallos, su criticidad y sus efectos (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis, FMECA) o el análisis de árboles de fallos (Failure Tree Analysis, FTA). Esos modos de fallos son después ordenados en base tanto a su probabilidad de ocurrencia como a la severidad de sus efectos. La relación así jerarquizada de modos de fallos permite pasar a identificar, hasta el nivel de profundidad en el estudio de modos de fallos que requiera cada caso concreto, las tareas que pueden desarrollarse para evitar su aparición (mantenimiento preventivo) o las tareas necesarias para subsanar los fallos que se produzcan y devolver así el sistema a estado operativo (mantenimiento correctivo). Aquí es donde el Ingeniero de Mantenibilidad debe decidir si debe seguir adelante con el análisis o proponer una modificación al diseño, si no puede encontrar una tarea de mantenimiento que se oponga al fallo.

A este proceso de identificar las tareas necesarias en función de los modos de fallos considerados se le conoce como análisis de mantenimiento centrado en la fiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM). Una vez que se han identificado las tareas de mantenimiento necesarias, dos análisis adicionales completarán el proceso. Mediante el análisis de tareas de mantenimiento (Maintenance Task Analysis, MTA) se define en detalle el proceso ejecución de cada tarea, identificándose tiempos necesarios, repuestos y consumibles empleados, herramientas requeridas, cualificación necesaria del personal, etc.; y es, durante este proceso, cuando la ingeniería de mantenibilidad debe decidir si el diseño es el adecuado o debe modificarse. El análisis de nivel de reparación (Level Of Repair Analysis, LORA) permite identificar cuál es el nivel de mantenimiento en el que la ejecución de cada tarea resulta óptima, teniendo en cuenta criterios tanto técnicos (disponibilidad de recursos) como económicos.

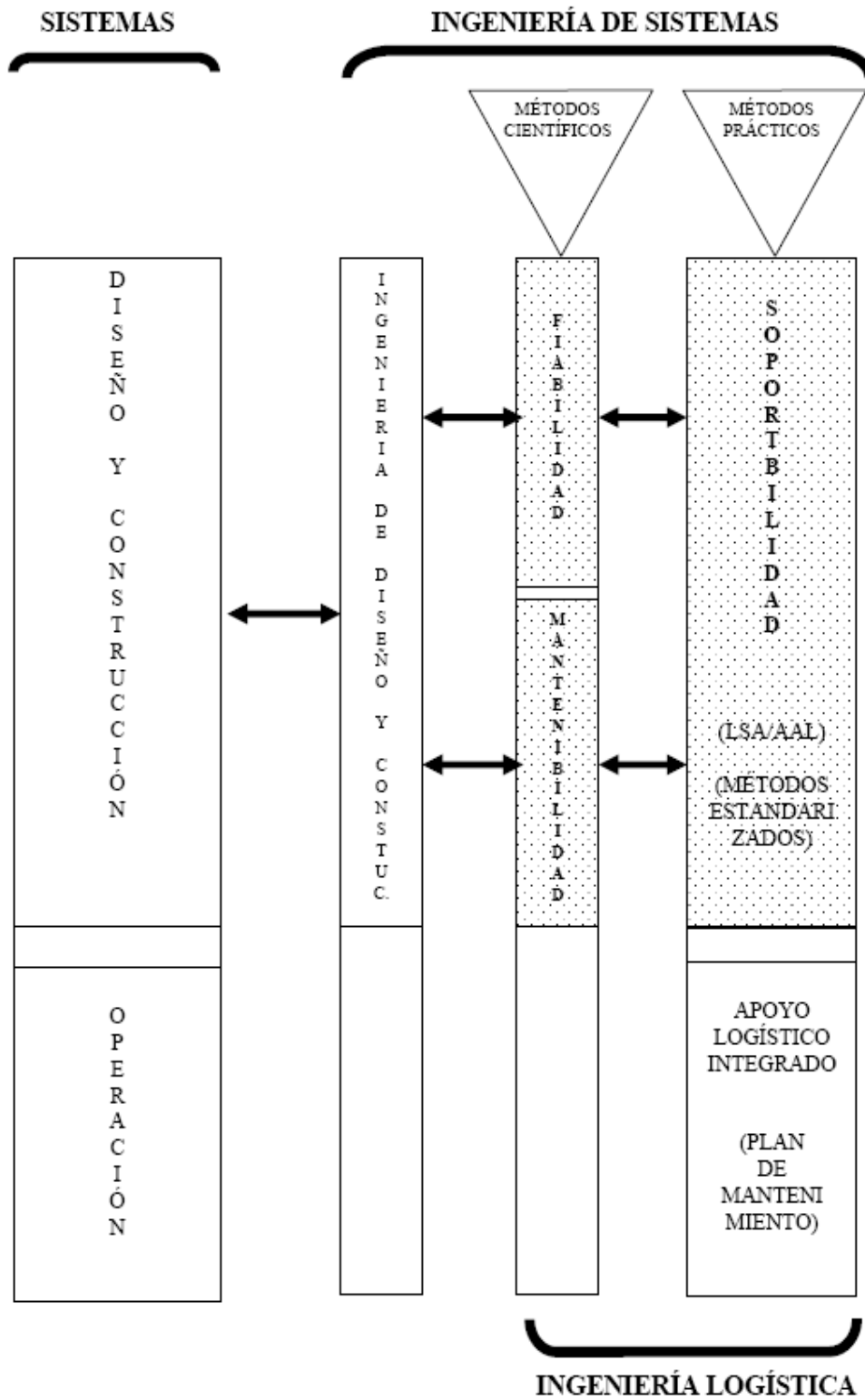


Figura 3-1. Relaciones entre Fiabilidad, Mantenibilidad/Mantenimiento y Soportabilidad

La manera a través de la cual se manifiesta la conexión entre las disciplinas de fiabilidad y mantenibilidad queda ilustrada en la Figura 3-2.

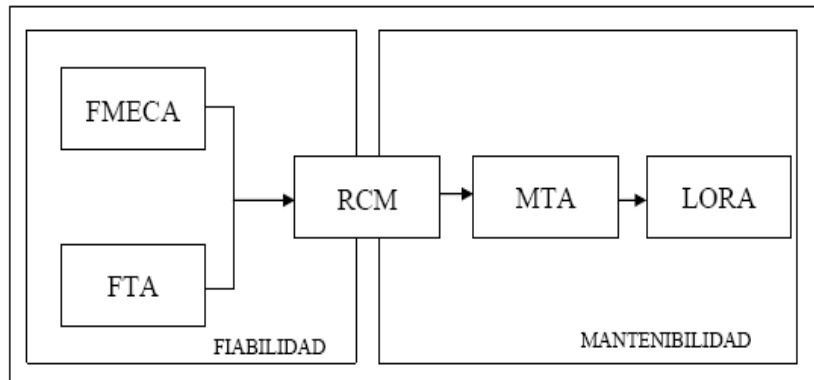


Figura 3-2. La conexión fiabilidad-mantenibilidad.

Es fácil ver la influencia de la fiabilidad en la mantenibilidad, ya que los modos de fallos identificados en la primera son la base para el desarrollo de la segunda. Sin embargo, la influencia es recíproca, dado el carácter evolutivo e iterativo del proceso de diseño. Para una configuración determinada, en un cierto momento del proceso de diseño, podrán identificarse los modos de fallos correspondientes, en base a los cuales se determinarán tentativamente las tareas de mantenimiento (preventivas y correctivas necesarias); si del análisis de ese plan de mantenimiento potencialmente resultante y de sus implicaciones (cualificación de personal, tiempos de indisponibilidad, repuestos, instalaciones, etc.) se derivase una efectividad o unos costes no asumibles por el usuario, debería modificarse el diseño para que la fiabilidad mejorase en la medida adecuada, eliminándose la posible aparición de ciertos modos de fallos o reduciendo su probabilidad de ocurrencia. La realimentación mutua entre los análisis de fiabilidad y los de mantenibilidad se recoge en la Figura 3-3.

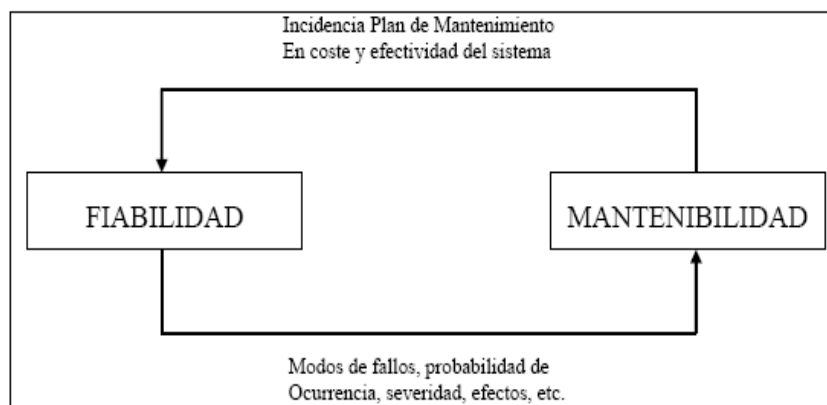


Figura 3-3 - La realimentación mutua fiabilidad-mantenibilidad.

En el contexto de la Ingeniería de Sistemas, durante el último cuarto de siglo, han surgido multitud de disciplinas o también llamadas Ingenierías, entre las que se encuentra la Logística de Sistemas o Ingeniería Logística, la cual pretende agrupar todos los métodos utilizados para obtener el apoyo logístico requerido por los sistemas. Debido a la necesidad de una integración total de los recursos de apoyo, la Ingeniería Logística tiene como objetivo la obtención del Apoyo Logístico Integrado y para lo cual utiliza una herramienta metodológica estandarizada denominada Análisis de Apoyo Logístico (Logistic Support Analysis. LSA).

El LSA tiene como objetivo definir los recursos de apoyo y obtener la base de datos necesaria para gestionar, con el grado óptimo de soportabilidad, todos los recursos requeridos por el Plan de

Mantenimiento del sistema. Funcionalmente el LSA es un conglomerado de métodos y actividades, entre las que se incluyen algunas que pertenecen a otras disciplinas, como es el caso de la:

1.- Fiabilidad.

- Análisis de modos de fallos, sus efectos y su criticidad. (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis, FMECA).

2.- Mantenibilidad

- Mantenimiento centrado en la fiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM)
- Análisis de tareas de mantenimiento (Maintenance Task Analysis, MTA)
- Análisis de nivel de reparación (Level Of Repair Análisis, LORA)

Todo lo cual significa que el LSA, como herramienta metodológica de la Ingeniería Logística, permite introducir la fiabilidad y la mantenibilidad en el diseño de los sistemas, influir en los mismos y además definir su Apoyo Logístico Integrado.

Resumiendo, Debe señalarse que la mayoría de fallos de los sistemas no se producen por un funcionamiento defectuoso de algún dispositivo exótico, cuyo diseño sobrepasa el estado del arte. Más bien, se deben a que las piezas no han sido construidas correctamente, o a que hubo fallos humanos, como un par de apriete defectuoso, un elemento de ensamble sin asegurar o una instalación incorrecta de un dispositivo explosivo. Ningún detalle es demasiado pequeño para que no pueda causar problemas. En gran medida, una alta mantenibilidad, inherente y final, es la consecuencia de una atención cuidadosa al detalle.

La mantenibilidad inherente es la responsabilidad fundamental de la organización de diseño, con el servicio de mantenibilidad actuando como chequeo y equilibrio independiente de la función de diseño, principalmente para asegurar que la función de diseño ha prestado la atención detallada necesaria a la responsabilidad de mantenibilidad. Además, mantenibilidad realiza ciertas funciones en las que su trabajo es inspeccionado por diseño por las mismas razones.

4. ASIGNACIÓN DE LA MANTENIBILIDAD

4.1 Generalidades

Mediante el proceso de asignación se descomponen y distribuyen los requisitos del sistema entre sus componentes, de forma que reunidos, los requisitos asignados cubren los requisitos del sistema global.

La asignación es siempre un proceso de arriba-abajo (top-down) y mediante el mismo, un requisito es distribuido a través del árbol de elementos configurados, es decir, el requisito conocido a nivel de sistema, es trasladando a niveles inferiores de descomposición física o funcional. El proceso inverso a la asignación de requisitos es la evaluación de requisitos que se realiza de abajo-arriba (botton-up); esta permite valorar las alternativas presentadas del sistema, para los requisitos establecidos, y se realiza partiendo de la configuración física real y de las características conocidas de sus elementos integrantes, para así predecir el comportamiento del sistema en relación con los requisitos valorados.

La asignación requisitos es uno de los primeros pasos a dar en el proceso de diseño ya que, con ella, se consigue la selección de objetivos apropiados para el trabajo de los diseñadores de los subsistemas, minimizando o previniendo esfuerzos de diseño inapropiados. En la práctica, alguno de los objetivos asignados en el reparto pueden no ser alcanzables, debiendo revisarse entonces las asignaciones, con los efectos consecuentes en las de otros si, previamente, no se estableció algún criterio de compensación entre las asignaciones no alcanzables y las rebasables. Por ello, la asignación es un proceso iterativo.

La asignación de la mantenibilidad:

- Permite distribuir a niveles inferiores los requisitos de mantenibilidad del sistema.
- Permite que los diseñadores y subcontratistas trabajen en objetivos de mantenibilidad para sus subsistemas.
- Proporciona puntos de referencia para evaluar el nivel de realización de mantenibilidad de elementos componentes, en los hitos específicos del programa.
- Proporciona puntos de referencia para evaluar el nivel de realización de mantenibilidad de elementos componentes, en los hitos específicos del programa.
- Previene o reduce esfuerzos de diseños excesivos e inadecuados.
- Ayuda a la satisfacción de requisitos de mantenibilidad del sistema.
- Permite la evaluación inicial de la viabilidad de obtención de los requisitos de mantenibilidad del sistema, utilizando un determinado método de diseño.
- Suministra una línea maestra inicial para los aspectos de mantenibilidad del diseño propuesto, permitiendo así análisis iniciales de los requisitos de apoyo, etc.

La ingeniería de mantenibilidad lleva a efecto el proceso de asignación del requisito de mantenibilidad mediante métodos existentes, que normalmente figuran en normativa de tipo civil, militar y en algunos casos en publicaciones técnicas. Veamos alguno de ellos.

4.2 Asignación basada en la tasa de fallos

Tanto Blanchard en "Logistics Engineering and Management" como la British Standard 6548 proponen un método de asignación de mantenibilidad que incorpora la contribución de la tasa de fallos del elemento componente a la tasa de fallos del sistema global, y el requisito de mantenibilidad (normalmente el MTTR) del sistema. La metodología aplica el principio general de que los elementos que tienen una contribución mayor a la tasa de fallos del sistema, tengan una asignación menor del objetivo de MTTR.

La asignación puede ser realizada mediante un proceso iterativo (como propone Blanchard) o mediante una asignación directa según la BS 6548. La formulación de la asignación es la siguiente:

1- Para un proceso iterativo de asignación a todos los elementos del sistema. El proceso permite continuas reasignaciones y evaluaciones, por posibles restricciones económicas o tecnológicas, hasta llegar a una solución aceptable:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i MTTR_i}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}$$

Donde k es el número de tipos diferentes de elementos considerados en el sistema, λ_i es la tasa de fallos del elemento i-ésimo y n_i es la cantidad del elemento i-ésimo en el sistema.

2- Para cálculo directo en un diseño nuevo. Cuando no se dispone de conocimientos previos sobre las características de la mantenibilidad de los distintos elementos componentes:

$$MTTR_i = \frac{MTTR \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}{k n_i \lambda_i} = MTTR \omega_i$$

Explicación del procedimiento:

$$MTTR = \frac{n_1 \lambda_1 MTTR_1 + n_2 \lambda_2 MTTR_2 + \dots + n_k \lambda_k MTTR_k}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}$$

$$MTTR = \alpha_1 MTTR_1 + \alpha_2 MTTR_2 + \dots + \alpha_i MTTR_i + \dots + \alpha_k MTTR_k$$

$$\alpha_i = \frac{n_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i} \quad MTTR_i = MTTR \omega_i$$

$$MTTR = \alpha_1 \omega_1 MTTR + \alpha_2 \omega_2 MTTR + \dots + \alpha_i \omega_i MTTR + \dots + \alpha_k \omega_k MTTR$$

$$MTTR = (\alpha_1 \omega_1 + \alpha_2 \omega_2 + \dots + \alpha_i \omega_i + \dots + \alpha_k \omega_k) MTTR$$

$$(\alpha_1 \omega_1 + \alpha_2 \omega_2 + \dots + \alpha_i \omega_i + \dots + \alpha_k \omega_k) = 1$$

$$1 = \frac{n_1 \lambda_1 \omega_1 + n_2 \lambda_2 \omega_2 + \dots + n_i \lambda_i \omega_i + \dots + n_k \lambda_k \omega_k}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}$$

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}{k n_i \lambda_i}$$

3- Para cálculo directo en un diseño parcialmente nuevo. Cuando se dispone de conocimientos previos sobre las características de la mantenibilidad de algunos (l elementos) de los distintos (k) elementos componentes:

$$MTTR_i = \frac{\left[\begin{matrix} k & l \\ MTTR \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i - \sum_{j=1}^l n_j \lambda_j MTTR_j \end{matrix} \right]}{(k-l) n_i \lambda_i}$$

4.3 Asignación basada en la frecuencia en las tareas

En este método no se “reparte” directamente un objetivo de mantenibilidad, sino que en base a las tasas medias de frecuencia de las tareas de los módulos que forman el primer nivel de descomposición del sistema se consideran unos valores posibles de mantenibilidad de dichos módulos (en base a experiencia histórica) y entonces se comprueba si con tales valores se alcanzaría el objetivo de mantenibilidad a nivel sistema. En este sentido, el proceso de asignación no tiene una solución única,

y las posibles soluciones se obtienen por tanteos o pruebas. Como se puede ver, es un proceso similar al propuesto por Blanchard.

Vamos a mostrar el método con un ejemplo. Consideremos un sistema para el que se requiere un tiempo medio de ejecución de tareas de mantenimiento correctivo igual o inferior a 0.5 horas; supongamos además que el sistema consta de tres subsistemas, cuyas tasas de frecuencia de tareas (supuestas constantes) son 0.246, 1.866 y 0.11 tareas por 1000 horas de funcionamiento. Supongamos ahora que en base a experiencia histórica con subsistemas similares los tiempos medios de ejecución de las tareas de mantenimiento correctivo de los tres subsistemas son 0.9, 0.6 y 1.1 horas; la Tabla 4.1 muestra los cálculos correspondientes.

Tabla 4.1.- Prueba # 1 de asignación de objetivo de mantenibilidad.

Subsistema	Cantidad / sistema	Tasa de f. de t. (1000 hrs)	Contrib. tareas.	Porcentaje contrib. tareas	MTTR Estimado (horas)	Contrib. tiempo manteni. correctivo
Subsist. 1	1	0.246	0.246	11	0.9	0.221
Subsist. 2	1	1.866	1.866	84	0.6	1.119
Subsist. 3	1	0.110	0.110	5	1.1	0.121
TOTAL			2.222			1.461

Como $1.461/2.222 = 0.65$ horas, dicha “asignación” de objetivos de mantenibilidad no es satisfactoria.

Consideremos ahora que, también en base a experiencia histórica con subsistemas similares, los tiempos medios de ejecución de las tareas de mantenimiento correctivo de los tres subsistemas sean 0.85, 0.4 y 0.9 horas; la Tabla 4.2 muestra los cálculos correspondientes.

Tabla 4.2.- Prueba # 2 de asignación de objetivo de mantenibilidad.

Subsistema	Cantidad / sistema	Tasa de f. de t. (1000 hrs)	Contrib. tareas.	Porcentaje contrib. tareas	MTTR Estimado (horas)	Contrib. Tiempo Manteni. Correctivo
Subsist. 1	1	0.246	0.246	11	0.85	0.209
Subsist. 2	1	1.866	1.866	84	0.4	0.746
Subsist. 3	1	0.110	0.110	5	0.9	0.099
TOTAL			2.222			1.054

Como $1.054/2.222 = 0.47$ horas, dicha “asignación” de objetivos de mantenibilidad puede considerarse satisfactoria.

4.4 Asignación basada en los costes de las tareas.

En este método se asignan tiempos objetivo de ejecución de tareas de mantenimiento en base a un objetivo global de coste, unos niveles relativos de dificultad de ejecución de las tareas y sus frecuencias relativas de ejecución. Vamos a mostrar su aplicación a través de un ejemplo. Consideremos un equipo, formado por cinco componentes, para el que existe un objetivo de coste medio por tarea de mantenimiento, de 1000 unidades, siendo el coste de los técnicos de mantenimiento el de 200 unidades/hora. Las frecuencias relativas de ejecución de las tareas de mantenimiento asociadas a esos componentes son 0.20, 0.25, 0.35, 0.05, 0.15 y los respectivos niveles de dificultad de

ejecución de las tareas son 0.15, 0.17, 0.23, 0.25 y 0.20. Con dicha información construimos la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Asignación de mantenibilidad basada en el coste.

Equipo	Frecuencia relativa ejecución tareas (F)	Dificultad relativa ejecución tareas (D)	(F x D)	Asignación coste	Coste de mano de obra (unidades)	Tiempo objetivo de ejecución (horas)
Comp. #1	0.20	0.15	0.0300	767.2620	517.2620	2.58
Comp. #2	0.25	0.17	0.0425	869.5636	739.5636	3.70
Comp. #3	0.35	0.23	0.0805	1176.4684	711.4684	3.56
Comp. #4	0.05	0.25	0.0125	1278.7700	938.7700	4.70
Comp. #5	0.15	0.20	0.0300	1023.0160	828.0160	4.14
Totales	1	1	0.1955	5115.0800		

Los valores de asignación de coste se obtiene multiplicando los niveles relativos de dificultad de ejecución de las tareas por el valor obtenido al dividir el objetivo de coste (1000 unidades) por la suma de productos de frecuencias y dificultades relativas de ejecución (0.1955), que en este ejemplo resulta ser igual a 5115.08.

Finalmente, se ha considerado que el coste de los repuestos y consumibles a ser empleados en la reparación de cada uno de los cinco componentes del sistema son 250, 130, 465, 340 y 195 unidades, respectivamente. Dichos costes se restan de las asignaciones de coste por tarea, obteniéndose así la columna de coste objetivo de mano de obra por tarea de mantenimiento. Finalmente, la división de los valores anteriores por el coste horario de los técnicos de mantenimiento permite obtener los valores buscados de objetivo de tiempos de ejecución de las tareas para los diferentes componentes.

Explicación del procedimiento:

Supongamos que en un tiempo T realizamos un determinado número de tareas de mantenimiento ($n_i = f_i \cdot T$) cuyo coste total es C_{NT} . Por lo que el coste medio de cada actividad de mantenimiento será:

$$C_o = C_{NT} / \sum (f_i \cdot T), \quad \text{que es el objetivo que nos hemos propuesto} \\ \text{(1000 unidades de coste)} \\ f_i = \text{Frecuencia de la tarea de mantenimiento.}$$

$C_{NT} = \sum (f_i \cdot T) \cdot C_{Ti}$, donde C_{Ti} es el coste por cada tipo de tarea de mantenimiento de los componentes, es decir un tipo de tarea de mantenimiento por cada componente (reparación de cada componente).

$$C_{Ti} = C_o \cdot \omega_i; \quad \text{donde } \omega_i \text{ es el factor de peso.}$$

Tomemos ahora, para nuestros cálculos, un valor constante y único, que representa la suma de los costes de todos y cada uno de los tipos de tareas de mantenimiento, al que denominaremos C_{TT} , pues bien, mediante este valor y conociendo el factor de complejidad/dificultad relativo ($\theta_i =$ valores de la columna D) de cada tipo de tarea de mantenimiento, tenemos:

$$C_{Ti} = C_{TT} \cdot \theta_i; \text{ y ocurre que } \sum C_{Ti} = C_{TT} \text{ para la suma de todos los tipos de tareas}$$

$$\sum C_{Ti} = C_{TT} = \sum C_{TT} \cdot \theta_i = C_{TT} \cdot \sum \theta_i; \sum \theta_i = 1$$

Si reunimos las anteriores ecuaciones tenemos:

$$C_o = C_{NT} / \sum (f_i \cdot T) = \sum (f_i \cdot T) \cdot C_{Ti} / \sum (f_i \cdot T) = \sum [(f_i \cdot T) / \sum (f_i \cdot T)] \cdot C_{Ti} = \sum [(f_i \cdot T) / \sum (f_i \cdot T)] \cdot C_{TTT} \cdot \theta_i = \sum \alpha_i \cdot C_{TTT} \cdot \theta_i = C_{TTT} \sum \alpha_i \cdot \theta_i$$

Donde $[(f_i \cdot T) / \sum (f_i \cdot T)] = \alpha_i$, frecuencia relativa de cada tarea (valores de la columna F) que cumple con $\sum \alpha_i = 1$

Por lo que resulta que:

$$C_{TTT} = C_o / \sum \alpha_i \cdot \theta_i; \quad C_{Ti} = [C_o / \sum \alpha_i \cdot \theta_i] \cdot \theta_i$$

$$C_{Ti} = C_o [\theta_i / \sum \alpha_i \cdot \theta_i]; \quad C_{Ti} = C_o \cdot \omega_i; \quad \omega_i = \theta_i / \sum \alpha_i \cdot \theta_i$$

4.5 Asignación basada en la programación lineal (PL)

Al intentar interpretar un problema de asignación de mantenibilidad como un problema de programación lineal, puede verse que la función objetivo es la representación matemática del modelo de mantenibilidad del sistema, y que las restricciones incluyen el requisito de MACMT del sistema, el tiempo máximo permisible de mantenimiento, el tiempo mínimo de mantenimiento y la contribución proporcional de los elementos componentes al tiempo de mantenimiento del sistema global. Puede verse también que, puesto que consideramos la asignación de tiempo, la variable implicada es tiempo (medido en horas o minutos) y no puede ser negativa, por lo que se satisfacen las limitaciones de no-negatividad.

Una vez que se ha formulado el modelo inicial de PL, basado en el algoritmo propuesto por Hunt, pueden variarse las restricciones, volver a lanzar el modelo y evaluar el impacto de estos cambios en los otros elementos del sistema y en el grado de satisfacción de los requisitos del sistema. Este método puede usarse para evaluar diversas características incluyendo:

- los efectos de variables conocidas o impuestas,
- los efectos de disminuir o aumentar los valores máximos permisibles de los tiempos de mantenimiento,
- el efecto de aumentar o disminuir los valores mínimos factibles de los tiempos de mantenimiento,
- los efectos de factores de complejidad alternativos,
- la sensibilidad del grado de satisfacción de requisitos del sistema respecto a los cambios, y la identificación de áreas críticas.

Las alteraciones necesarias del modelo de PL se realizan fácilmente, asumiendo que se usa un paquete de «software», aunque se requiere algún conocimiento básico de programación lineal, tanto para corregir el modelo como para interpretar los resultados.

Las ventajas principales de un método de asignación de mantenibilidad basado en la programación lineal son las siguientes:

- Permite evaluar alternativas de compromiso de fiabilidad y mantenibilidad, es decir, ayuda a evaluar el impacto de los compromisos en los requisitos de fiabilidad y mantenibilidad del sistema y subsistema.
- Permite la variación independiente de los parámetros del elemento componente, y la evaluación de los efectos de estas variaciones.
- Es flexible y puede adaptarse para diferentes escenarios, mediante la modificación del modelo de PL.
- Permite el establecimiento de valores máximos y mínimos.

- Permite modelizar el sistema de forma que su tamaño no tenga un efecto perjudicial en los cálculos.
- Permite considerar factores de complejidad.
- Permite considerar factores alternativos de complejidad que pueden deducirse de otros parámetros distintos de la tasa de fallos, como el número de componentes, volumen, etc. Sin embargo, la función objetivo puede tener que redefinirse para satisfacer estos «nuevos» factores.
- Permite insertar datos conocidos o el conocimiento previo de un elemento.
- Minimiza la excesiva fiabilidad inicial en estimaciones subjetivas, conservando suficiente flexibilidad para acomodar datos de esas fuentes si se quiere.
- Produce resultados que pueden repetirse.
- Se puede utilizar con una mínima información en una etapa inicial de diseño, y producir información para el planteamiento inicial de objetivos, la evaluación de las opciones de apoyo, etc. Esta información puede refinarse progresivamente según se requiera.

A pesar de las ventajas listadas anteriormente, hay algunas desventajas en el uso de la programación lineal, que tienen que ver principalmente con la interfase de usuario y pueden resumirse como sigue:

- La programación lineal puede ser compleja y, para problemas prácticos, no se realiza fácilmente en una calculadora científica normal. Generalmente es esencial el uso de paquetes de «software» y al menos un ordenador personal
- La modificación del modelo de PL requiere conocimientos de esta disciplina, aunque generalmente se necesita solamente un nivel relativamente básico.
- Los resultados generados en la PL requieren una interpretación y se necesita algún conocimiento de PL. El nivel de este conocimiento depende de la complejidad del modelo, pero para la mayoría de modelos de esta aplicación bastará un conocimiento básico.

5. PREDICCIÓN DE LA MANTENIBILIDAD

5.1 Generalidades

El mayor reto al que deben enfrentarse los ingenieros de mantenibilidad es la predicción rápida y precisa de las medidas de mantenibilidad de las futuras tareas de mantenimiento en las etapas de diseño; cuando es posible hacer cambios y modificaciones sin un coste adicional significativo.

El diseño de sistemas es un proceso iterativo, y parte del proceso consiste en determinar si la configuración (o configuraciones) en estudio satisfacen los objetivos especificados. Las predicciones de la mantenibilidad, permiten comprobar si se cumplen o no los objetivos esperados y tomar, si es necesario las medidas correctoras apropiadas. Dado que la mantenibilidad de un sistema no se evalúa sólo en lo relativo al tiempo de ejecución de las tareas, sino que también se tiene en cuenta sus frecuencias de ejecución, la carga de trabajo que representan, sus costes, etc., en las predicciones de mantenibilidad será necesario considerar todos los aspectos relevantes que indiquen la facilidad con la que el mantenimiento del sistema podría realizarse para la configuración estudiada.

5.2 Métodos de predicción

Para la aplicación de los métodos de predicción es necesario:

- a) tener en cuenta la combinación entre tarea de mantenimiento y elemento a mantener, ya que no es lo mismo sustituir una pieza en un módulo (reparar un módulo) que sustituir un módulo en un equipo (reparar un equipo) o que se sustituya un equipo de un sistema (reparación del sistema) y

b) disponer de una base de datos de mantenibilidad de tareas de mantenimiento.

Para poder llegar a predecir la mantenibilidad de un sistema será necesario, mediante un análisis "bottom-up", predecir la de cada uno de sus componentes y para cada uno de ellos conocer los datos de mantenibilidad de cada una de las tareas de mantenimiento que requiere. Veamos los métodos más utilizados.

5.2.1 Por actividades elementales

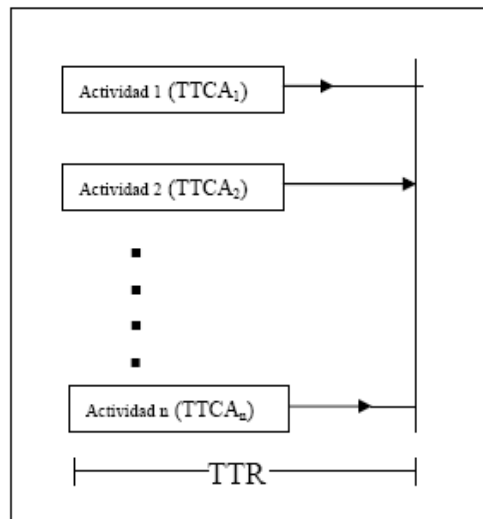
Toda tarea de mantenimiento es susceptible de ser descompuesta en una serie de diferentes actividades elementales, cuya secuencia de realización permite completar la tarea correspondiente. Para visualizar de forma gráfica la secuencia de las actividades elementales es necesario construir el *diagrama de bloques de actividades de mantenimiento*, (Maintenance Activity Blocks Diagram. MABD).

El MABD es una representación esquemática de la tarea de mantenimiento donde cada una de las actividades elementales de las que consta, representa por un bloque, es ordenada secuencialmente según los periodos de su ejecución. La estructura del diagrama de bloques para una particular tarea de mantenimiento viene determinada principalmente por el diseño, aunque en algunos casos podría modificarse mediante la política de mantenimiento adoptada.

Basándonos en la secuencia de sus actividades elementales y con objeto de analizar la función de mantenibilidad de una tarea de mantenimiento, hemos de tener en cuenta los siguientes tipos de análisis con los que nos podemos encontrar:

1) Tarea de mantenimiento con actividades simultáneas. Se representa por un conjunto de actividades elementales mutuamente independientes, realizándose todas ellas de forma concurrente. El MABD adopta una forma de diagrama de bloques en paralelo.

REVISAR TTR ¿?????????



Todas las actividades comienzan al mismo tiempo y se realizan simultánea pero independientemente las unas de las otras.

La medida de la mantenibilidad de una tarea de este tipo se deduce de las medidas de mantenibilidad de cada una de las actividades. Recurriendo a las funciones de mantenibilidad tenemos:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= \Pr (TTR \leq t) \\
 &= \Pr (TTCA_1 \leq t \cap TTCA_2 \leq t \cap \dots \cap TTCA_n \leq t) \\
 &= \Pr (TTCA_1 \leq t) \times \Pr (TTCA_2 \leq t) \times \dots \times \Pr (TTCA_n \leq t) \\
 &= \prod_{i=1}^n \Pr (TTCA_i \leq t)
 \end{aligned}$$

$i=1$

Donde TTR es la variable aleatoria del tiempo de la tarea de mantenimiento y TTCA es la variable aleatoria del tiempo de completar la actividad elemental (Tiempo Total de la Actividad Componente).

Pero si la función de mantenibilidad de la i -ésima actividad elemental es conocida y viene dada por:

$$M_i(t) = \Pr (TTCA_i \leq t)$$

Entonces la función de mantenibilidad para la tarea considerada es:

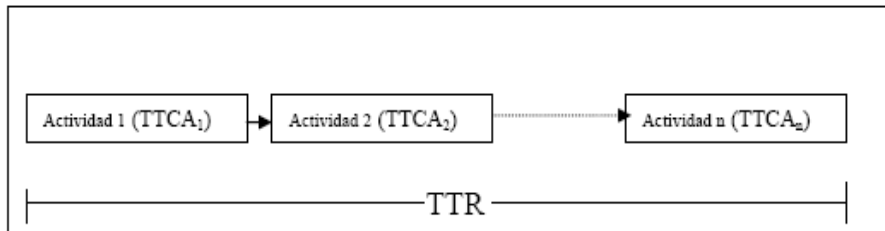
$$M(t) = \prod_{i=1}^n M_i(t)$$

La probabilidad de completar la tarea de mantenimiento antes de un tiempo determinado es siempre menor o igual que la probabilidad más pequeña de haber completado una actividad elemental en ese tiempo. Es decir:

$$M(t) \leq \min. \{M_i(t)\}$$

Este tipo de mantenimiento se encuentra en los equipos donde se realizan varias actividades de mantenimiento diferentes, desde el punto de vista de su contenido.

2. Tarea de mantenimiento con actividades secuenciales. Se representa por un conjunto de actividades elementales mutuamente dependientes, realizándose todas ellas en un orden predeterminado. El MABD adopta una forma de diagrama de bloques en serie.



Cada actividad comienza después de la realización de la actividad previa.

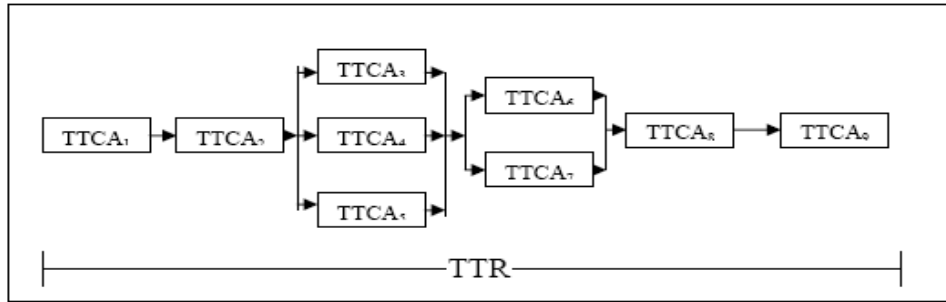
La tarea de mantenimiento se culmina cuando la última actividad se ha completado.

La medida de la mantenibilidad de una tarea de este tipo se deduce de las medidas de mantenibilidad de cada una de las actividades. Recurriendo a las funciones de mantenibilidad tenemos:

$$\begin{aligned} M(t) &= \Pr (TTR \leq t) \\ &= \Pr (TTCA_1 + TTCA_2 + \dots + TTCA_n \leq t) \\ &= M_n(t) \end{aligned}$$

La solución de la función de mantenibilidad de la tarea de mantenimiento es igual a la n -ésima convolución de las actividades componentes. Las expresiones que se obtienen como resultado de las repetidas convoluciones no son, en general, tratables algebraicamente, por lo que se debe recurrir a su solución por métodos numéricos.

3. Tarea de mantenimiento con actividades combinadas. Se representa por un conjunto de actividades de mantenimiento en donde algunas de las cuales se realizan secuencialmente y otras de forma simultánea. El MABD adopta una forma de diagrama de bloques en serie y paralelo.



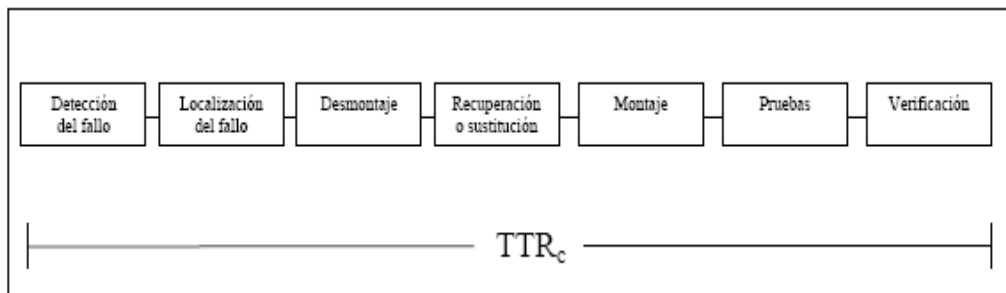
La mayoría de las tareas de mantenimiento pertenecen a esta categoría. Este diagrama, como se puede ver se transformaría en uno secuencial si a los grupos de actividades simultáneas se las sustituye por una sola actividad equivalente.

En la realidad las tareas de mantenimiento tienen una secuencia de actividades elementales que, dependiendo del tipo de mantenimiento, nos encontramos con los siguientes MABDs:

1. Tareas de mantenimiento correctivo. Una tarea de mantenimiento correctivo típica consta de las siguientes actividades:

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

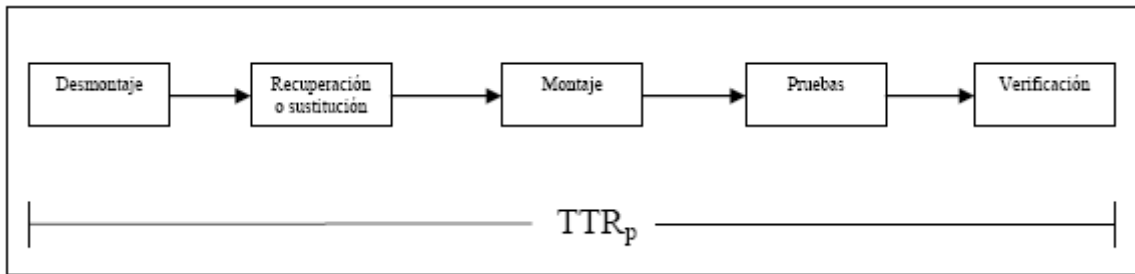
La duración de la tarea TTR_c representa el tiempo empleado en la ejecución con éxito de todas las actividades de que consta la tarea de mantenimiento correctivo.



2. Tareas de mantenimiento preventivo programado. Una tarea de mantenimiento preventivo programado típica consta de las siguientes actividades:

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

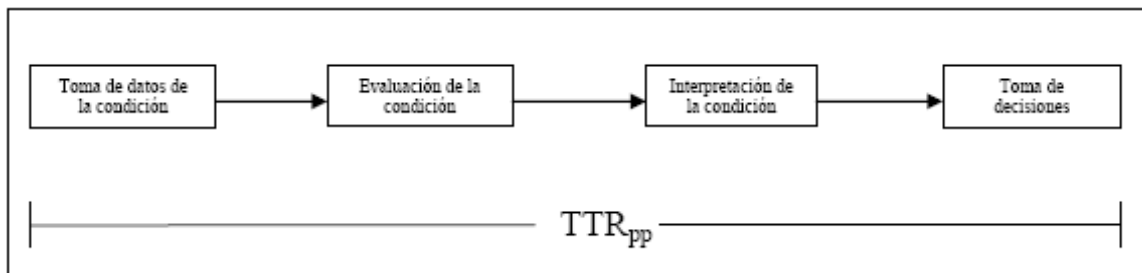
La duración de la tarea TTR_p representa el tiempo empleado en la ejecución con éxito de todas las actividades de que consta la tarea de mantenimiento preventivo.



3. Tareas de mantenimiento preventivo predictivo. Una tarea de mantenimiento preventivo predictivo consta de las siguientes actividades:

- Toma de datos de la condición
- Evaluación de la condición
- Interpretación de la condición
- Toma de decisiones

La duración de la tarea TTRpp representa el tiempo empleado en la ejecución con éxito de todas las actividades de que consta la tarea de mantenimiento preventivo predictivo.



El hecho de que todas los tipos de tareas anteriores hayan sido representados por MABDs de actividades secuenciales se debe a que, en muchos casos, alguno de los bloques representa un conjunto de actividades elementales combinadas, como puede ser el bloque de "Recuperación o sustitución". Pero ya sea uno u otro caso, para poder obtener los datos de MTTR siempre será necesario disponer de una base de datos de mantenibilidad de actividades elementales obtenidos mediante ensayos.

Tanto para el caso de sistemas civiles (automóviles), como en sistemas militares (sistemas de armas), muchas industrias recurren a normalizar un determinado número de actividades elementales de diversos tipos de tareas de mantenimiento más frecuentes y almacenar los datos de tiempos medios de duración (Ti) y sus desviaciones típicas, que podrán utilizar en múltiples situaciones o diversos cálculos de ingeniería. Veamos los más frecuentes:

Detección del fallo (T_{DFi})	Tiempo asociado con la actividad de determinar que tipo de fallo se ha producido en el sistema.
Localización del fallo (T_{LFi})	Tiempo asociado con la actividad de localizar y aislar el componente en el que ha ocurrido el fallo.
Desmontaje (T_{Di})	Tiempo asociado con la actividad de acceder (desmontaje de elementos que impiden el acceso) al componente en el que ha ocurrido el fallo.
Sustitución (T_{Si})	Tiempo asociado con la actividad de sustituir el elemento o elementos que han provocado el fallo, o son sospechosos del mismo.
Montaje (T_{Mi})	Tiempo asociado con la actividad de montaje de los elementos desmontados para acceder al elemento responsable del fallo, después de que la sustitución haya sido realizada.
Pruebas (T_{Pi})	Tiempo asociado con las pruebas de alineación, conexionado, ajustes, etc., cuando el fallo ha sido corregido.
Verificación (T_{Vi})	Tiempo asociado con la verificación de que el fallo ha sido corregido y el sistema está operativo.

Para estos casos la predicción del MTTR será:

$$MTTR = \sum_{i=1}^n T_i$$

5.2.2 Por tiempos de ejecución de tareas de mantenimiento.

De acuerdo con la ingeniería de la mantenibilidad, lo normal es calcular el valor numérico del tiempo medio de ejecución de una tarea de mantenimiento, $MTTR^*$, mediante una pequeña muestra de datos de tiempos de ejecución $ttri$ de tamaño n , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$MTTR^* = \sum_{i=1}^n ttri / n$$

Como el resultado obtenido representa el valor medio de esta muestra en particular, seleccionada al azar, es necesario determinar el intervalo en el que se encuentra la media de la población global, determinando el límite superior del tiempo medio de reparación, $MTTR^u$ de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$MTTR^u = MTTR^* + Z (\sigma / \sqrt{n})$$

Donde:

σ representa la desviación típica de los datos de la muestra.

(σ / \sqrt{n}) se conoce como error típico.

Z es el nivel de confianza de la distribución normal

Riesgo	Confianza	Z
20 %	80 %	0.8416
15 %	85 %	1.036
10 %	90 %	1.282
5 %	95 %	1.645
1 %	99 %	2.326

Este valor es el que normalmente se va a tomar como criterio de aceptación del MTTR exigido por el cliente, el cual debe ser igual o superior al $MTTR^u$ obtenido.

Otro valor importante que debemos obtener es el tiempo máximo de mantenimiento, TTR_{max} , el cual puede obtenerse según la siguiente expresión:

$$TTR_{max} = \exp (\ln MTTR^* + z \sigma_{\ln(ttri)})$$

Donde $\sigma_{\ln(ttri)}$ es la desviación típica del logaritmo neperiano de los valores iniciales de $ttri$.

Este método es un método genérico y puede ser aplicado también a un conjunto de tareas de un equipo o sistema con solo sustituir los valores $ttri$ por los correspondientes MTTRs de las tareas de mantenimiento de un equipo o sistema, o incluso por los valores de MTTRs de los equipos que configuran un sistema; esto último es el caso más normal con el que se encuentran los sistemistas.

Este método, en su conjunto, carece de una justificación teórica adecuada para una aplicación universal y por lo tanto debe utilizarse con precaución. Sin embargo, por su sencillez y por permitir obtener los parámetros más empleados en los análisis de mantenibilidad, se usa con relativa frecuencia.

5.2.3 Por selección aleatoria de elementos reemplazables

Este método o técnica de predicción se emplea para estimar tiempos de ejecución de tareas correctivas y preventivas, y preferentemente durante las etapas iniciales del diseño, fundamentalmente para equipos electrónicos. El método consiste en analizar un cierto número de elementos reemplazables del equipo a mantener, elegidos aleatoriamente. Una vez han sido elegidos, los elementos son clasificados según su naturaleza (motores, transformadores, relés, válvulas, etc.). El método (Método RCA) se basa en la presunción de los fallos serán debidos a fallos de esos componentes o elementos reemplazables, así como que el tiempo de reemplazo de los módulos o elementos de un mismo tipo será similar. Cada una de las tareas de reemplazo de los elementos identificados es analizada respecto a la configuración física del equipo, los medios requeridos para realizar la tarea, y las cualificaciones necesarias del personal de mantenimiento. Cada uno de estos aspectos se presenta en forma de lista de comprobaciones, como resumen las Tablas 5.1, 2 y 3.

Tabla 5.1 - Comprobación de características físicas.

CRITERIO	DESCRIPCION
1. Accesibilidad (externa).	1. Se refiere a la accesibilidad externa del sistema respecto a manipulación o inspección visual.
2. Conectores (externos).	2. Determina si conectores exteriores del sistema requieren herramientas especiales o excesivo tiempo.
3. Conectores (internos).	3. Determina si conectores interiores del sistema requieren herramientas especiales o excesivo tiempo.
4. Accesibilidad (interna).	4. Se refiere a la accesibilidad interna del sistema respecto a manipulación o inspección visual.
5. Modularidad y empaquetado	5. Refleja la facilidad de acceso a componentes que deban ser desmontados.
6. Reemplazabilidad de componentes	6. Determina la facilidad con la que pueden reemplazarse componentes.
7. Sensores y displays.	7. Refleja la disponibilidad de información vital referente a la operación y los fallos del sistema.
8. Capacidad de autodiagnóstico.	8. Se refiere a la capacidad de localización de averías.
9. Requisitos de prueba.	9. Determina requisitos especiales para la ejecución de la tarea.
10. Capacidad de prueba.	10. Refleja la claridad de marcas de los puntos de prueba.
11. Etiquetado.	11. Refleja la identificación de partes, componentes, elementos, etc.
12. Requisitos de calibración y ajuste.	12. Refleja la medida en que la tarea requiere calibraciones o ajustes.
13. Mecanismo de prueba.	13. Determina si los elementos potencialmente defectuosos deben ser desmontados antes de ser probados.
14. Capacidad de protección ante daños.	14. Determina si existen medios que minimicen el daños al sistema ante un fallo.
15. Seguridad del personal.	15. Refleja la medida en la que puede comprometerse la seguridad del personal de mantenimiento en la ejecución de la tarea.

Tabla 5.2.- Comprobación de requisitos de medios.

CRITERIO	DESCRIPCION
1. Requisitos de equipo de prueba.	1. Se refiere al equipo externo de prueba requerido para completar la tarea.
2. Conectores / adaptadores de equipos de prueba.	2. Determina si el equipo externo de prueba requiere conectores o adaptadores especiales.
3. Plantillas guía de mantenimiento.	3. Se refiere a si serán necesarias plantillas, abrazaderas, etc
4. Comunicación visual.	4. Refleja si es posible la comunicación visual entre técnicos durante la tarea.
5. Requisitos de interacción de personal de operación y mantenimiento.	5. Se refiere a la necesidad de interaccionar con el personal de operación durante la ejecución de la tarea.
6. Número de técnicos de mantenimiento requeridos.	6. Refleja el número de personas requeridas para la eficaz ejecución de la tarea.
7. Servicios de supervisión requeridos.	7. Determina la necesidad de personal supervisor durante la ejecución de la tarea.

Tabla 5.3.- Comprobación de requisitos de personal.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
1. Fuerza física.	1. Fuerza requerida en brazos y piernas para ejecutar la tarea.
2. Resistencia.	2. Resistencia y energía requerida por parte de los técnicos para realizar la tarea.
3. Destreza y reflejos.	3. Medida en la que se requiere destreza y reflejos para realizar la tarea.
4. Agudeza visual.	4. Medida en la que se requiere alerta y agudeza visual para leer displays, aislar componentes defectuosos, etc.
5. Experiencia.	5. Medida en la que se requiere experiencia en herramientas, procedimientos, etc.
6. Capacidad lógica y deductiva.	6. Necesidad del personal técnico de realizar análisis lógicos y deducciones.
7. Organización.	7. Necesidad de planificación y organización para la eficaz ejecución de la tarea.
8. Alerta y precaución.	8. Refleja el nivel de alerta y apresto requeridos del personal de mantenimiento.
9. Paciencia, concentración y persistencia.	9. Refleja el nivel de concentración y persistencia requeridos en el personal de mantenimiento.
10. Independencia y aptitud.	10. Refleja el grado de independencia e iniciativa requeridos en el personal de mantenimiento.

Ya que las valoraciones son subjetivas, es importante que sea el mismo equipo el que valore las diferentes alternativas, para asegurar la homogeneidad del análisis.

Los pasos necesarios para el desarrollo de este método son los siguientes:

- a) Determinación del tamaño de la muestra aleatoria de elementos reemplazables.

Debe seleccionarse aleatoriamente un conjunto representativo de elementos del equipo y, por tanto, de tareas de mantenimiento. Si la selección de elementos es buena, con un esfuerzo razonable puede realizarse una buena predicción de la mantenibilidad del equipo. El tamaño de la muestra se establece en función del riesgo aceptable o del nivel deseable de confianza. Cuanto mayor es el tamaño de la muestra más próximos serán los resultados a las características reales del equipo, pero al mismo

tiempo mayor será el esfuerzo requerido. El objetivo es determinar el tamaño de la muestra que proporcione una predicción efectiva y eficaz.

El tamaño N de la muestra viene dado, en función de los requisitos para el equipo completo, por:

$$N = [Cx \cdot Z / k]^2$$

$$MTTR^u - MTTR^* = Z (\sigma / \sqrt{n}) ; MTTR \cdot k = Z \sigma / \sqrt{n} ;$$

$$\sqrt{n} = Z/k \cdot \sigma/MTTR$$

donde Cx es el coeficiente de variación (calculado, mediante los requisitos del equipo, como,

$Cx = \sigma / MTTR$, siendo σ la desviación típica de los tiempos de ejecución de las tareas y MTTR su valor medio, requeridos), Z es el nivel de confianza y k es la precisión requerida del análisis expresada en términos de porcentaje de desviación de la media.

Por ejemplo, si el requisito es un tiempo medio de tareas de mantenimiento correctivo de 65 minutos, con una desviación típica igual a 17 minutos, se desea un nivel de confianza del 95 por ciento (al que corresponde $Z=1.645$), y se requiere una precisión correspondiente a una desviación del 10 por ciento ($k = 0.1$),

$$Cx = 17 / 65 = 0.26 \quad N = [0.26 \times 1.645 / 0.1]^2 \approx 20$$

b) Determinación del reparto de la muestra por categorías de elementos.

El tamaño N de la muestra debe dividirse entre los diferentes tipos de elementos o módulos que integren el equipo. Para ello se determina la cantidad de elementos o módulos de cada tipo, su tasa de fallos (supuesta constante), el número esperado de fallos correspondiente a cada categoría, la contribución esperada de cada tipo o categoría de elementos a los fallos del sistema, la cantidad esperada de fallos por categoría para el tamaño de muestra seleccionada, y finalmente el reparto de la muestra por tipos o categorías de elementos. La Tabla 5.4 muestra un ejemplo de reparto de una muestra de 20 tareas.

a) Selección de elementos específicos.

Una vez que se ha repartido el tamaño de la muestra por tipos o categorías de elementos, deben seleccionarse el número de elementos de cada tipo indicados (en el ejemplo de la Tabla 5.4, habría que elegir 2 de los 460 circuitos integrados del sistema, 4 de los cinco motores, etc).

Tabla 5.4 - Reparto del tamaño de la muestra.

Tipo de elemento	Cantidad	Tasa de fallos	Cantidad esperada de fallos	Contribución a los fallos esperados (%)	Cantidad de fallos por categoría (N=20)	Reparto de la muestra (n)
Tarjetas	706	0.107	75.5	10.8	2.16	2
Conectores	458	0.105	48.0	6.8	1.36	1
Relés	430	0.221	95.0	13.6	2.72	3
Circuitos integrados	460	0.140	64.4	9.2	1.84	2
Diodos	89	0.140	12.4	1.7	0.34	0
Inductores	3	0.600	1.8	0.5	0.10	0
Bobinas	149	0.086	12.8	2.0	0.40	0
Correas	65	0.333	21.6	3.0	0.60	1
Motores	5	25.000	125.0	17.9	3.58	4
Filtros	1090	0.179	195.1	28.0	5.60	6
Varios	252	0.181	45.6	6.5	1.30	1
TOTAL	3112		697.2	100 %		20

d) Valoración de la capacidad de ejecución de las tareas.

Se supone que las tareas son todas de reparación por sustitución. Cada tarea es evaluada en términos de los criterios identificados en las Tablas 5.1, 2 y 3, asignándosele un valor entre 0, cuando la característica es mala, y 4, cuando es buena, a cada criterio (si no hay suficiente información para evaluar un criterio, se le asigna el valor medio de los valores dados al resto de ellos). Por lo tanto los valores mayores se asignan a los casos de mayor mantenibilidad.

e) Cálculo del tiempo medio de indisponibilidad por mantenimiento.

Para estimar el tiempo de inactividad por mantenimiento se emplean los resultados obtenidos en el paso anterior en la siguiente relación empírica propuesta por una norma militar americana, para la obtención del tiempo en minutos:

$$MTTR_i = \text{anti log} (3.54651 - 0.02512 A - 0.03055 B - 0.01093 C)$$

donde A, B y C representan los valores totales obtenidos para los criterios especificados en las Tablas 5.1, 2 y 3, y siendo $MTTR_i$ el tiempo medio estimado de ejecución de la i -ésima tarea. Realmente, más que un tiempo auténtico es un índice relativo de mantenibilidad, que permite la comparación multiatributo de diferentes alternativas.

Supongamos que las valoraciones obtenidas para los diferentes criterios son las mostradas en la Tabla 5.5. Entonces, el tiempo estimado de ejecución de la i -ésima tarea sería

$$MTTR_i = \text{anti log} (3.54651 - 0.02512 * 37 - 0.03055 * 19 - 0.01093 * 23)$$

$$MTTR_i = 61 \text{ minutos}$$

Tabla 5.5 - Resumen de valoración de criterios.

Criterio	Tabla 1	Tabla 2	Tabla 3
1	4	1	3
2	4	4	2
3	3	2	0
4	2	4	2
5	0	2	1
6	2	4	4
7	2	2	4
8	2		2
9	4		3
10	0		2
11	2		
12	4		
13	4		
14	0		
15	4		
TOTAL	37	19	23

El cálculo de $MTTR_i$ deberá ser realizado para cada una de las 20 tareas de la muestra. Mediante estos valores podremos obtener el tiempo medio estimado de realización de las tareas de mantenimiento $MTTR^*$ del módulo, equipo o sistema y el correspondiente $MTTR^u$.

Este valor, como ya hemos visto anteriormente, es le que normalmente se toma como criterio de aceptación del $MTTR$ exigido por el cliente, el cual debe ser igual o superior al $MTTR^u$ obtenido en el sistema analizado.

5.3 Predicción por simulación

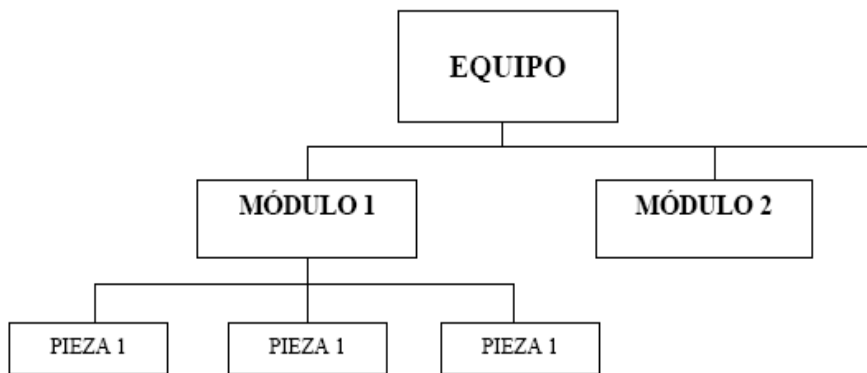
Cuando se trata de hacer predicciones de la mantenibilidad de sistemas, la simulación ofrece ventajas sobre el resto de los métodos, por la rapidez y precisión de los cálculos a obtener. La simulación permite, además, abordar problemas complejos difíciles de abordar por métodos deterministas.

Aprovechando el que la Ingeniería Concurrente requiere la realización de análisis de Disponibilidad, Fiabilidad y Mantenibilidad (Availability, Reliability and Maintainability. ARM) sobre los sistemas a obtener, se han desarrollado herramientas informáticas de simulación que permiten obtener los valores de mérito de los sistemas en relación con su disponibilidad, fiabilidad, mantenibilidad e incluso soportabilidad.

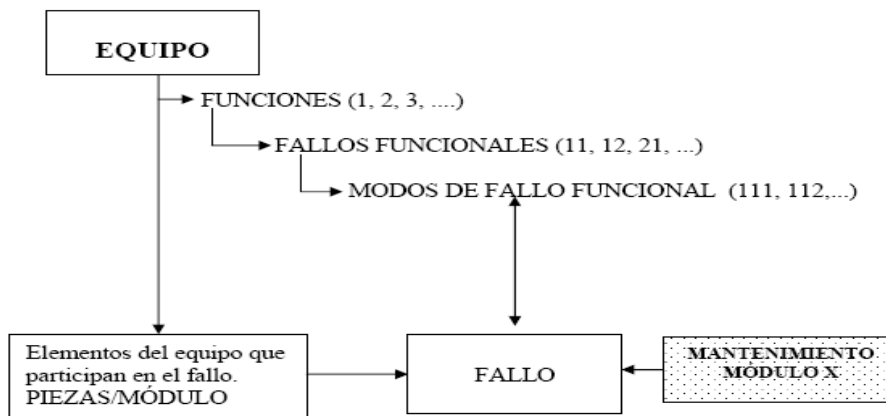
En los análisis de ARM se utilizan los diagramas de bloques de fiabilidad y mantenibilidad para estructurar el sistema, los datos de MTBF y MTTR de cada uno de sus componentes, el método de Monte-Carlo para la simulación de los tiempos al fallo, TTF y los tiempos de reparación TTR y, para el desarrollo de la simulación, el diagrama de flujo del "próximo suceso".

La aplicación de esta metodología al cálculo de los parámetros de mantenibilidad de módulos y equipos requiere de un conocimiento muy exhaustivo del proceso de aparición del fallo, de los elementos involucrados en él y de un análisis conjunto de fiabilidad y mantenibilidad. Veámoslo gráficamente:

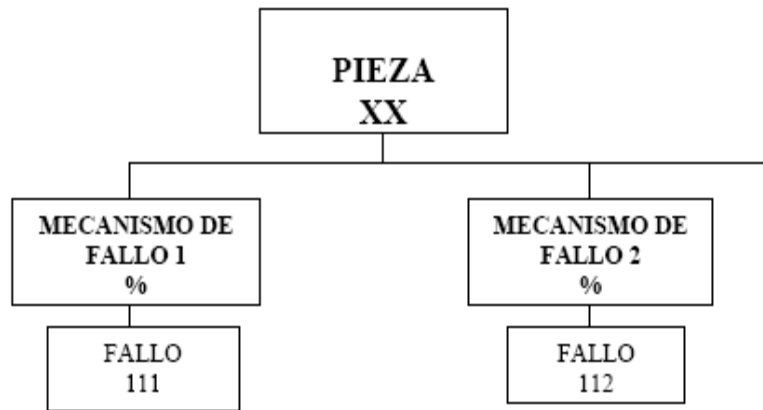
1) Descomposición de un equipo:



2) Análisis de fallos y mantenimientos de un equipo:

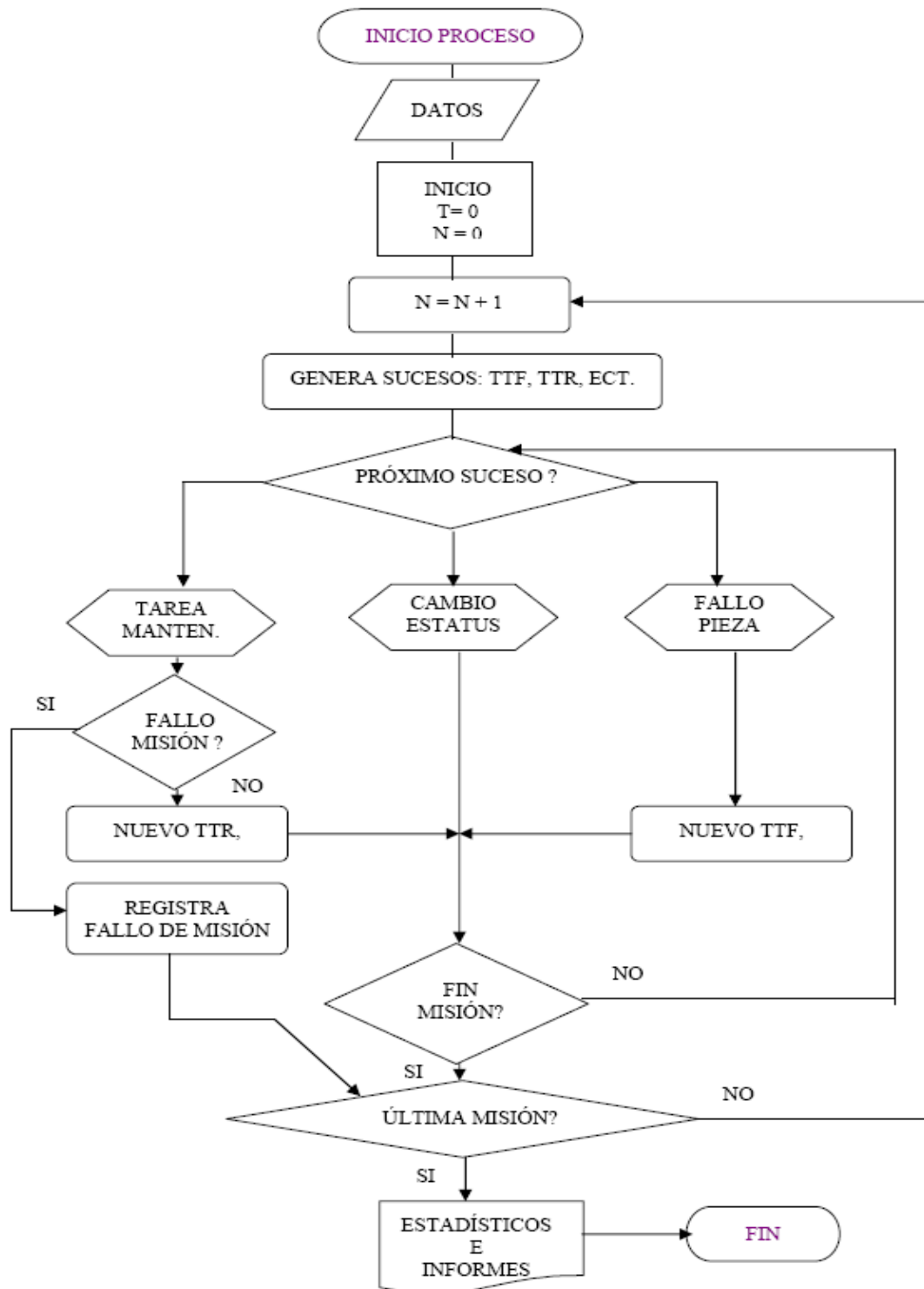


3) Relación entre piezas y fallos:



El proceso de simulación nos lo debemos plantear de la siguiente forma:

1. Técnica de simulación orientada al suceso
2. Para un periodo de tiempo determinado (simulación de N periodos de misión)
3. Empleo del método de Monte-Carlo para los sucesos aleatorios, fallos, mantenimientos, etc.



6. EVALUACIÓN DE LA MANTENIBILIDAD

6.1 Generalidades

Durante el diseño de un sistema (o de los equipos que lo componen) se realizan predicciones de mantenibilidad para conocer la medida en que las diferentes alternativas de diseño, que se consideren, van a satisfacer los requisitos de mantenibilidad establecidos. Una vez se han construido los primeros prototipos, es necesario demostrar el cumplimiento de los requisitos especificados.

Las predicciones tienen la gran limitación de la información disponible y las hipótesis restrictivas que en general hay que formular para que los modelos matemáticos sean aplicables. Por contra, las demostraciones se realizan directamente sobre el propio equipo o sistema y por ello son más fáciles de realizar y a la vez sus resultados son más seguros que los de las predicciones. El inconveniente de las demostraciones frente a las predicciones es que las primeras se realizan cuando el diseño ha finalizado (o cuando está suficientemente avanzado y existen maquetas del sistema), con lo que los cambios necesarios son mucho más costosos, mientras que las últimas se realizan durante el propio proceso de diseño y desde su mismo comienzo, siendo mucho más sencillo y económico introducir cambios en la configuración.

El proceso de demostración de la mantenibilidad de un sistema consiste en la realización de un determinado número de tareas de mantenimiento seleccionadas aleatoriamente con objeto de valorar el grado de cumplimiento de los requisitos de mantenibilidad. La validez de la demostración depende fundamentalmente del proceso seguido en la selección de las tareas que vayan a servir de base para la evaluación de la mantenibilidad. El tamaño de la muestra de tareas se debe fijar en función de la complejidad del equipo o sistema, de la variedad de tareas que existan, de sus probabilidades de ocurrencia, etc. Cuanto mayor es el tamaño de la muestra mayor es la validez del resultado, pero también es mayor el esfuerzo requerido para la realización de la demostración. En cualquier caso, las tareas deben ser realizadas en condiciones lo más próximas posibles a las que se encontrará el usuario real (es decir, personal de mantenimiento que tenga la misma cualificación que el futuro usuario, que disponga de los mismos medios, etc.). En la industria electrónica la experiencia demuestra que, en general, 50 tareas son suficientes para evaluar la mantenibilidad de un equipo o sistema. Para grandes sistemas deberán considerarse sus diferentes subsistemas (o equipos), tomándose entonces 50 tareas de cada uno de ellos.

Consideremos, por ejemplo, que se quiere demostrar la mantenibilidad de un equipo que forma parte de un sistema electrónico; el equipo considerado está integrado por seis módulos (una fuente de potencia, un amplificador, un convertidor y tres placas o tarjetas de control, cuyas características de fiabilidad se consideran iguales). Considerando el número de veces que cada módulo está presente en el equipo y suponiendo que sus tasas de fallos son constantes, se construye la Tabla 6.1 para determinar el reparto de las 50 tareas que han de servir para la evaluación entre los diferentes módulos. El total de fallos con que contribuye cada módulo es el producto de sus tasas de fallos por el número de veces que está presente en el equipo; la contribución a las tareas de mantenimiento del equipo resulta de normalizar los "totales de fallos", y sirven para repartir el número de tareas consideradas (en este caso, cincuenta). Si la distribución de tareas a ser empleadas en la demostración se realiza incorrectamente se falseará el resultado de la prueba, pudiendo inducir errores a la toma de decisiones. Es pues esencial asegurar que el reparto de las tareas sea el debido, de forma que represente lo más fielmente posible la proporción de tareas que serían realizadas en el equipo durante su vida operativa.

Tabla 6.1.- Asignación de tareas para demostración de mantenibilidad.

Módulo	Cantidad / equipo x Factor de utilización	Tasa de fallos (1000 hr)	Total fallos (1000 hr)	Contribución tareas de mantenimiento	Asignación tareas de mantenimiento
Amplificador	1 x 1	0.55	0.55	0.18	9
Fuente de potencia	1 x 1	0.24	0.24	0.07	4
Convertidor	1 x 1	0.35	0.35	0.11	5
Placa de control	3 x 1	0.68	2.04	0.64	32

A continuación vamos a exponer dos de los procedimientos mas conocidos y requeridos en multitud de programas particulares de calidad para sistemas complejos y que son: el secuencial y el de la muestra fija.

6.2 Método secuencial

Este método consiste en simular un determinado número de fallos del equipo o sistema y realizar las correspondientes tareas de mantenimiento, registrando los tiempos invertidos en su ejecución. Las tareas se ejecutan de forma aleatoria y secuencialmente, hasta que en base a criterios preestablecidos se decide finalizar la prueba (aceptando o rechazando los resultados obtenidos, según corresponda). Tanto el número de tareas a ejecutar, como los límites de aceptación y rechazo (número relativo de veces en que el valor del TTR de cada tarea ejecutada supere o no al requisito de aceptación MTTR), se establecen en los procedimientos de calidad aceptados por el cliente.

El procedimiento consiste en ir registrando los tiempos TTR de las diferentes tareas. Cada vez que el tiempo TTR registrado supere al requisito especificado MTTR, se registra dicha incidencia; si transcurrido un cierto número de pruebas el acumulado de esas incidencias no supera un valor prefijado, se considera que el equipo o sistema satisface el requisito especificado de mantenibilidad. Si por contra el acumulado de esas incidencias supera otro valor prefijado, se considera que el equipo o sistema no cumple el requisito especificado.

La Figura 6.1 muestra un posible plan de prueba en el que se establecen las áreas de aceptación y rechazo con un cierto nivel de confianza.

Figura 6.1 - Modelo de plan de prueba.

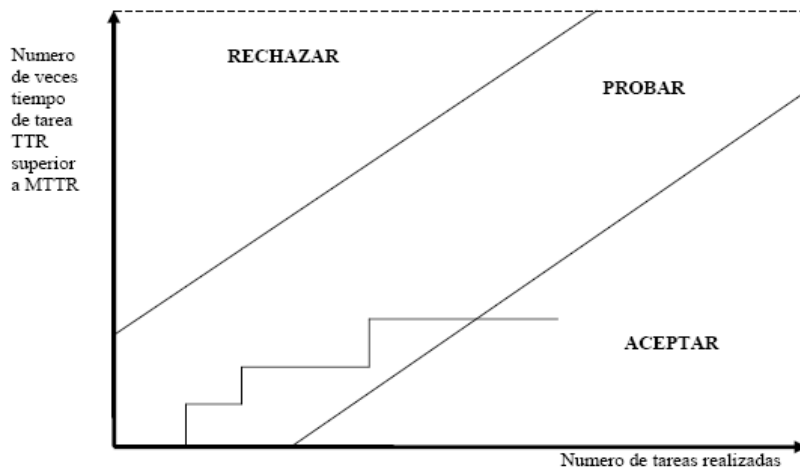
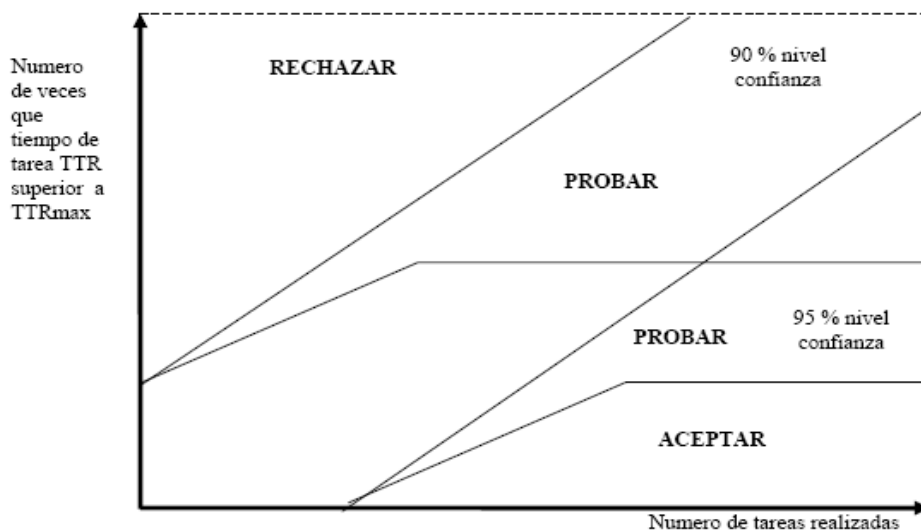


Figura 6.2 - Modelos de plan de prueba para diferentes niveles de confianza.



En la utilización de estos métodos normalmente se asume: (1) que la función de distribución del mantenimiento correctivo es una log-normal; (2) que el número de tareas a probar suele ser de 100; (3) que la selección de las tareas se hace en función del porcentaje de su contribución al mantenimiento total y (4) que la secuencia de ejecución de las tareas se hace de forma aleatoria.

6.3 Método de muestra fija

Este método permite demostrar valores del tiempo medio de tareas de mantenimiento correctivo (MTTRc), del tiempo medio de tareas de mantenimiento preventivo (MTTRp), o del tiempo medio de tareas de mantenimiento (MTTR) a partir de una muestra de cincuenta mediciones.

La demostración de MTTRc y de MTTRp se realiza directamente a partir de las correspondientes muestras de observaciones (de tiempos de ejecución de tareas de mantenimiento correctivo y preventivo, respectivamente). La demostración de MTTR se realiza a partir de los valores demostrados de MTTRc y de MTTRp.

a) Demostración de MTTR.

Se parte de la hipótesis de que el equipo cumple un determinado requisito de tiempo medio de ejecución de tareas de mantenimiento correctivo, MTTRc. El límite superior de MTTRc para un determinado nivel de confianza viene dado por:

$$MTTRc^u = MTTRc + Z (\sigma / \sqrt{N})$$

Si dicho límite superior es igual o inferior a un valor prefijado de MTTRc se puede aceptar la hipótesis formulada, y si es superior entonces la hipótesis debe rechazarse.

Ejemplo Consideremos los siguientes cincuenta valores de tiempo de ejecución (en minutos) de tareas de mantenimiento correctivo sobre un determinado equipo,

39	57	70	51	74	63	66	42	85	75
42	43	54	65	47	40	33	32	50	73
64	82	36	63	68	70	52	48	86	36
74	67	71	96	45	58	82	32	56	58
92	91	75	74	67	73	49	62	64	62

Supongamos que el requisito especificado a nivel equipo es MTTRc = 65 minutos. ¿Puede concluirse, con un nivel de confianza del 90 por ciento, que el requisito se ha cumplido?

A partir de los tiempos medidos, se calculan los siguientes valores:

$$MTTRc = (\sum MTTR_{ci}) / N = 62.1 \text{ minutos}$$

$$\sigma = \sqrt{\sum (MTTR_{ci} - MTTR_c)^2 / N} = 17.5$$

Para un nivel de confianza del 90 por ciento, Z=1.28. Entonces,

$$MTTR_c^u = MTTRc + Z (\sigma / \sqrt{N})$$

$$MTTR_c^u = 62.1 + 1.28 (17.5 / (50)^{1/2}) = 65.26 \text{ minutos}$$

Por ser mayor que el tiempo especificado, se concluye que el equipo no cumple el requisito de tiempo medio de mantenimiento correctivo para un nivel de confianza del 90 por ciento. Para un nivel de confianza del 80 por ciento,

$$MTTR_c^u = 62.1 + 0.84 (17.5 / (50)^{1/2}) = 64.17 \text{ minutos}$$

Para un nivel de confianza del 80 por ciento el equipo sí cumple el requisito especificado.

b) Demostración de $MTTR_p$

De forma análoga al caso anterior, se parte de la hipótesis de que el equipo cumple un determinado requisito de tiempo medio de ejecución de tareas de mantenimiento preventivo, $MTTR_p$. El límite superior de $MTTR_p$ para un determinado nivel de confianza viene dado por:

$$MTTR_p^u = MTTR_p + Z (\sigma / \sqrt{N})$$

Si dicho límite superior es igual o inferior a un valor prefijado de $MTTR_p$ se puede aceptar la hipótesis formulada, y si es superior entonces la hipótesis debe rechazarse.

Ejemplo. Consideremos los siguientes cincuenta valores de tiempo de ejecución (en minutos) de tareas de mantenimiento preventivo sobre el mismo equipo del ejemplo anterior,

150	120	133	92	89	115	122	69	172	161
144	133	121	101	114	112	181	78	112	91
82	131	122	159	135	108	95	67	118	103
78	93	144	152	136	86	113	102	65	115
113	101	94	129	148	118	102	106	117	115

Supongamos que el requisito especificado a nivel equipo es $MTTR_p = 120$ minutos. ¿Puede concluirse, con un nivel de confianza del 90 por ciento, que el requisito se ha cumplido?

A partir de los tiempos medidos, se calculan los siguientes valores

$$MTTR_9 = (\sum MTTR_{pi}) / N = 115.14 \text{ minutos}$$

$$\sigma = \sqrt{(\sum MTTR_{pi} - MTTR_p)^2 / N} = 26.67$$

Para un nivel de confianza del 90 por ciento, $Z=1.28$. Entonces,

$$MTTR_p^u = MTTR_p + Z (\sigma / \sqrt{N})$$

$$MTTR_p^u = 115.14 + 1.28 [26.67 / (50)^{1/2}] = 119.96 \text{ minutos}$$

Por ser menor que el tiempo especificado, se concluye que el equipo si cumple el requisito de tiempo medio de mantenimiento correctivo para un nivel de confianza del 90 por ciento.

c) Demostración de $MTTR$.

En éste caso se parte de la hipótesis de que el equipo cumple un determinado requisito de tiempo medio de ejecución de tareas de mantenimiento. A partir de los valores demostrados de $MTTR_c$ y de $MTTR_p$ se calcula.

$$MTTR = (f_c MTTR_c + f_p MTTR_p) / (f_c + f_p)$$

Si dicho valor es igual o inferior al requisito especificado, se acepta la hipótesis formulada, rechazándose en caso contrario.

Ejemplo Supongamos que la frecuencia de realización de tareas de mantenimiento preventivo y correctivo del equipo de los ejemplos anteriores sean:

$$f_c = 0.000009 \text{ minutos}^{-1}$$

$$f_p = 0.000023 \text{ minutos}^{-1}$$

¿Puede considerarse cumplido el requisito de tiempo medio de tareas de mantenimiento igual a 105 minutos?

A partir de los valores demostrados,

$$\begin{aligned} \text{MTTR} &= (f_c \text{ MTTR}_c + f_p \text{ MTTR}_p) / (f_c + f_p) = \\ &= (0.000009 * 62.1 + 0.000023 * 115.14) / 0.000032 = 100.72 \text{ minutos} \end{aligned}$$

Por lo tanto, al ser inferior al valor requerido (105 minutos) se considera que el sistema cumple el requisito especificado de tiempo medio de mantenimiento.

7. EVALUACIÓN ANTROPOMETRICA DE LA MANTENIBILIDAD.

7.1 Generalidades.

Al considerar la interfase de usuarios y personal de mantenimiento con el sistema, se deben tener en cuenta sus características biológicas. Por consiguiente, el objetivo principal del análisis antropométrico de mantenibilidad en la configuración del diseño, es considerar las limitaciones de la actuación humana respecto al tamaño del cuerpo y la fuerza física. Se evalúa el acceso al sistema, la localización, la disposición, el peso y el tiempo de reparación, incluyendo las características humanas como parámetros de diseño. El análisis verifica que el diseño propuesto para el nuevo sistema permitirá al personal de mantenimiento acceder, retirar, alinear e instalar equipos con eficacia, dentro de los límites de trabajo del sistema y de su entorno de mantenimiento operativo.

La evaluación antropométrica identifica los requisitos para disponer o reacomodar la localización y configuración del equipo, a fin de suministrar suficiente acceso y espacio de trabajo para el personal de mantenimiento.

La evaluación antropométrica identifica las características estructurales y de los equipos, que impiden la realización de tareas por inhibir o dificultar los movimientos del personal de mantenimiento.

El diseño del sistema debe estar correctamente especificado y representado en planos o croquis, antes de que pueda ser eficaz una evaluación antropométrica detallada. Sin embargo, durante el desarrollo conceptual, una evaluación menos detallada puede ayudar a asegurar una aplicación inicial de las consideraciones antropométricas. Los resultados de las evaluaciones conducen a diseños ampliamente mejorados en las áreas de provisiones del sistema de procedimientos de acceso, disposición, montaje, almacenamiento y tareas de mantenimiento de los equipos. Los beneficios de la evaluación incluyen tiempos menores de reparación, costes menores de mantenimiento, mejores sistemas de apoyo, mayor seguridad y reducción de la necesidad de rediseño.

Una evaluación antropométrica compara los datos estadísticos de las proporciones del cuerpo del usuario, con el espacio de trabajo y la configuración del equipo previstos para el mantenimiento. Normalmente, en las evaluaciones se incluyen consideraciones biomecánicas de la fuerza y extensión de movimientos del personal de mantenimiento.

Las evaluaciones de equipos del sistema deben comenzar en las fases de concepción y de demostración/validación del desarrollo del sistema para evitar costosos cambios de ingeniería.

7.2. Identificación de la población de usuarios

El proceso de evaluación comienza con la identificación de la población de usuarios y sus límites, o usando la población de usuarios especificada por el cliente. Entre la información que se especifica, pueden encontrarse los intervalos de edades, códigos de especialidad, tipo de indumentaria y consideraciones ambientales, etc.

7.3. Identificación de los datos antropométricos de los usuarios

Los datos antropométricos son Los datos contienen información detallada sobre las dimensiones del cuerpo humano. Identifican esas dimensiones y las estadísticas descriptivas aplicables a diferentes porcentajes de la población de usuarios. Un objetivo común de diseño es el suministro del suficiente espacio de trabajo para acomodar desde el 5° (pequeño, normalmente femenino) hasta el 95° (grande, normalmente masculino) percentiles de las proporciones del cuerpo humano, identificando el percentil el porcentaje de la población de usuarios que se encuentra dentro de las dimensiones indicadas. En la Tabla 1 siguiente se indican algunos datos antropométricos relacionados con dimensiones del cuerpo humano en posición de pie, y en la Tabla 2 los datos correspondientes para dimensiones del cuerpo humano en posición de sentado.

FACTORES	VALORES DE PERCENTILES (cm)			
	5° PERCENTIL		95° PERCENTIL	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Peso (N)	57,4	46,4	91,6	76,5
Estatura	163,8	152,4	185,6	172,2
Altura del ojo (de pie)	152,1	142,7	173,3	160,1
Altura del hombro (acromial)	133,6	123,0	154,2	143,4

Tabla 1. Datos antropométricos -individuos de pie-

FACTORES	VALORES DE PERCENTILES (cm)			
	5° PERCENTIL		95° PERCENTIL	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Dimensiones individuos sentados				
Alcance vertical del brazo, sentado	128,6		147,8	
Altura sentado, erguido	84,5	78,4	96,9	90,9
Altura sentado, en descanso	82,5	76,9	94,8	89,7
Altura del ojo, sentado, erguido	72,8	68,7	84,6	78,8
Altura del ojo, sentado, en descanso	70,8	67,2	82,5	77,6
Altura de la parte media del hombro	57,1	53,7	67,7	62,5
Longitud hombro-codo	33,8	30,2	40,2	36,2
Longitud codo-punta de los dedos	44,3	38,9	51,9	45,7
Altura del codo en descanso	17,5	18,7	28,0	26,9
Altura de la rodilla, sentado	49,7	43,7	58,7	51,6
Altura del poplíteo	40,6	38,0	50,0	44,1
Longitud rodilla-nalga	54,9	52,0	64,3	61,9
Longitud rodilla-poplíteo	45,8	43,4	54,5	52,6

Tabla 2 Datos antropométricos –individuos sentados-

7.4. Evaluación de los planos de ingeniería

Los planos o croquis de ingeniería del espacio de trabajo y de los lugares de trabajo de mantenimiento, son normalmente el foco de la evaluación antropométrica. Se usan representaciones gráficas del personal de mantenimiento para evaluar la adecuación antropométrica del espacio de trabajo.

7.5. Maniqués y superponibles antropométricos

Antes de la llegada de herramientas de diseño antropométrico ayudado con ordenador, se usaron ampliamente maniqués para tablero de dibujo con el fin de evaluar los planos o croquis del espacio de trabajo de equipos y personal de mantenimiento. Los maniqués de tablero de dibujo y los superponibles de dimensiones humanas son todavía herramientas útiles para pequeños proyectos de diseño que comprendan pocos planos, o como dispositivos de comprobación rápida.

7.6. Herramientas de diseño asistido por ordenador

Las herramientas del Diseño Asistido por Ordenador, CAD, se usan extensamente para las evaluaciones antropométricas. Estas herramientas proporcionan datos antropométricos de personal de

mantenimiento y la capacidad de simular tareas del personal de mantenimiento en superposición con diseños de ingeniería CAD.

Otra herramienta es la Aplicación Interactiva Tridimensional Asistida por Ordenador, llamada CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application), de Dassault Systems, fue creada originalmente para el diseño del caza militar francés Mirage, y se usa actualmente por las principales compañías aeroespaciales del mundo (Boeing, British Aerospace, etc.) como el primer «software» de ingeniería asistida por ordenador. El «software» CATIA se ha usado con éxito en los análisis antropométricos de mantenibilidad del Boeing 777.

7.7 Evaluación en la maqueta del sistema

Se pueden utilizar maquetas de tamaño natural para la simulación de tareas de mantenimiento, usando personas que tengan cuerpos de dimensiones antropométricas críticas y que vestan la ropa apropiada. Aún más, se pueden realizar tareas simuladas en el entorno, usando el equipo de apoyo que rodeará el sistema. Se pueden medir y fotografiar las interferencias con el espacio de trabajo e identificar las discontinuidades en las tareas.

7.8. Validación de la ecuación antropométrica

La fase de validación proporciona la primera oportunidad de los usuarios del sistema real para acceder al equipo, y verificar que son correctos los resultados de la evaluación antropométrica llevada a cabo durante la fase de diseño inicial. La validación de la evaluación antropométrica verifica la eficacia del diseño de ingeniería para suministrar suficiente acceso y espacio de trabajo al personal de mantenimiento.

7.9. Pruebas operativas de prototipos

Durante las pruebas operativas de prototipos se llevan a cabo evaluaciones antropométricas, cuando se efectúan tareas de mantenimiento. Se recogen datos antropométricos para verificar la idoneidad del diseño e identificar cualquier área problemática, requiriendo al personal de mantenimiento representativo que realice tareas de acceso, diagnóstico, desmontaje, alineamiento, instalación y fijación.

7.10. Pruebas de demostración y de operación

Las pruebas de demostración y operación de un sistema proporcionan la primera oportunidad para llevar a cabo una evaluación antropométrica, usando escenarios operativos reales. En muchas situaciones, es ésta también la primera oportunidad para que actúe una representación del personal de mantenimiento del usuario final. Si se identificara la necesidad de refinar el diseño del espacio de trabajo, los resultados de las pruebas operativas pueden usarse para modificar las especificaciones finales de producción.

7.11. Aplicación

La mayoría de los ministerios de defensa occidentales requieren evaluaciones antropométricas en la adquisición de todo sistema militar que requiera mantenimiento o servicio.

Las industrias aeroespaciales, de automoción, equipo pesado, ferrocarriles y construcción naval, realizan evaluaciones similares de las características antropométricas, pero menos formales desde el punto de vista contractual.

Los sistemas militares constan de muchos subsistemas. Las evaluaciones se realizan para todos los subsistemas que necesiten mantenimiento.

Se deben abordar las consideraciones antropométricas al comienzo de la fase conceptual, y continuar con ellas durante el diseño y desarrollo, en la extensión permitida por el grado de madurez

del diseño. Los planos de ingeniería deben tener suficiente detalle y madurez, antes de que pueda realizarse la evaluación para validar el cumplimiento de los requisitos antropométricos. La evaluación de subsistemas críticos debe tener lugar al comienzo de la fase de desarrollo conceptual del programa. En los países de la OTAN, las agencias militares implicadas en trabajos de ingeniería humana, requieren algún nivel de evaluación antropométrica durante la adquisición, antes de la producción, para asegurar que se han considerado en el diseño las características antropométricas y biomecánicas del personal de mantenimiento.

Las evaluaciones antropométricas se realizan en todo tipo de equipos y composiciones de equipos. Las evaluaciones se realizan normalmente en la configuración de equipo montada.

La fase del programa de adquisición determinará la profundidad del análisis. Por ejemplo, para el trazado de los planos de ingeniería se necesitan evaluaciones detalladas, mientras que para las pruebas operativas puede bastar con los cuestionarios de usuario y las medidas físicas críticas del espacio de trabajo.

Las evaluaciones antropométricas para el mantenimiento pueden ser muy extensas, cuando se realizan para todos los subsistemas de un sistema complejo. En algunos casos, en los trabajos iniciales de diseño, puede bastar con una evaluación de los sistemas relacionados con tareas de mantenimiento críticas o fases de la misión. Las evaluaciones profundizan hasta el nivel de unidades reemplazables en línea (Line Replaceable Units, LRUs) y módulos reemplazables en línea (Line Replaceable Modules, LRMs). Las evaluaciones implican normalmente varios factores, incluyendo:

- Características antropométricas de la población de usuarios.
- Disposición, localización y peso de los sistemas.
- Procedimientos para las tareas de acceso, desmontaje, instalación y alineamiento.
- Área, altura, congestión, y limitaciones del espacio de trabajo.
- Características de ingeniería humana que facilitan el mantenimiento (esto es, empuñaduras, escalones, registros, carteles de instrucciones, etc.).
- Áreas barridas y ángulos de visión del personal de mantenimiento.
- Herramientas, equipos de apoyo y dispositivos especiales.
- Peligros, precauciones, ropa de protección, zonas de evacuación.

Una evaluación antropométrica comienza basándose en descripciones antropométricas de la población de usuarios, descripciones funcionales de los subsistemas, disposiciones del diseño de ingeniería, disposiciones de los montajes, y análisis de tareas del personal de mantenimiento. La información se suplementa con:

- Concepto de mantenimiento para cada subsistema.
- Escenarios de mantenimiento.
- Documentación del Registro de Análisis de Apoyo Logístico (Logistics Support Analysis Record, LSAR).
- Diseños de equipos de apoyo.

El resultado de una evaluación antropométrica es una estimación de la adecuación antropométrica del diseño de ingeniería que se comunica a los grupos de diseño responsables. En el caso de compras militares, la evaluación se convierte también en parte del documento Human Engineering Design Approach Document-Maintainer (HEDAD-M). El HEDAD-M es un producto a entregar bajo el contrato, exigido por una especificación militar (MIL-H-46855B) y explicado en la descripción de datos del elemento (DI-H-7057). Otros estudios comerciales formales y cambios de diseño del programa pueden aplicar los resultados.

Deben tomarse diversas precauciones durante la realización de evaluaciones antropométricas, incluyendo:

- Los datos antropométricos que representan poblaciones de usuarios de pequeña cuantía. A menudo deberán realizarse estudios antropométricos especializados. Se suelen sustituir por

datos militares para aviadores y otras ocupaciones militares, aunque estos datos pueden no representar a otros tipos de usuarios.

- Los diseños de un sistema evolucionan y se refinan a menudo, cambiando las consideraciones antropométricas. Así, la validez de los resultados debe asegurarse mediante evaluaciones múltiples.

Es fácil pasar por alto los cableados y las conducciones de refrigeración, ventilación y combustible cuando se examina la disposición de los componentes. Estos elementos y sus sujeciones pueden tener un impacto importante en la accesibilidad y la mantenibilidad.

En los trabajos iniciales, no siempre se dispone de datos de análisis de tareas detallados. El ignorar los procedimientos de tareas críticas puede llevar a sobreestimar la accesibilidad y subestimar los tiempos medios de reparación.

Las evaluaciones antropométricas se llevan a cabo por ingenieros de factores humanos que poseen formación, preparación y experiencia en antropometría, análisis de tareas, estadística, procesos de ingeniería de diseños y aplicaciones informáticas.

8. LA MANTENIBILIDAD Y EL MANTENIMIENTO

8.1 Generalidades.

La primera consideración en toda decisión de mantenimiento no es el fallo de un elemento dado, ni la frecuencia con que se produce, sino las consecuencias de este fallo en el sistema y el entorno. De un análisis de todas las posibles consecuencias del fallo de cada elemento del sistema, se concluye que hay dos tipos de consecuencias: las que afectan a la seguridad y las que afectan a la utilidad.

El análisis de fallos proporciona una visión del tipo de fallos que con más probabilidad experimentará un elemento o sistema. Así, se debe analizar cada elemento de la lista de elementos del sistema, desde el punto de vista de su fallo, y especialmente deben considerarse las consecuencias del fallo. La herramienta de ingeniería más usada para realizar esta tarea es el Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad, (Failure-Modes Effect and Criticality Analysis, FMECA). Es un análisis exhaustivo que tiene un gran impacto en el diseño en general, y en las decisiones sobre fiabilidad y mantenibilidad en particular. Como resultado de este análisis, todos los elementos componentes se dividen, según la importancia de las consecuencias del fallo, en dos grupos. Así:

- Elementos Significativos para la Seguridad, SSI, son aquellos elementos que el FMECA señala como elementos que tienen efectos peligrosos y que requieren un control especial para alcanzar una probabilidad aceptablemente baja de fallo individual. Por consiguiente, todos los elementos del sistema cuyos fallos implican como consecuencia directa, que una persona o cosa pueda sufrir daño, o pueda morir, o ser destruida, deben ser considerados como un elemento significativo para la seguridad.
- Elementos Significativos para la Utilidad, USI, son aquellos elementos que no son críticos para la seguridad, pero cuyo fallo es probable que tenga efecto en la producción de utilidad, y en consecuencia requieran ser controlados para alcanzar los objetivos económicos. Las consecuencias de un fallo de este tipo de elementos, podría tener un impacto importante en los ingresos, coste de mantenimiento, disponibilidad operativa, reputación, dignidad, beneficio común, etc.

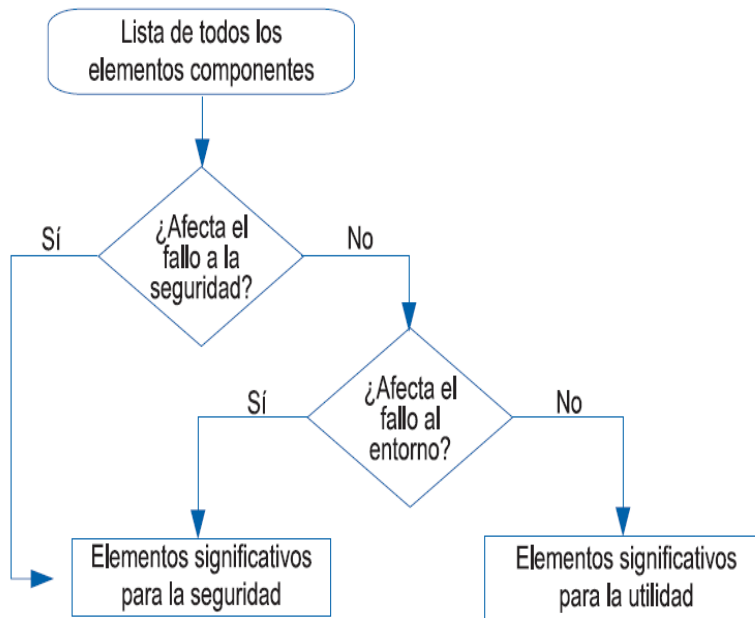


Figura de Diagrama lógico para la clasificación de los elementos significativos de mantenimiento

Estas dos categorías de elementos deben distinguirse suficientemente, porque sus influencias en las disciplinas de mantenimiento son bastante diferentes.

La presencia de fallos que ponen en peligro la seguridad del sistema, o de sus ocupantes, o del entorno, debe reducirse hasta un nivel aceptable. La práctica de los diseños actuales asegura que las funciones vitales estén protegidas mediante redundancia, tolerancia al fallo y características de fallo-seguro. Esto garantiza que, caso de producirse un fallo, la función considerada permanecerá disponible desde otro punto.

Sin embargo, si la pérdida de una función en particular no pone en peligro ni al equipo o su usuario, ni al entorno, las consecuencias del fallo tienen efecto evidente en la utilidad. Por tanto, el valor del mantenimiento debe medirse en términos de utilidad. En algunos casos, son importantes estas consecuencias en la utilidad, particularmente si el fallo afecta a la capacidad operativa del sistema. Cuando el sistema deba retirarse del servicio para corregir el fallo, el coste del fallo incluye la pérdida de utilidad.

La capacidad de manejar un fallo de utilidad depende considerablemente del diseño del equipo. Hoy en día, en la industria aeroespacial, la estrategia predominante es la misma que la usada para evitar fallos relacionados con la seguridad; esa estrategia es la inclusión de redundancia, tolerancia al fallo, y construcción de fallo-seguro, más allá de lo exigido para certificar el diseño. Claramente, este método de diseño tiene su precio y aumenta el número de posibilidades de fallos, porque añade más elementos que pueden fallar. También implica tener un sistema más complejo e integrado, lo que hace más difícil la localización de fallos. Pero esta técnica también reduce las consecuencias sobre la utilidad de cualquier fallo individual; una suficiente tolerancia al fallo o una redundancia en el diseño, colocan los fallos iniciales de un sistema en el terreno de la utilidad en vez de en el de la seguridad.

Un fallo significativo para la utilidad no debe obligar a retirar el sistema de su operación. Los elementos que experimenten un fallo en la utilidad, pueden y deben ser programados en la rutina normal de mantenimiento. En este método de diseño hay una idea central en la justificación del exceso de características. Si no se reconoce esto, se añade peso, volumen, complejidad y coste, sin un beneficio tangible sino con una penalización obvia.

8.2 Clasificación de las tareas de mantenimiento.

Todas las tareas de mantenimiento pueden clasificarse, según sus objetivos, en tres grupos:

- Tareas de mantenimiento correctivo, que se realizan con la intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema;
- Tareas de mantenimiento preventivo, que se realizan para reducir la probabilidad de fallo o maximizar el beneficio de operación;
- Tareas de mantenimiento condicional-predictivo, que se realizan con la intención de conseguir visión de la condición del elemento o sistema, para determinar el curso de las acciones posteriores.

En general, estos tres tipos de tareas de mantenimiento pueden aplicarse a todo elemento o sistema, pero sólo uno de ellos suministrará un resultado óptimo, de acuerdo con la significación de las consecuencias del fallo del elemento o sistema.

8.3 Mantenimiento centrado en la fiabilidad

El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM) se desarrolló en la industria de aviación, para determinar las políticas de mantenimiento programado de los aviones civiles. Desde entonces se ha adaptado para las industrias de fabricación y transformación.

Hasta la década de los 60, el mantenimiento programado en las compañías aéreas estaba basado en el concepto de que cada elemento del equipo tenía una «edad adecuada», en la que se necesitaba una revisión general completa para asegurar la seguridad y la fiabilidad operativa. Sin embargo, la Federal Aviation Agency, frustrada por su incapacidad para controlar la tasa de fallos de ciertos tipos de motores, estableció un grupo de trabajo para investigar las capacidades de mantenimiento preventivo, que condujo a una extensa investigación de cómo fallan los equipos, y en particular, a estudios de evolución de la fiabilidad con la edad, y de qué condiciones deben existir para que sea eficaz el mantenimiento programado. La investigación identificó seis modelos de fallos representando la probabilidad condicional de fallo en función de la edad, para una amplia variedad de elementos eléctricos y mecánicos. Así:

- **Modelo 1:** es la conocida curva de la bañera;
- **Modelo 2:** muestra una probabilidad de fallo constante o ligeramente creciente con la edad, terminando en una zona de desgaste;
- **Modelo 3:** indica un incremento lento de la probabilidad de fallo;
- **Modelo 4:** muestra una baja probabilidad de fallo cuando el elemento es nuevo, y después un rápido incremento hasta un nivel constante;
- **Modelo 5:** muestra una probabilidad constante de fallo a todas las edades, es decir, un patrón de fallos totalmente aleatorio;
- **Modelo 6:** empieza con una alta probabilidad inicial, correspondiente al «rodaje», que decae eventualmente a una probabilidad de fallo constante o de crecimiento lento.

Sin embargo, el hallazgo más sorprendente de este estudio es la frecuencia con que cada uno de estos modelos de fallos se presentaba en la aviación civil. Se ha demostrado que el 82% de los elementos siguen los modelos 5 y 6. Así, estos hallazgos contradecían las creencias de que, a medida que el equipo se hace viejo es más posible que falle –la creencia que condujo a la idea de que, cuanto más a menudo se hiciera la revisión general, más protección contra fallos había. Los estudios

demonstraron que esto es raramente cierto— y, más aún, que las revisiones programadas pueden frecuentemente aumentar la producción de fallos, introduciendo fallos de «rodaje» en sistemas que en otro caso serían estables.

El resultado de esta investigación fue el desarrollo de un método para diseñar programas de mantenimiento preventivo de aviones. Primero se concibió una técnica rudimentaria de diagramas de decisión, seguido por un manual de evaluación de mantenimiento, conocido como

MSG-1. Se usó inicialmente para desarrollar el mantenimiento programado para el Boeing 747, demostrando tener un éxito sobresaliente.

Se usó un desarrollo posterior (MSG-2) para la concepción de programas de mantenimiento del Lockheed 1011, del Douglas DC10, del Airbus A-300, del Concorde, y de varios aviones militares. La edición más reciente MSG-3, en que se basa el RCM, se ha convertido en el proceso aceptado en todo el mundo para desarrollar programas de mantenimiento de aviones. Su objetivo ha sido asegurar al máximo la seguridad y fiabilidad con el menor coste. Como muestra del éxito del MSG-3, cada año ha caído bruscamente el número de accidentes por millón de despegues en la industria de las compañías aéreas.

Al mismo tiempo, se ha reducido drásticamente la cantidad de mantenimiento preventivo empleado. Por ejemplo, en el Boeing 747 sólo se necesitan 66.000 horas-hombre de inspección estructural, para las primeras 20.000 horas de vuelo. Bajo las políticas de mantenimiento tradicionales se necesitaban cuatro millones de horas-hombre para llegar al mismo punto, en el más pequeño y menos complejo Douglas DC-8. A principios de los 80, el trabajo realizado en las compañías aéreas civiles recibía reconocimiento fuera de la industria de aviación.

La aplicación del método RCM se basa en el principio de que no se realizará ninguna tarea de mantenimiento preventivo, hasta que se pueda justificar. Los análisis RCM pueden dividirse en dos pasos principales:

- Realizar análisis FMEA para identificar los SSI del sistema;
- Aplicar procesos lógicos de análisis RCM en cada elemento crítico para la seguridad, a fin de seleccionar la combinación óptima de tareas de mantenimiento e intervalos apropiados para su realización.

El método RCM es útil para tomar decisiones sobre si se necesita o no un mantenimiento preventivo, o sobre si se basará en el tiempo o en la condición. Por consiguiente, este método es muy valioso en la determinación del tipo adecuado de mantenimiento preventivo, pero no puede usarse como herramienta para decidir intervalos óptimos. En sí, el proceso RCM no contiene ningún método básicamente nuevo. Es más bien una manera más estructurada de usar lo mejor de varios métodos y disciplinas.

El proceso RCM, como se desarrolla ahora, posee tres características claves:

- Reconoce que la fiabilidad inherente de cualquier elemento viene determinada por su diseño y fabricación, y que ninguna forma de mantenimiento puede llevar la fiabilidad más allá de la inherente en el diseño. Un análisis RCM comienza mediante la definición de la actuación deseada para cada componente en su contexto operativo, y verifica si la fiabilidad inherente es tal que mantenimiento pueda cumplir ese requisito. Si no, resalta los problemas que se encuentran fuera del alcance del mantenimiento, precisando otras acciones como rediseño, modificaciones, cambios en procedimientos de operación o en materias primas.
- El RCM reconoce que las consecuencias de los fallos son bastante más importantes que sus características técnicas. Una revisión estructurada de las consecuencias de los fallos dirige la atención a los fallos que afectan más a la seguridad y prestaciones del elemento.
- El RCM incorpora la más reciente investigación en modelos de fallo de equipos, en un sofisticado algoritmo de decisión para la selección de tareas de mantenimiento preventivo, o de las acciones que deben ejecutarse si no se encuentra ninguna tarea apropiada. El método

reconoce que todas las formas de mantenimiento tienen algún valor, y suministra criterios para decidir cuál es más apropiado en cada situación.

En la práctica diaria, el RCM se aplica por pequeños grupos formados normalmente por representantes, tanto de mantenimiento como de producción, que deben tener un conocimiento exhaustivo del equipo considerado. Se analizan rigurosamente las funciones del equipo, junto con las especificaciones de actuación asociadas. Se identifican entonces todas las maneras en que el sistema puede fallar en cumplir esas especificaciones y se evalúan las consecuencias de cada fallo. La etapa final, la selección de las políticas más apropiadas, se realiza con la ayuda del algoritmo de decisión.

Los desarrollos recientes en el RCM incluyen un método para calcular el nivel de riesgo y para determinar cómo deben mantenerse esos dispositivos. El método tiene en cuenta una diversidad de factores, incluyendo las consecuencias de un fallo múltiple, el tiempo medio entre fallos, tanto de los dispositivos protegidos como de los protectores, el número de aparatos protectores y la probabilidad de que la tarea de mantenimiento pueda causar un fallo del aparato protector que se está probando.

8.4 Niveles de mantenimiento.

Los niveles de mantenimiento se pueden clasificar genéricamente en estos tres tipos:

- Organizativo/usuario: donde el usuario realiza las tareas de mantenimiento utilizando sus propios recursos (equipo, herramientas e instalaciones). Generalmente estas tareas: no son muy complejas, no requieren mucho tiempo, y no exigen un alto grado de capacitación. Ejemplos típicos son: inspecciones periódicas de las prestaciones, inspección visual, limpieza de elementos, ajustes simples, desmontaje y sustitución de componentes de fácil acceso.
- Intermedio: donde organizaciones especialmente establecidas realizan las tareas de mantenimiento, que son, en la mayoría de los casos, móviles o semimóviles. En este nivel, las tareas de mantenimiento son más complejas y exigen un mayor nivel de experiencia, así como equipo y herramientas más especializadas. Las tareas típicas realizadas en este nivel son: recuperación y sustitución de módulos y subsistemas principales, que exigen el desmontaje del sistema.
- Depósito o almacén/fabricante: donde la organización que produjo originalmente el sistema realiza las tareas de mantenimiento. Las tareas de mantenimiento realizadas en este nivel son de gran complejidad, y frecuentemente requieren mucho tiempo. Un personal especialmente preparado utiliza equipos y herramientas altamente especializados. El nivel de mantenimiento de fabricante incluye las revisiones generales, la reconstrucción y, ocasionalmente, el rediseño.

Dentro de los niveles de mantenimiento identificados, el diseñador/fabricante debe intentar definir una política de recuperación básica.

La política de recuperación puede variar, desde descartar el sistema entero cuando ocurre un fallo, hasta la recuperación completa del sistema, o la sustitución de los elementos que han fallado. Hay muchas combinaciones de políticas de recuperación cuya selección debe hacer el diseñador, en conjunción con los requisitos operativos definidos por el usuario.

La evaluación económica de los métodos alternativos de apoyo de un determinado elemento de «hardware», se conoce como análisis del nivel de reparación (Level of Repair Analysis, LORA). Se denomina óptimo al método menos costoso. Este tipo de análisis se limita a montajes «soportables», o sea capaces de recibir apoyo. Así, el LORA considera cada uno de los niveles de reparación que resume la Tabla siguiente, con el propósito de:

- determinar el nivel menos costoso en el que reparar un conjunto, cuyo diseño está completo (congelado);

- suministrar parte de los datos de entrada del análisis del coste del ciclo de vida para diversos tipos de evaluación;
- guiar al equipo de diseño, durante el análisis inicial, para seleccionar la opción más adecuada entre configuraciones alternativas de «hardware»/»software», permitiendo la optimización de la elección entre reparación o descarte.

1. Reparación organizativa	Reparaciones por el usuario
2. Reparación intermedia (local)	Reparaciones por Especialista en Destacamento
3. Reparación intermedia (remota)	Reparaciones por Especialista en Base
4. Reparación de depósito	Reparaciones por Especialista en Base más capacitado
5. Reparación en fábrica o por el contratista	La pieza reparada reaparece en el sistema militar
6. Eliminar cuando falla	Adquisición de pieza nueva

Tabla. Niveles de reparación a considerar

- Para facilitar un LORA acertado, se ha establecido el siguiente algoritmo
- Debe reunirse el conjunto de datos pertinentes para describir cada elemento de «hardware».
- Utilizar algún modelo de LORA que considere las categorías de coste correspondientes. Si existen varios escenarios de apoyo debe repetirse el mismo procedimiento para cada uno de ellos.
- Comparar los resultados y elegir la opción menos costosa.

3. MANTENIMIENTO

EL SER VIVO Y LA MÁQUINA ARTIFICIAL

La homeostasis había sido reconocida acertadamente por Cannon, (en 1932) como el conjunto de los procesos orgánicos que actúan para mantener el estado estacionario del organismo en su morfología y en sus condiciones interiores a despecho de las perturbaciones exteriores. No solo concierne al mantenimiento de la constancia de un medio interior, sino a la existencia íntegra del ser vivo. Por ello puede ser concebida en función de la regeneratividad en la que aparece como el carácter fenoménico de base de una organización productora, regeneradora, reorganizadora-de-sí.

El paradigma de la máquina artificial, sobreponderado por el paradigma de simplificación, disocia la idea de regulación y la idea de existencia. Efectivamente, la máquina artificial es un ser totalmente disociado entre su funcionamiento y su constitución y existencia. Lo que es activo en el artefacto es su funcionamiento; lo que está empujado y regulado es su funcionamiento. Por el contrario, el ser de la máquina existe sin el bucle, sin la regulación, sin el funcionamiento. Pero, si ya no hay funcionamiento posible, este ser deja de ser máquina y se convierte en cosa.

Toda organización activa trabaja, luego produce calor, luego desorden que necesariamente altera, tarde o temprano los componentes de la máquina, luego necesariamente subproduce usura, degradación, desorganización. De ahí la necesidad de reorganizar que una máquina organizadora de sí tiene. Ahora bien, este problema no podía sino quedar oculto en la máquina artificial que es regenerada desde el exterior por renovación, reparación y cambio de sus piezas. No hay, pues, regeneración-de-sí. No hay, pues, reorganización intrínseca.

(E. Morin, “El Método”)

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.

Cuando se precisa realizar análisis de los costes de posesión de un sistema, es decir su Coste del Ciclo de Vida, lo primero que hacemos es reunirlos en cuatro grandes grupos, Costes de Adquisición, Costes de Operación, Costes de Mantenimiento y Costes de Retirada. Este agrupamiento nos está indicando la gran importancia que se da (o se debe dar) a los Costes de Mantenimiento, tanto por parte del usuario como por los diseñadores y fabricantes. Por lo tanto, **“el mantenimiento, debido a los costes que supone, no debe ser aceptado como una consecuencia inevitable de la utilización de los sistemas si no que debe ser planteado, por los diseñadores, fabricantes y usuarios, como una actividad que requiere de análisis técnicos de ingeniería con objeto de optimizarle y reducirle en sus costes”**.

Por otra parte, a pesar de que un sistema esté totalmente operativo al comienzo de su vida operativa, todo usuario es totalmente consciente de que, independientemente de la perfección del diseño, de la tecnología de su producción o de los materiales usados en su fabricación, a lo largo de su operación se producirán ciertos cambios irreversibles. Estos cambios son resultado de procesos tales como roturas, corrosión, desgastes, abrasión, acumulación de deformaciones, distorsiones, sobrecalentamientos, fatiga, difusión de un material en otro, errores, efectos del medio ambiente, etc., y que a menudo se superponen e interactúan los unos con los otros y causan un cambio físico en el sistema que inevitablemente va a producir cambios en las características de operación del mismo. La desviación de esas características respecto a los valores especificados es lo que se considera como un fallo del sistema.

Para que un sistema mantenga su capacidad operativa o la recupere cuando la ha perdido es necesario realizar unas tareas especificadas, conocidas como tareas de mantenimiento, las cuales nos van a permitir mantener su funcionalidad mediante la prevención y mitigación de procesos que puedan provocar inoperatividad en el sistema o corrigiendo el fallo producido por la actividad propia del mismo.

Al conjunto de actividades de mantenimiento realizadas o gestionadas por el usuario para mantener la operatividad del sistema durante su vida útil lo denominamos proceso de mantenimiento y la herramienta necesaria para llevar adelante la gestión del mismo es el Plan de Mantenimiento.

Si hacemos el ejercicio mental de situarnos en medio de la vida operativa de un sistema productivo podremos ver que el responsable del su mantenimiento se encontrará, en el transcurso de su actividad, con una serie de situaciones en las que ha de tomar una determinada decisión con objeto de preservar la disponibilidad del sistema o de devolvérsela si la ha perdido. Si analicemos una por una todas esas situaciones, mediante diagramas lógicos de toma de decisión, nos encontraremos con que un factor decisivo, aunque no imprescindible, de apoyo a la toma de las decisiones es la existencia de un Plan de Mantenimiento (Ver en Anexo B algunos de estos diagramas). Disponer de un Plan de Mantenimiento es, por lo tanto, el primer compromiso del responsable del mantenimiento del sistema, aunque no sea su obligación el desarrollo del mismo.

El Plan de Mantenimiento, si nos atenemos a los planteamientos de la Ingeniería de Sistemas y a la estrategia de la Ingeniería Concurrente, ha de ser suministrado por el fabricante conjuntamente con el sistema; pero la realidad es, como todos sabemos, muy variopinta. Hay sistemas que por su complejidad y elevado coste, como son los sistemas de armas, suelen ir acompañados con un Plan de Mantenimiento completo y además con la herramienta informática adecuada para su gestión. Otros, también complejos y de costes elevados, como son ciertos sistemas de producción en el ámbito civil, pueden disponer de un Plan de Mantenimiento tan completo como los de los sistemas de armas y disponer también de la correspondiente herramienta informática de gestión. Pero lo normal es encontrarnos con sistemas que, o no disponen del Plan de Mantenimiento o si disponen del mismo es anticuado y sin la correspondiente herramienta informática de gestión. Debido a esta última situación, que será con la que normalmente nos vamos a encontrar, el responsable del mantenimiento del sistema no tendrá más remedio que promover el desarrollo del Plan de Mantenimiento y adquirir la herramienta

informática adecuada, ya que en definitiva será esta la que le permitirá gestionar todo el proceso de mantenimiento e introducir los cambios al mismo sin unos costes excesivos.

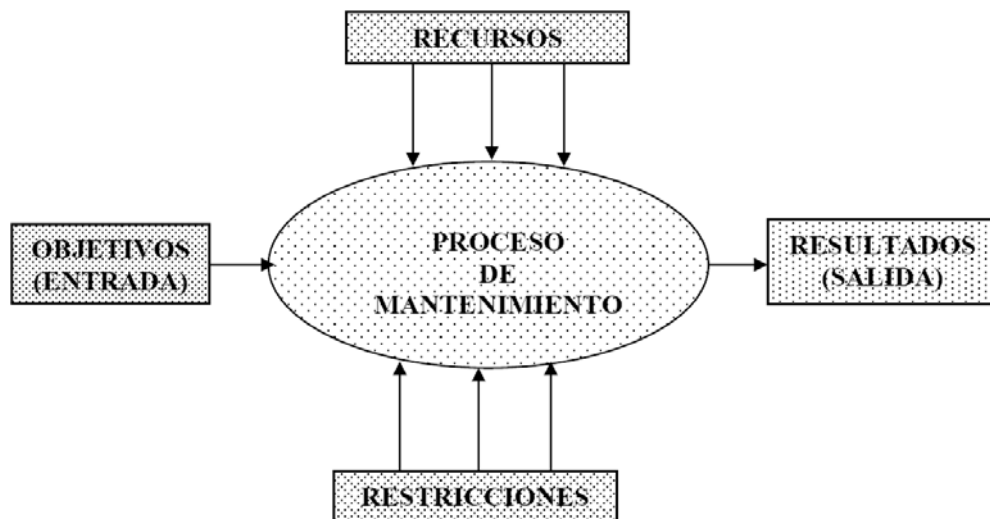
Por todo ello y de cara a conocer todo lo que debe saber el responsable del mantenimiento de un sistema de producción es necesario ver cómo nace el Plan de Mantenimiento, que características tienen las actividades de mantenimiento que planifica, como se gestionan los recursos requeridos por dichas actividades, como se gestiona el proceso de mantenimiento de un sistema y que métodos podemos utilizar para optimizar la eficacia del mantenimiento en relación con los costes del mismo.

Plantear la irreversibilidad del tiempo y el deterioro constante de la materia, la desorganización de la organización compleja. **Un equipo no se puede poner a cero (condición de partida o nacimiento) por mucho que se le mantenga.**

1.2 El proceso de mantenimiento.

Todos los usuarios desean, por razones obvias, que sus sistemas se mantengan operativos durante tanto tiempo como sea posible. Para lograrlo es necesario "ayudar" (apoyar) al sistema a mantener su operatividad, realizando las tareas apropiadas. Esta es una de las diferencias principales entre un elemento creado por la naturaleza y un elemento creado por el hombre, ya que el primero es capaz de ayudarse a sí mismo (homeostasis), mientras que el segundo necesita siempre una ayuda externa (excepto en casos en los que el sistema tiene capacidad de auto configurarse, es decir dispone de elementos redundantes que le permiten continuar con la función fallida). Algunas de esas ayudas o tareas son exigidas o sugeridas por los diseñadores o fabricantes. Sin embargo, a pesar de todas las tareas realizadas, no se puede conseguir el posponer indefinidamente el momento en que el sistema deja de funcionar, es decir, falla. A partir de ahí, es necesario realizar otras tareas para que recupere su funcionalidad. Esto conduce al concepto de mantenimiento que incluye todas las tareas que realiza el usuario para conservar la operatividad del sistema (tareas de mantenimiento preventivo), o para recuperarlo al estado operativo cuando lo ha perdido (tareas de mantenimiento correctivo).

El mantenimiento, como proceso (conjunto de actividades logísticas), se plantea con unos objetivos, utiliza unos recursos, está sometido a restricciones y alcanza unos resultados:



Los objetivos son:

- Mantener la operatividad
- Recuperar la operatividad

Como resultado, fundamentalmente será la:

- Disponibilidad del sistema

Los recursos a emplear serán los requeridos por los Elementos Logísticos, que como sabemos son los siguientes:

- Plan de Mantenimiento
- Aprovisionamiento de Repuestos y Consumibles: es un nombre genérico que incluye el suministro de todos los repuestos, elementos de reparación, consumibles, suministros especiales y artículos de inventario necesarios para apoyar a los procesos de mantenimiento.
- Herramientas y equipos de apoyo y prueba: incluye todas las herramientas, equipos especiales de vigilancia de la condición, equipos de comprobación, metrología y calibración, bancos de mantenimiento, y equipos auxiliares de servicio necesarios para apoyar a las tareas de mantenimiento asociadas al elemento o sistema.
- Personal: se incluye el necesario para la instalación, comprobación, manejo y realización del mantenimiento del elemento o sistema y de los equipos necesarios de prueba y apoyo. Debe considerarse la formación específica del personal necesario para cada tarea de mantenimiento.
- Instalaciones de mantenimiento: incluye las instalaciones especiales precisas para la ejecución de las tareas de mantenimiento. Deben considerarse las plantas industriales, edificios, edificaciones portátiles, fosos de inspección, diques secos, refugios, talleres de mantenimiento, laboratorios de calibración y otras instalaciones para reparaciones especiales y revisiones generales relacionadas con cada tarea de mantenimiento.
- Empaquetado, Manejo Almacenamiento y Transporte
- Datos técnicos y documentación: 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.
- Recursos informáticos: comprende los ordenadores y sus accesorios, «software», discos y cintas de programas, bases de datos, etc., necesarios para realizar las funciones de mantenimiento. Incluye tanto la vigilancia de la condición como el diagnóstico.

Como restricciones (limitaciones o “constrains) más comunes tenemos:

- Presupuesto
- Programación
- Tiempo disponible
- Reglamentaciones de seguridad y medio ambiente
- Entorno
- Lenguas extranjeras.
- Cultura/costumbres tradicionales.

1.3 El mantenimiento y la disponibilidad, la seguridad y la economía.

El mantenimiento, como actividad humana a desarrollar sobre los sistemas, tiene gran influencia sobre factores muy importantes de los mismos como son la disponibilidad, la seguridad y la economía relacionada con el sistema.

La mayoría de los usuarios afirman que necesitan la disponibilidad del sistema tanto como la seguridad (entendiendo esta como las consecuencias y efectos, humanos y de coste, que pueden desencadenarse cuando falla un sistema), porque no se puede tolerar tener un sistema fuera de servicio. Para lograrlo hay fundamentalmente dos medios; uno es construir los sistemas extraordinariamente fiables y robustos frente al fallo pero, consecuentemente, costosos; el segundo es suministrar un sistema que, cuando falle, sea fácil de recuperar.

Esa recuperabilidad, como ya hemos visto en el módulo de Mantenibilidad, va a depender de los factores MTTR y MLDT que intervienen en la Disponibilidad Operativa (Ao):

El MTTR (como métrica de la Mantenibilidad), es un resultado del diseño e instalación de los sistemas y por lo tanto es la Ingeniería de Mantenibilidad la que trata de su optimización. El MLDT (los retrasos logísticos) será el resultado del Apoyo Logístico Integrado (que incluye el Plan de Mantenimiento) suministrado por el contratista conjuntamente con el sistema y de la gestión de dicho apoyo logístico que el usuario va a tener que realizar a lo largo del ciclo de vida del sistema; la Soportabilidad tiene como objetivo la optimización de este valor (la Soportabilidad es un módulo más del MLI).

Por otra parte, la realización de cualquier tarea de mantenimiento está asociada con unos costes, tanto en términos de coste de recursos de mantenimiento, como de pérdida de beneficios por no tener el sistema disponible para la operación. Por lo tanto, los departamentos de mantenimiento son unos de los mayores centros de coste, que exigen a la industria millones de euros al año, habiéndose convertido así en un factor crítico en la ecuación de rentabilidad de muchas compañías. En consecuencia, puesto que los planes de mantenimiento se vuelven cada vez más costosos, cada vez se reconoce más la importancia de la Ingeniería de Mantenibilidad.

Los costes de mantenimiento tienen tanta importancia para la industria que a primeros de los años 90 surgió una estrategia industrial denominada Mantenimiento Total de la Producción (Total Productive Maintenance. TPM) que trata de optimizar la disponibilidad de los sistemas de fabricación, durante su vida operativa, además de una reducción drástica de los costes de mantenimiento.

Y otro aspecto del que no nos debemos olvidar es que la realización de cualquier tarea de mantenimiento está asociada con un cierto riesgo, tanto respecto de la realización incorrecta de una tarea de mantenimiento específica, como de las consecuencias que la realización de la tarea acarrea en otros componentes del sistema, esto es, la posibilidad de inducir un fallo en el sistema durante el proceso de mantenimiento. Como ejemplo tenemos la siguiente información:

1 El Airbus A320 de Excalibur Airways realizó un balanceo no controlado a la derecha, debido a la pérdida de control de un «spoiler» (dispositivo hipo-sustentador) justo después del despegue del Aeropuerto de Gatwick en Londres, Reino Unido, en agosto de 1993.

Un informe publicado en febrero de 1994 por el Departamento de Investigación de Accidentes Aéreos (Air Accidents Investigation Branch, AAIB), establecía que «la emergencia se originó, no en algún fallo mecánico, sino en una compleja sucesión de errores humanos por parte del personal de mantenimiento y de ambos pilotos». Aparentemente, durante el cambio del «flap», el personal de mantenimiento no cumplió con el manual de mantenimiento. Los «spoilers» fueron colocados en modo de mantenimiento y no se dispusieron los pasadores y banderolas correspondientes. Tampoco se efectuó el restablecimiento en la posición primitiva y la prueba funcional de los «spoilers» tras la instalación del «flap».

Además, los pilotos no se apercibieron durante el chequeo funcional de los mandos de vuelo, de que los «spoilers» dos a cinco del ala derecha no respondían a las acciones de balanceo hacia la derecha.

El AAIB hizo 14 recomendaciones de seguridad a la Autoridad de Aviación Civil (Civil Aviation Authority), incluyendo formalmente recordar a los técnicos su responsabilidad de asegurar que todo el trabajo se lleva a cabo de acuerdo con el manual de mantenimiento, y que no se certifique ningún trabajo efectuado de otra forma. También se recomienda que Airbus corrija el manual de mantenimiento del A320 en lo referente a la sustitución de los «flaps», y que los capítulos sobre el montaje de los «flaps» y la desactivación de los «spoilers» incluyan avisos específicos para reintegrar la condición y hacer funcionar los «spoilers» tras su desactivación.

- 2 *Un análisis de los accidentes de aviación civil más graves, como consecuencia de la realización no satisfactoria de tareas de mantenimiento, muestra que entre 1981-85 hubo 19 fallos asociados al mantenimiento que costaron en total 923 vidas. El mayor accidente tuvo lugar el 12 de agosto de 1985, cuando el Boeing 747, propiedad de JAL, sufrió una descompresión debido a fatiga a causa de una mampara inadecuadamente reparada, con la muerte de 520 personas.*

El mismo análisis muestra que durante 1986-90, hubo 27 fallos asociados al mantenimiento, cobrándose 190 vidas. La más trágica fue la caída del DC-10 de United, en 1989, cuando la fatiga del disco del «fan» del segundo motor causó un fallo completo de los sistemas hidráulico y de control de vuelo, con la pérdida de 111 vidas.

1.4 El mantenimiento y el análisis de apoyo logístico.

Ante todo es preciso aclarar que todo sistema de producción o servicios ha sido, durante el periodo inicial de su vida (diseño, construcción, pruebas, etc.) un sistema producto y que como tal ha tenido que ser contemplado por los que han participado en su obtención e implantación en su entorno operativo; ello quiere decir que, como tal sistema producto, debería dotársele de su correspondiente apoyo logístico (plan de mantenimiento más recursos de apoyo), como se propone en la Ingeniería de Sistemas. Pero ello no siempre es así y ocurre, con demasiada frecuencia, que muchos de estos sistemas carecen, a lo largo de su vida útil, de un plan de mantenimiento adecuadamente establecido durante ese periodo inicial y que exige, de los utilizadores, ejecutar el mantenimiento del mismo recurriendo a prácticas convencionales y anacrónicas sin control ni planificación que provocan, normalmente, una disminución de la disponibilidad operativa del sistema. Para evitar esto, la Ingeniería de Sistemas propone diseñar el apoyo logístico durante el periodo de obtención de los sistemas, sean del tipo que sean.

El Apoyo Logístico Integrado (ALI), como estrategia industrial diseñada para definir y suministrar el apoyo logístico de los sistemas de forma integrada, dispone de una herramienta metodológica, el Análisis de Apoyo Logístico (Logistic Support Analysis. LSA), que permite definir todos los recursos de apoyo y obtener la base de datos logísticos (la base LSAR) para que el usuario pueda gestionar todos esos recursos a lo largo del periodo de vida útil del sistema de producción o servicios.

El LSA es un compendio de procesos de análisis que han de ser desarrollados, de forma secuencial, durante los procesos de obtención de los sistemas. Estos procesos son, en su mayoría, métodos que forman parte de diversas disciplinas de la Ingeniería de Sistemas, como Configuración, Fiabilidad, Mantenibilidad, Soportabilidad, etc.

De esos análisis se van a destacar aquí, mediante someros resúmenes, aquellos que aportan datos para la definición de los recursos de mantenimiento, ya que el estudio y definición de todos ellos son objeto del campo de la SOPORTABILIDAD.

1.4.1 El Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Reliability-Centered Maintenance RCM)

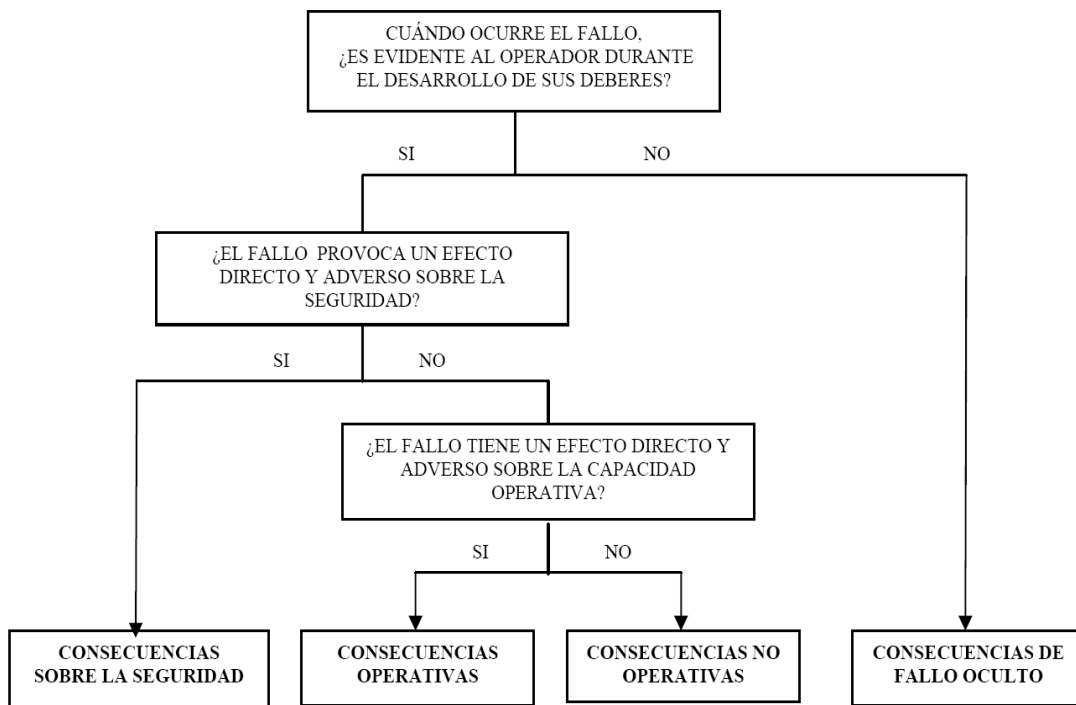
El análisis de mantenimiento centrado en la fiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM) es una técnica desarrollada en la década de los 70 en el sector de la aviación comercial. La complejidad de las nuevas aeronaves, en especial el Boeing 747, dificultaba el desarrollo de los programas de mantenimiento preventivo siguiendo los métodos convencionales, y el RCM surgió en respuesta a esa problemática. El objetivo básico del RCM es desarrollar un programa de mantenimiento preventivo efectivo y eficaz, que ayude a prevenir la aparición de fallos y contribuya a mantener operativo el sistema. El proceso de RCM es iterativo y parte de la identificación de los modos de fallos que pueden presentarse, resultado de haber realizado el análisis FMECA. Los resultados del análisis del RCM son tanto más positivos cuanto antes comience su aplicación en el proceso de diseño; sin embargo, también puede aplicarse con éxito a sistemas que se encuentren ya en uso, al ayudar a planificar el mantenimiento preventivo de forma óptima. El proceso del RCM se basa en las respuestas que se deben dar a las siguientes siete cuestiones:

- a) ¿Cuáles son las funciones y las prestaciones asociadas normales del elemento en un contexto de operación real y observable?
- b) ¿Cuáles son las vías por las que se producen los fallos del elemento en el cumplimiento de sus funciones?
- c) ¿Qué es lo que provoca el fallo funcional?

- d) ¿Qué podemos esperar cuando ocurre el fallo?
- e) ¿Cuál es el camino por el que se ha producido el fallo?
- f) ¿Qué se puede hacer para prevenir el fallo?
- g) ¿Qué se debería hacer si no encontramos una tarea preventiva conveniente?

La esencia del RCM es un árbol estructurado de decisión que conduce al diseñador a identificar rediseños necesarios o a establecer la tarea de mantenimiento más apropiada para cada posible fallo del sistema (o elemento) y de esa forma definir el plan de mantenimiento preventivo óptimo para un sistema. Como resultado adicional el RCM ayuda, aunque no es su objetivo primordial, a identificar las tareas de mantenimiento correctivo necesarias para devolver el sistema al estado operativo una vez que se haya presentado un fallo. El proceso de ejecución de un RCM puede dividirse en las siguientes dos etapas:

- a) Aplicación del árbol lógico de decisión. Debe aplicarse a todos y cada uno de los modos de fallos identificados en la realización del análisis FMECA. Para cada modo de fallo estudiado se determinará, siguiendo la lógica del árbol de decisión, si es apropiado modificar la configuración del sistema para evitar la presencia potencial de ese modo de fallo, o si basta con establecer una tarea de mantenimiento preventivo que ayude a disminuir la probabilidad de ocurrencia del fallo o a paliar sus posibles efectos. Finalmente, si el rediseño o el establecimiento de una tarea preventiva no fueran posibles o adecuados, se determinará la tarea de mantenimiento correctivo a ser desarrollada para devolver el sistema a estado operativo, si se presentara el fallo. Las primeras decisiones lógicas del árbol del RCM son las del diagrama que sigue a este párrafo. El resto del árbol permite definir la tarea de mantenimiento más adecuada para cada caso o una recomendación de rediseño.
- b) Evaluación del programa de mantenimiento preventivo. El programa de mantenimiento preventivo establecido mediante la aplicación del RCM debe ser continuamente evaluado, tanto en términos de los recursos consumidos como de los resultados producidos en el sistema. El objeto es actualizar permanentemente el programa de mantenimiento preventivo que contribuya de manera óptima a alcanzar la relación efectividad/coste buscada por el usuario del sistema.

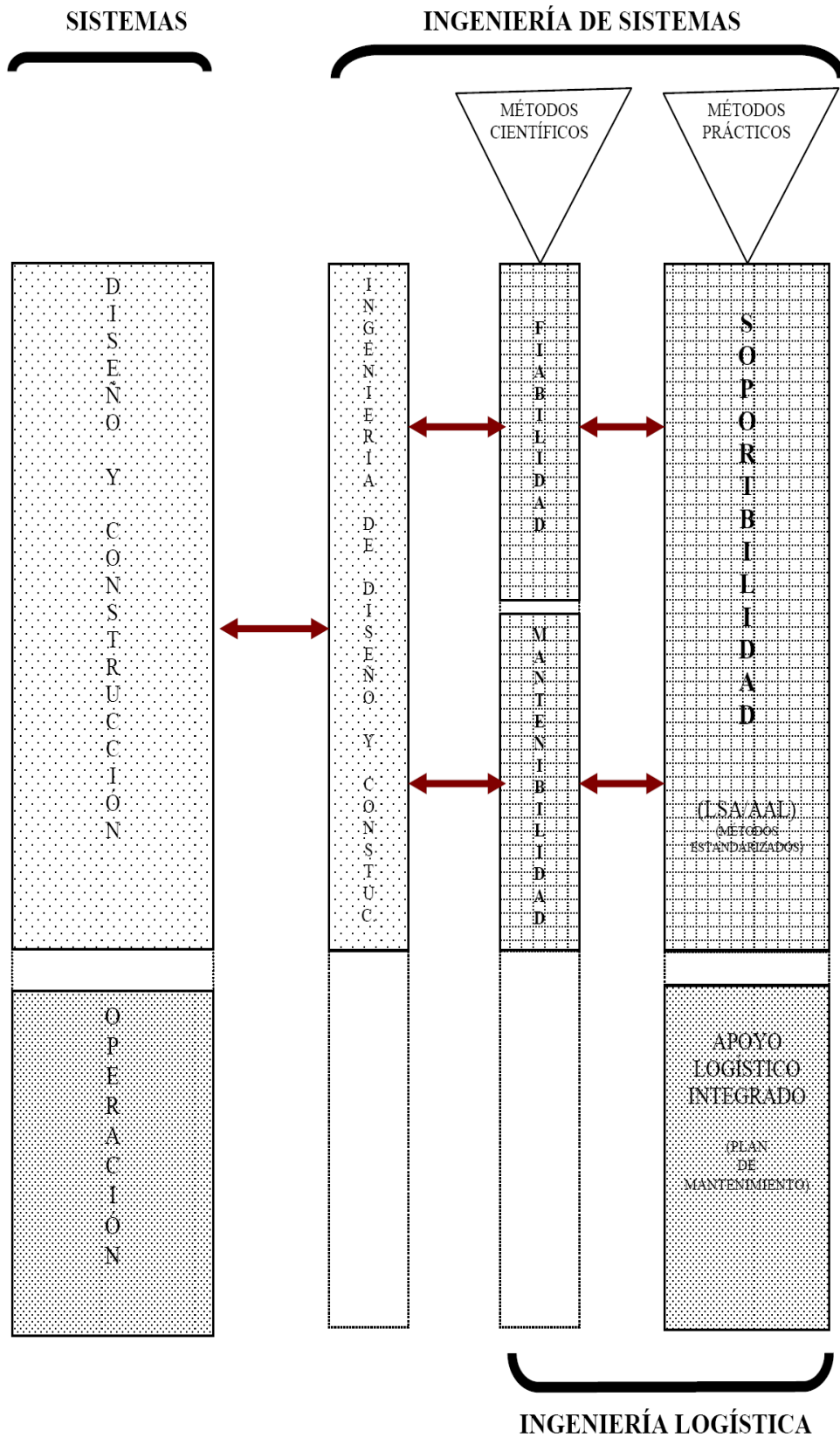


1.4.2 Análisis del Nivel de Reparación (Level of Repair Analysis LORA)

El análisis de nivel de reparación (level of repair analysis, LORA) permite establecer, empleando criterios tanto económicos como técnicos, el nivel de mantenimiento más adecuado para la realización de cada tarea, así como si ante el fallo de un componente éste debe ser reparado o si, por el contrario, debe ser desechado. Para cada sistema deberá adoptarse el modelo del LORA adecuado, que refleje los aspectos técnicos y económicos que deban ser empleados en la asignación de tareas a niveles, buscando siempre que el plan de mantenimiento proporcione la mejor relación efectividad/coste al usuario del sistema.

1.4.3 Análisis de las Tareas de Mantenimiento (Maintenance Task Analysis. MTA)

Cuando el resultado del RCM es la aplicación de una determinada tarea de mantenimiento y su ejecución ha sido asignada al nivel de mantenimiento adecuado el siguiente paso es desarrollar el análisis de las tareas de mantenimiento (maintenance task analysis, MTA) que nos va a permitir obtener una descripción detallada del proceso de ejecución de la tarea de mantenimiento e identificar los recursos (herramientas, repuestos, consumibles, etc.) necesarios a emplear. Las tareas de mantenimiento son analizadas en profundidad para determinar los tiempos requeridos en su ejecución, la cantidad de personal de mantenimiento y sus cualificaciones necesarias, las herramientas comunes y especiales que sean requeridas, los repuestos y consumibles a ser empleados, los adiestramientos necesarios para la ejecución de la tarea, etc.



Relación entre Soportabilidad y el Plan de Mantenimiento.

2. MANTENIMIENTO TOTAL DE LA PRODUCCIÓN (TPM)

2.1 Generalidades.

El Mantenimiento Total de la Producción (TPM) surgió a principios de los 90 como una estrategia empresarial de carácter secundario que refuerza a la Calidad Total en el área de producción. Como estrategia se concreta en una novedosa forma de gestionar el mantenimiento de cualquier sistema de producción.

Esta estrategia parte de dos supuestos:

1. El operario de un equipo (máquina-herramienta) es el que más posibilidades tiene de conocer cómo opera realmente dicho equipo, cuáles son sus capacidades y limitaciones y cuales sus defectos, si, por supuesto, se le prepara para ello. Es decir, es necesario tener presente el sistema hombre-máquina que se forma.
2. Todo sistema de producción se comporta como un sistema abierto, lo mismo que los distintos departamentos de la empresa. Esto obliga a que, por las múltiples relaciones que se establecen entre unos y otros, todos ellos se involucren en la implantación de la estrategia y por lo tanto en la gestión del mantenimiento.

Esta estrategia nació como una respuesta a los problemas de mantenimiento y apoyo en una factoría industrial y constituye una aproximación sistemática y continua a la integración del apoyo y el mantenimiento con la producción, durante el ciclo de vida de la factoría. El TPM, por lo tanto, coopera en la mejora del proceso entero de la producción y se le ha definido como *"un conjunto de actividades de gestión y mantenimiento que nos van a permitir restaurar los equipos y llevarlos a una condición optima, así como modificar el entorno de trabajo para mantener esas condiciones"*.

El objetivo que se marca la estrategia es conseguir la máxima eficacia de la maquinaria de producción mediante la implantación particularizada del plan de mantenimiento preventivo y la reasignación de las responsabilidades en su ejecución.

La palabra "Total" incluida en el concepto del TPM aporta tres importantes significados:

- **Efectividad total** indica que el TPM persigue una eficiencia y rentabilidad económica.
- **Sistema de mantenimiento total** incluye mejoras en la mantenibilidad y en la prevención de averías, así como la implantación del mantenimiento preventivo. Todo ello basado en diseños "libres de mantenimiento" a través de la incorporación de características de fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad en la maquinaria de la factoría.
- **Participación total de los trabajadores** lo que supone un mantenimiento autónomo realizado por los operarios a través de la formación de pequeños grupos de actividades. Esencialmente significa que el mantenimiento es cumplimentado mediante un esfuerzo de grupo en el que el operador es el último responsable del cuidado de la maquinaria con la que opera.

Otro aspecto muy sutil que implica esta estrategia, con un trasfondo cultural importante, es el de que el operario conciba a la máquina que opera como algo suyo, su herramienta imprescindible de trabajo, su compañera de actividad, etc. y nunca como un bien de uso perteneciente a otro.

2.2 La producción y el mantenimiento.

Para llevar a efecto una estrategia de PTM es necesario plantearse (y analizarlos si es necesario) los siguientes aspectos de nuestro sistema de producción:

1. Averías y Defectos, Causas

Las averías crónicas en los equipos y defectos en la producción pueden tener muchas causas. La primera es la máquina, es decir su diseño y fiabilidad y la segunda es el personal; en muchos de los casos en los que se investiga una avería, invariablemente se encuentran factores relacionados con las personas, es decir con la responsabilidad de los operadores. Esta responsabilidad afecta muy directamente a ciertas condiciones que favorecen la aparición de averías en la maquinaria de los talleres, como:

- Condiciones del equipo, su estado de suciedad y limpieza.
- Condiciones del área alrededor del equipo y espacios de movimiento.
- Los operarios del equipo y su motivación, (cambios de actitud).
- Pérdidas de tiempo del equipo por problemas pequeños.

Objetivo en la operatividad de los equipos "Cero averías, Cero defectos".

Este objetivo tendrá como resultado una mejora de la disponibilidad. Para cuyo conocimiento es necesario tener en cuenta la distribución del tiempo en las máquinas:

		DEMANDA DE SERVICIO	
		Tiempo demandado (Requerido)	Tiempo no demandado (No requerido)
CONDICIÓN DE LA MÁQUINA	TA Tiempo de Aptitud (Disponible)	TF Tiempo de Funcionamiento	TL Tiempo Libre
	TI Tiempo de Ineptitud (Indisponible)	TAR Tiempo Activo de Reparación	TMP Tiempo de Mantenimiento Preventivo
		TRL Tiempo de Retrasos Logísticos	

2. Eliminación de Pérdidas de Tiempo en los Equipos

Básicamente hay dos formas de mejorar la eficacia del equipo, una directa y otra indirecta. La vía directa consiste en sacar el mayor provecho posible de las funciones y características de rendimiento del equipo. La indirecta es eliminar los obstáculos a la eficacia y que son las siguientes seis grandes pérdidas:

- Pérdidas por averías.
- Pérdidas por preparación y ajustes.
- Pérdidas por tiempos muertos o paradas pequeñas.
- Pérdidas por reducción de la velocidad del equipo.
- Pérdidas por arranque.
- Pérdidas por defectos de calidad y trabajos de rectificación.

Todas estas pérdidas incrementan los costes de producción ya que afectan de forma directa a alguna de las características que forman parte de los factores incluidos en la eficacia global de los equipos que configuran el sistema productivo.

EFICACIA GLOBAL = DISPONIBILIDAD X RENDIMIENTO X CALIDAD

Disponibilidad (o tasa de operación). Se ve afectada por las pérdidas de tiempos por averías, preparación y ajustes

Rendimiento (o índice de rendimiento). Se ve afectada por las pérdidas por reducción de velocidad, tiempos muertos o paradas pequeñas y arranque.

Calidad (o tasa de calidad). Se ve afectada por los defectos de calidad en la producción.

3. El Mantenimiento Autónomo en Producción

El mantenimiento autónomo requiere que los operarios conozcan como se debe mantener el equipo que operan. La experiencia en el trabajo, no solo no debe estar relacionada con hacer funcionar el equipo, también debe incluir otros aspectos tales como conocer como está construido y que componentes forman parte de su configuración y por supuesto conocer su plan de mantenimiento, aunque muchas de las tareas de mantenimiento no puedan ser realizadas por el propio operario. Cuando un operario conoce y participa en el mantenimiento del equipo pasa a tener la categoría de *operador-mantenedor*.

Un operador-mantenedor debe tener, como mínimo, las siguientes habilidades:

- Capacidad para entender las funciones del equipo y sus mecanismos (partes del equipo, hidráulica, neumática, sistemas de control, lubricación, etc.), así como habilidad para detectar las causas de las anomalías.
- Capacidad para detectar anomalías y realizar mejoras de producción.
- Capacidad para entender las relaciones entre las operaciones del equipo y la calidad de la producción y capacidad para predecir problemas de calidad y detectar sus causas.
- Habilidad para realizar reparaciones y mantenimientos.
- Capacidad para seleccionar y comunicar la información, requerida por la base de datos del sistema de información de la empresa, sobre el estado operativo del equipo.

En muchos casos el mantenimiento autónomo no consiste solamente en formar operadores-mantenedores ya que, en situaciones en las que un conjunto de equipos o máquinas-herramientas cooperan en un proceso intermedio de la producción, posiblemente sea necesario formar grupos autónomos de operadores, coordinados por un líder, que conjuntamente mantengan todos los equipos con el objetivo de alcanzar y mantener las cotas de calidad exigidas en dicho proceso.

4. Cooperación de los Departamentos de la Empresa

En muchas empresas españolas el mantenimiento ha sido, históricamente, la actividad principal del departamento denominado de "planta" o de "mantenimiento", en algunos casos. Este aspecto y una estructura empresarial de tipo funcional provoca, como se ha podido comprobar en múltiples situaciones, una gran descoordinación entre las actividades de "planta" y las necesidades de la producción con la consiguiente reducción de la tasa de operación de los equipos por pérdidas de tiempo debidas a las esperas de los mantenedores que "planta" asigna en función de la propia carga de trabajo.

El cambio que propone el TPM es el de un reparto de las actividades de mantenimiento de los equipos entre los operarios del mismo y el departamento de "planta", con la consiguiente, necesaria y obligada, cooperación entre los departamentos de "planta" y producción.

El resto de departamentos de la empresa deben de cooperar en distintas facetas, como por ejemplo: la adquisición de equipos resistentes al fallo, responsabilidad del departamento de compras. Y por supuesto en la implantación de una estrategia de TPM.

2.3 Implantación de la estrategia del TPM

Un plan de mantenimiento eficaz para un sistema de producción debe estar integrado totalmente con los objetivos de la producción.

El mantenimiento de un sistema de producción en uso, es decir operativo, no solo depende del plan de mantenimiento que los diseñadores y constructores de dicho sistema de producción suministraron con el mismo, en el momento de la entrega; si no que la dinámica de su utilización debe inducir al usuario a

realizar las adaptaciones que se requieran, provocadas estas por una productividad que se ve afectada por un entorno de mercado competitivo y globalizador.

La implantación de la estrategia del TPM permite llevar a efecto esas adaptaciones mediante un plan que incluya las siguientes etapas:

- 1) Plantear la implantación del TPM a todos los departamentos de la empresa para involucrarlos y co-responsabilizarlos en su gestión.
- 2) Establecer un sistema de mantenimiento planificado, si no se dispone del mismo.
- 3) Llevar a cabo actividades de mejoras para aumentar la eficacia de los equipos. Estas mejoras han de incluir la selección de máquinas y equipos resistentes al fallo, en los cambios de equipos o para nuevas instalaciones.
- 4) Realizar un programa de cursos de adiestramiento y formación de grupos autónomos de mantenimiento.
- 5) Establecer un sistema de información que permita seguir el curso de la implantación del TPM, de las mejoras en la producción y del estado de los componentes del sistema productivo.

Como resumen final y de forma sintetizada, la estrategia del TPM incluye los siguientes aspectos:

- 1) El TPM tiene como principal objetivo maximizar la eficacia de la maquinaria, fundamentalmente su disponibilidad.
- 2) El TPM propone el establecimiento de un plan de mantenimiento preventivo para toda la vida de la maquinaria.
- 3) El TPM ha de ser implantado con la colaboración de varios departamentos de la compañía, ingeniería, operaciones y mantenimiento.
- 4) El TPM involucra a cada empleado, desde los altos directivos hasta los trabajadores de la planta.
- 5) El TPM está basado en la promoción del mantenimiento preventivo a través de una "motivación en la gestión" a los participantes en los llamados "pequeños grupos autónomos de actividades".

3. LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO

3.1 Generalidades

El elemento básico del mantenimiento es la *tarea de mantenimiento*, a la que podemos definir como *el conjunto de actividades que debe realizar el usuario para mantener la operatividad del elemento o sistema*. Y que, según su objetivo, se clasifican en:

- a) Tareas correctivas
- b) Tareas preventivas programadas
- c) Tareas preventivas predictivas

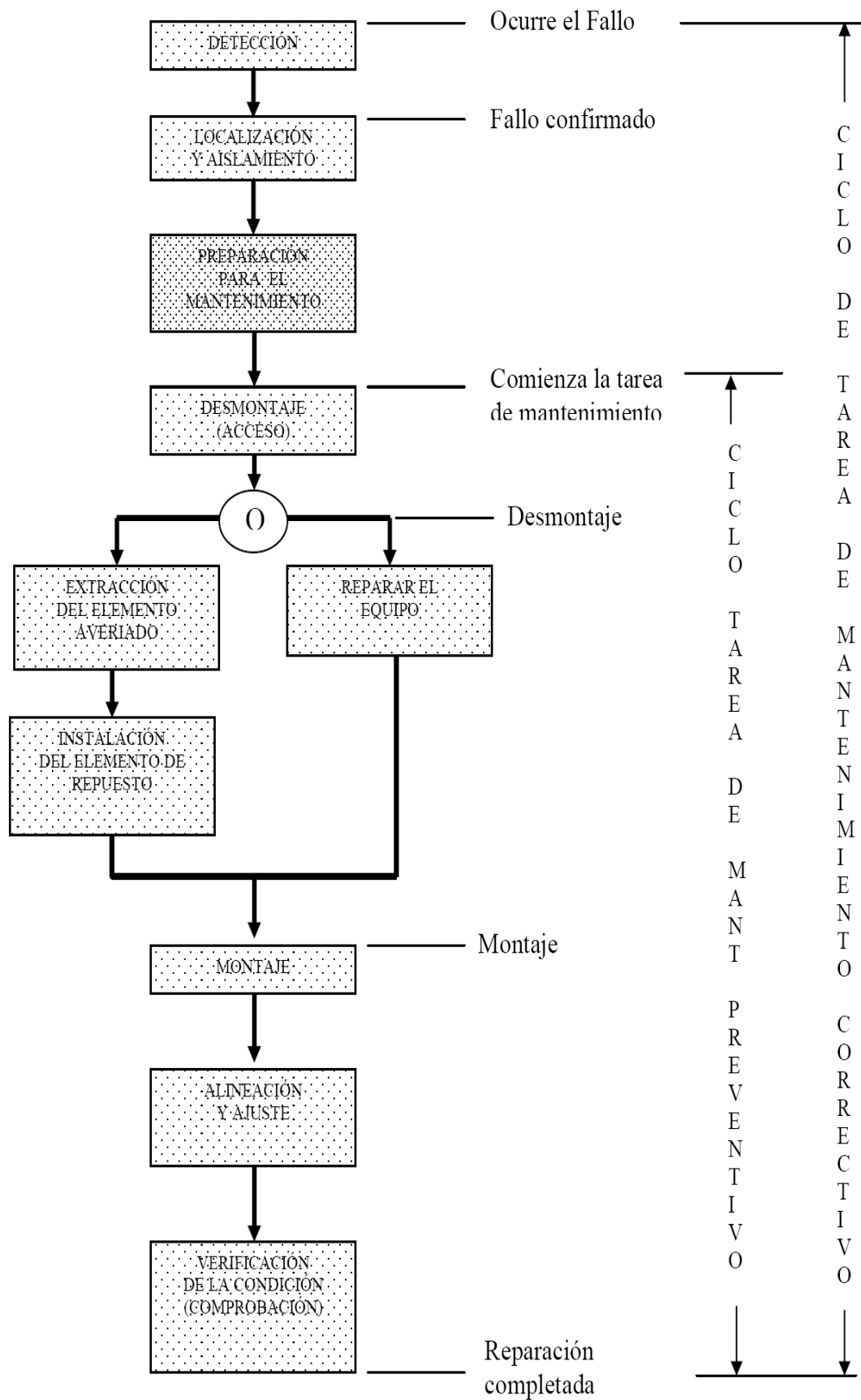
Toda tarea de mantenimiento se caracteriza por los siguientes aspectos:

1. Las actividades elementales que la componen
2. Tiempo requerido para su ejecución.
3. La periodicidad con la que se realiza.
4. El nivel de mantenimiento donde está prevista su ejecución
5. Y los recursos que se utilizan o consumen.

Mediante el análisis de las tareas de mantenimiento (Maintenance Task Analysis, MTA), que es uno de los análisis metodológicos del AAL/LSA, podemos definir y almacenar en una base de datos la descripción detallada del proceso de ejecución de cada tarea, su periodicidad y la identificación de los recursos necesarios para su ejecución. Las tareas de mantenimiento son analizadas para determinar, los tiempos requeridos en su ejecución, la cantidad de personal de mantenimiento y sus cualificaciones necesarias, los adiestramientos previos necesarios, las herramientas comunes y especiales que se han de

utilizar, los repuestos y consumibles a ser empleados, la documentación a utilizar, el nivel de mantenimiento donde se debe ejecutar etc.

El proceso de ejecución de las tareas correctivas y programadas conlleva la realización secuencial de un conjunto de actividades elementales, las cuales se pueden identificar de forma genérica como se indica en la figura de la página siguiente.



3.2 Proceso de fallo versus tarea de mantenimiento.

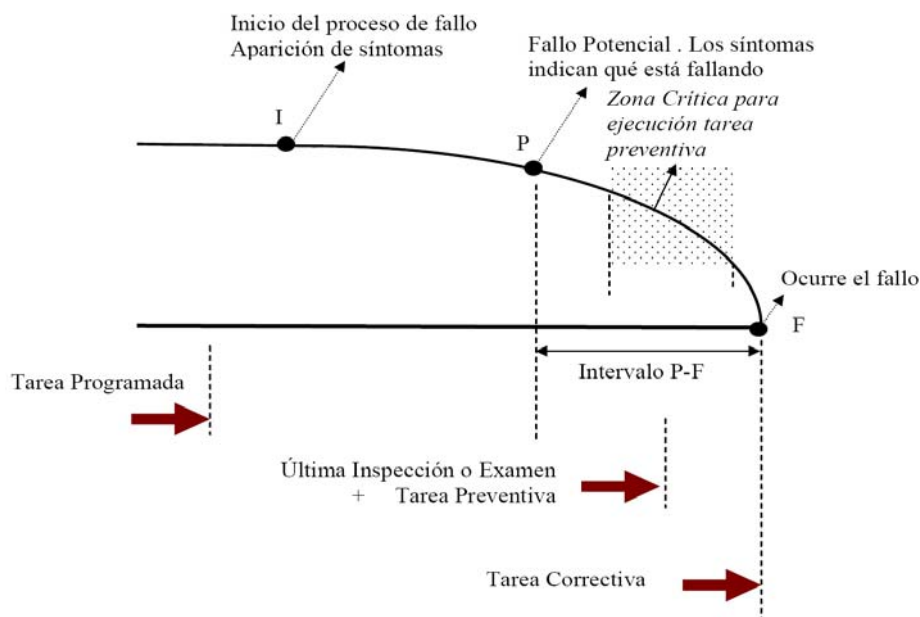
Muchos hemos podido comprobar que:

- Puntos calientes en un horno indican deterioros en el aislamiento refractario del mismo.
- Fuertes vibraciones son síntoma de inminente fallo de cojinetes.
- Grietas en un metal indican fatiga en el mismo.
- Partículas metálicas en el aceite lubricante de una caja de engranajes son señal de fallos en los dientes de los engranajes.
- Huellas sin figuras son síntoma de neumáticos desgastados. Etc.

Lo que significa que en muy pocos casos un fallo ocurre sin que previamente de señales del hecho y ello nos permita plantear la ejecución de una tarea de mantenimiento preventivo que impida la consumación total del fallo.

Un proceso de fallo comienza con la aparición de un mecanismo de fallo en la pieza o piezas que provocan dicho fallo. En ese momento aparecen síntomas que nos indican que algo está ocurriendo (punto I de la figura), aunque no suelen ser las precisas para decir que ocurre realmente y a qué elemento le ocurre; pero llega un momento en que dichas señales nos permiten predecir lo que va a ocurrir y a qué elemento, aunque no el cuándo, pero ya podemos decir que hay un Fallo Potencial (punto P de la figura siguiente). Desde ese momento todos los controles que hagamos de los síntomas deben servirnos para definir el cuándo debemos hacer la tarea de mantenimiento preventivo necesaria, momento en el que se alcanza el valor crítico del síntoma (Zona señalada como crítica en la figura), pero que aún no se ha llegado al valor límite del síntoma que es cuando ocurre el fallo.

En el caso de que no hayamos empleado ningún tipo de tarea de mantenimiento preventivo, cuando ocurre el fallo (punto F de la figura) se ha de ejecutar una tarea de mantenimiento correctivo.



Toda avería siempre es provocada por el deterioro de una sola pieza lo que puede producir efectos destructivos en las piezas colindantes con las cuales está relacionada y que como resultado de este hecho es obligatorio la reposición de las mismas.

La evolución en el diseño y fabricación de equipos en los últimos años, tiene una fuerte tendencia a su modularización, por funciones específicas o por especializaciones de fabricación. Este aspecto ha provocado que el mantenimiento y sus correspondientes tareas hayan pasado de ser realizadas en función de la pieza causante de la avería a un mantenimiento y tareas en función del módulo sobre el que se realiza la reparación sea cual sea la pieza del módulo causante de la avería.

Es importante destacar que en todo módulo, casi siempre, una sola pieza (o muy pocas) es la causante de todas las averías del mismo a la que denominamos pieza principal, el resto de las piezas pueden ser secundarias, si las mismas pueden provocar también averías muy de vez en cuando, o dependientes si cuando falla la principal se ven afectadas de tal forma que hay que reponerlas siempre que se repona la principal.

Esto hace que a las piezas de un módulo se las clasifique, en los documentos que apoyan tarea de mantenimiento a realizar en el módulo, en función de la probabilidad de su reposición en cada acción de mantenimiento (correctivo o preventivo):

Principal:	100 %
Dependientes:	100 %
Secundarias:	60%
	40 %
	20 %
	Etc.

Estos datos, al aparecer en las bases de datos de logística (LSAR), nos va a permitir estimar los consumos de repuestos con una mayor precisión.

En cada acción de mantenimiento las piezas a reponer (principal y dependientes) se sustituyen y el resto en función de la inspección de las mismas se reponen según la condición (Mantenimiento basado en la oportunidad).

Las piezas o componentes dependientes más conocidos a reponer siempre son normalmente las juntas, frisas, empaquetaduras, juntas tóricas y líquidos.

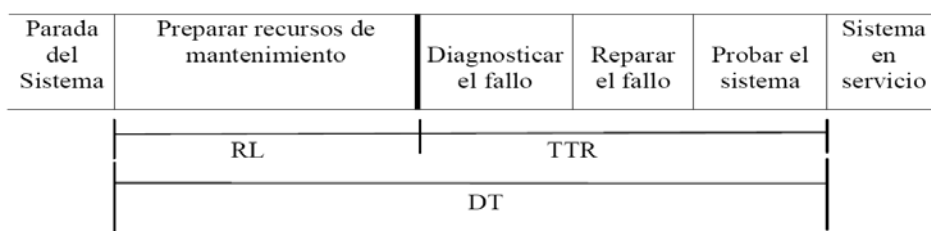
3.3 Los retrasos logísticos

Se denomina periodo de indisponibilidad (Down Time DT) de un sistema al tiempo que transcurre desde el momento en que se para el sistema, porque ha ocurrido un fallo y el sistema se ha parado o porque se ha decidido pararlo para ejecutar cualquier tipo de acción de mantenimiento, hasta que se le vuelve a poner de nuevo en marcha una vez que se ha hecho la correspondiente acción de mantenimiento.

En las tareas de mantenimiento correctivo no todo este tiempo transcurrido se ha utilizado en la propia tarea de mantenimiento o reparación (Time To Repair, TTR), ya que normalmente la secuencia de los hechos que ocurren suele ser, normalmente, la siguiente:

- Parada del sistema
- Diagnosticar el fallo
- Preparar recursos (personal, repuestos, documentación, etc.)
- Reparar el fallo
- Probar el sistema
- Sistema en servicio

Los tiempos requeridos para encontrar el técnico de mantenimiento adecuado y los repuestos y herramientas necesarias, así como otros tiempos perdidos en aspectos de tipo administrativo, desde el momento en que se produce la parada del sistema son tiempos no utilizados en la realización de la tarea de mantenimiento y que retrasan la puesta en servicio del sistema. Todos estos tiempos se denominan Retrasos Logísticos (RL) y, como ya hemos visto anteriormente, corresponde a la Soportabilidad, a través del LSA, su optimización.



3.4 Descripción de las tareas de mantenimiento

3.4.1 Tareas correctivas

Estas tareas son las que se realizan con intención de recuperar la operatividad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o dar las prestaciones requeridas. Una tarea correctiva típica consta de las siguientes actividades elementales genéricas:

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



El momento de realización de una tarea correctiva no se puede prever. Sin embargo podemos decir de ella que va a tener un periodo medio (P) de ejecución que es igual a la vida media de la pieza que provoca el fallo, es decir la esperanza matemática de su función de densidad de fallos:

$$P = \theta = E(\infty) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt$$

Si la función de densidad de fallos es exponencial:

$$P = \theta = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Donde R(t) es la función de fiabilidad de la pieza considerada y θ su vida media.

Si se trata de un módulo, en el que varias piezas pueden producir fallo, las tareas de mantenimiento correctivo a realizar en el módulo tendrán un periodo medio de ejecución que podemos calcular de la siguiente forma:

$$P = \frac{1}{\sum (1/\theta_i)}$$

Donde θ_i es la vida media de cada una de las piezas que provocan fallo.

Los planes de mantenimiento que incluyen este tipo de tareas se dice de ellos que incluyen la política de **Mantenimiento Basado en el Fallo** (Mantenimiento Correctivo).

3.4.2 Tareas preventivas programadas

Estas son tareas que se realizan para reducir la probabilidad de fallo del elemento o sistema a un nivel aceptable, o para maximizar el beneficio operativo. Una tarea programada típica, pero no todas, consta de las siguientes actividades:

- Desmontaje
- Recuperación o sustitución
- Montaje

- Pruebas
- Verificación

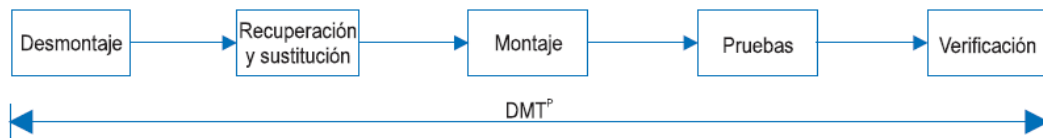
Estas tareas de mantenimiento se realizan antes de que tenga lugar el paso del sistema al estado inoperativo y sus objetivos principales son, por este orden:

- 1º Mejorar la seguridad
- 2º Mejorar la fiabilidad
- 3º Reducir los costes de mantenimiento

Pero su selección, frente a otro tipo de tarea de mantenimiento preventivo, debe ser realizada cuando no existe un indicador o estimador adecuado de la condición. Una tarea programada nunca llega a evitar todos los fallos y por lo tanto siempre será necesaria la realización, en algún momento de la vida del elemento, de la tarea correctiva aplicada a dicho fallo.

Hay un cierto grupo de tareas de mantenimiento preventivo que, sin obedecer al formato general, son importantes y están incluidas en todos los planes de mantenimiento. Estas son:

- Lubricaciones
- Limpiezas
- Calibraciones
- Ajustes



Las tareas programadas se realizan de forma periódica. El periodo (P) entre ejecuciones de la tarea se ha de calcular de la siguiente forma:

a) Para todo tipo de funciones de fallos:

$$R_r = 1 - \int_0^P f(t) dt$$

Donde R_r es el requisito del valor de la fiabilidad que se desea mantener en el módulo, equipo o sistema en el momento de hacer la tarea; P es el momento de realización de la tarea o periodicidad de la tarea programada y $f(t)$ la función de densidad de fallos.

Cuando, para un determinado fallo, se implanta un tarea periódica de mantenimiento preventivo, que pretende eliminarlo, el porcentaje de fallos eliminados es el mismo que representa la fiabilidad alcanzada R_r y el porcentaje de fallos no eliminados será el representado por $(1 - R_r)$, lo que significa que seguirá existiendo dicho fallo pero con una periodicidad muy superior. Cuando implantamos tareas de mantenimiento preventivo programado debemos conocer lo siguiente:

1. Tiempo medio entre tareas de mantenimiento correctivo actual

$$P_c = MTBM_c = \theta = 1/\lambda_c$$

2. Tiempo medio entre tareas del mantenimiento preventivo programado implantado:

$$P = MTBM_P = 1/\lambda_P$$

Donde P es el valor de la periodicidad (P) requerida para que se cumpla la fiabilidad requisito:

$$Rr = 1 - \int_0^P f(t) dt$$

3. Tiempo medio entre tareas de **mantenimiento correctivo residual**:

$$P_{CR} = MTBM_{CR} = 1/(\lambda_C[1 - Rr]) = 1/\lambda_{CR} ; \lambda_{CR} = \lambda_C (1 - Rr)$$

Debido a que el porcentaje de fallos que quedan sin eliminar que son (1-Rr), la nueva tarea de mantenimiento correctivo residual tendrá una tasa de fallos λ_{CR} y una periodicidad $MTBM_{CR}$.

4. Tiempo medio entre tareas de mantenimiento de todo tipo.

$$MTBM = 1/(\lambda_P + \lambda_{CR})$$

Según estas fórmulas y dependiendo de la fiabilidad a alcanzar en el módulo, equipo o sistema, el periodo (P) entre ejecuciones (periodo perfecto) suele ser pequeño en comparación con el valor de θ . Esta periodicidad puede suponer unos costes de mantenimiento muy elevados por los periodos tan cortos que puede requerir la ejecución de dicha tarea, por lo que es conveniente optimizarla. Esto ocurre porque la posible tarea correctiva que debería ser realizada si se deja aparecer el fallo, con un periodo medio $P = \theta$, es sustituida por varias tareas programadas.

La optimización puede ser hecha:

1. Calculando el valor de P que minimiza el coste medio unitario de mantenimiento en el periodo P:

$$CMUM (P) = [(1-R(P)) \times CMTMC + CMTMP] / P \text{ |min}$$

Donde R(P) es la fiabilidad del módulo, equipo o sistema en el momento P. CMTMC y CMTMP los costes medios de las tareas correctivas y programadas que se aplican al fallo y CMUM (P) el coste medio unitario de mantenimiento en el periodo P.

2. Calculando el valor P que maximiza la disponibilidad operativa $A_o(P)$ en un intervalo de tiempo P :

$$A_o (P) = [P / (P + MTTR + (MTTR + RL)(1 - R(P)))] \text{max}$$

Fórmula introducida por el profesor J. Knezevic con varias reducciones.

$$A = [(1/\lambda_{CR}) / ((1/\lambda_{CR}) + nMTTR + (MTTR + RL))] \text{max}$$

$$A = [1 / (1 + n\lambda_{CR} MTTR + \lambda_{CR} (MTTR + RL))] \text{max}$$

$$A = [P / (P + nP\lambda_{CR} MTTR + P\lambda_{CR} (MTTR + RL))] \text{max}$$

$$nP\lambda_{CR} \cong 1 P\lambda_{CR} \cong [1 - R(P)]$$

$$A = [P / (P + MTTR + \{1 - R(P)\}(MTTR + RL))] \text{max}$$

3. Calculando el valor P mediante fórmulas reducidas aproximadas que se aplican con cierta normalidad en la industria.

Debido a que, para cualquier tipo de fallo, lo normal es desconocer su función de densidad o que esta no obedezca a una función de probabilidad estandarizada, la industria a recurrido a formulas reducidas, suficientemente contrastadas, que permiten calcular la periodicidad de forma fácil:

$P = \theta - k \sigma$ Si se conoce la desviación típica de la vida media de la pieza (o piezas) que provoca el fallo

$P = \theta - k \sqrt{\theta}$ Si no se conoce dicha desviación típica.

Donde $k = 3$ para fallos que afectan al coste o a la operatividad. (Con este valor se asume que la fiabilidad alcanzada es \cong a 0,975).

Donde $k = 4$ para fallos que afectan a la seguridad. (Con este valor se asume que la fiabilidad alcanzada es \cong a 0,990).

¡¡Esta fórmula ha de ser aplicada para valores de θ en horas!!

b) Para el caso de la función de fallos exponencial:

$$P_P = \text{MTBM}_P = \int_0^P R(t) dt = \left[-\theta e^{-t/\theta} \right]_0^P = \theta (1 - e^{-P/\theta}) = \theta [1 - R(p)]$$

$$P_P = \text{MTBM}_P = \theta [1 - R_r] = 1/\lambda_P$$

Esta fórmula aparece en el libro “Fiabilidad” de J. Warleta.

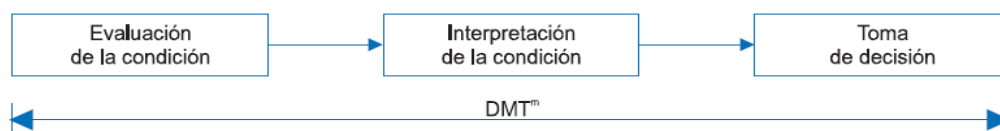
Donde R_r es el requisito del valor de la fiabilidad que se desea mantener en el módulo, equipo o sistema en el momento P (periodo) de hacer la tarea.

Los planes de mantenimiento que incluyen este tipo de tareas se dice de ellos que incluyen la política de **Mantenimiento Basado en la Vida Operativa** (Mantenimiento Preventivo Programado).

3.4.3 Tareas preventivas predictivas- condicional

La tarea predictiva es una actividad de vigilancia de la condición que se realizan para determinar el estado físico de un elemento o sistema. Por tanto, el objetivo de la vigilancia de la condición, sea cual sea su forma, es la observación de los parámetros (valoración de los síntomas) que suministran información sobre los cambios en el nivel de las prestaciones o sobre la aparición de un mecanismo de fallo en alguna pieza o componente. El propósito de la vigilancia es por lo tanto la evaluación de la condición en ese momento, mediante el uso de técnicas específicas, para determinar la necesidad de realizar una tarea de mantenimiento preventivo. Estas técnicas pueden variar desde el empleo de los simples sentidos humanos hasta un instrumental complejo.

- Una tarea predictiva consta de las siguientes actividades:
- Toma de datos de la condición
- Evaluación de la condición
- Interpretación de la condición
- Toma de decisiones (para predecir el momento de realizar la tarea de mantenimiento preventivo)



Los planes de mantenimiento que incluyen este tipo de tareas se dice de ellos que incluyen la política de **Mantenimiento Basado en la Condición** (Mantenimiento Preventivo Predictivo).

Por lo tanto, la tarea de mantenimiento condicional es un reconocimiento de que la principal razón para llevar a cabo el mantenimiento es el cambio en la condición y/o en las prestaciones, y de que la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo deben basarse en la condición real del elemento o sistema. Así, gracias a la evaluación de la condición del sistema o elemento mediante la vigilancia de la condición del parámetro o parámetros seleccionados, es posible identificar el instante de tiempo más conveniente en que deben realizarse las tareas de mantenimiento preventivo. En consecuencia, las

tareas de mantenimiento preventivo no se realizan mientras sea aceptable la condición del elemento o sistema.

Mediante la vigilancia de la condición del parámetro o parámetros seleccionados, es posible identificar el instante más conveniente en que debe realizarse la tarea de mantenimiento preventivo, tarea que es idéntica a la tarea programada a aplicar al fallo, si se hubiera decidido optar por una política de Mantenimiento Basado en la Vida Operativa. La tarea de mantenimiento preventivo no se realizará mientras sea aceptable la condición del elemento o sistema. La toma de decisión de la tarea predictiva puede ser:

- a) seguir haciendo periódicamente la tarea predictiva, o
- b) realizar la correspondiente tarea de mantenimiento preventivo programado.

En la práctica de la ingeniería hay dos tipos diferentes de parámetros observables que permiten evaluar la condición del elemento o sistema:

- **Indicador** relevante de la condición

Parámetro observable que indica la condición del elemento o sistema en el instante de la comprobación. Entre posibles parámetros indicadores tenemos:

- a) Niveles de presión, de líquidos, etc.,
- b) Velocidad,
- c) Tensiones,
- d) Recorridos,
- e) Geometría

El parámetro observable de un indicador relevante de la condición **no es** un parámetro de variación constante o no se le puede establecer una función de su variación en relación con la variación de la fiabilidad del elemento.

- **Estimador** relevante de la condición

Parámetro observable que permite estimar la condición del elemento o sistema en cada instante del tiempo operativo. Entre posibles parámetros estimadores tenemos:

- a) Espesores,
- b) Grietas,
- c) Vibraciones,
- d) Ruidos.

El parámetro observable de un estimador relevante de la condición **es** un parámetro de variación constante y que se le puede establecer una función de su variación en relación con la variación de la fiabilidad del elemento.

La condición del elemento o sistema será satisfactoria mientras el valor del parámetro se mantenga sin alcanzar el **valor crítico**. Cuando se alcance este valor crítico es necesario realizar la tarea de mantenimiento preventivo, ya que si el parámetro alcanza su **valor límite** se producirá el fallo.

El que los parámetros sean relevantes implica que, como mínimo, el estimador o el indicador tienen un periodo relativamente largo de variación entre los valores crítico y límite, como para poder planificar la parada del sistema sin que su disponibilidad se vea afectada inadecuadamente.

Las tareas predictivas pueden ser de dos tipos:

a) Inspección

La inspección es una tarea específica predictiva, cuyo resultado es un informe sobre la condición del elemento. Esto es, si la condición es satisfactoria o insatisfactoria, lo que se determina por el valor adecuado del indicador de la condición. Esta es una tarea que se realiza periódicamente a intervalos fijos espaciados y

cuya frecuencia se determina como un múltiplo de la frecuencia del fallo del elemento. En el momento en que el indicador de la condición alcanza su *nivel crítico* se debe tomar la decisión de realizar la correspondiente tarea de mantenimiento preventivo.

El periodo (P) entre inspecciones se determina de acuerdo con la función de fiabilidad, basada en la distribución de probabilidad de la duración de la vida operativa hasta el fallo, del elemento que lo provoca, y que debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$R(P^{i+1}) = R_r \times R(P^i)$$

Donde R_r es el nivel de fiabilidad requerido para el elemento.

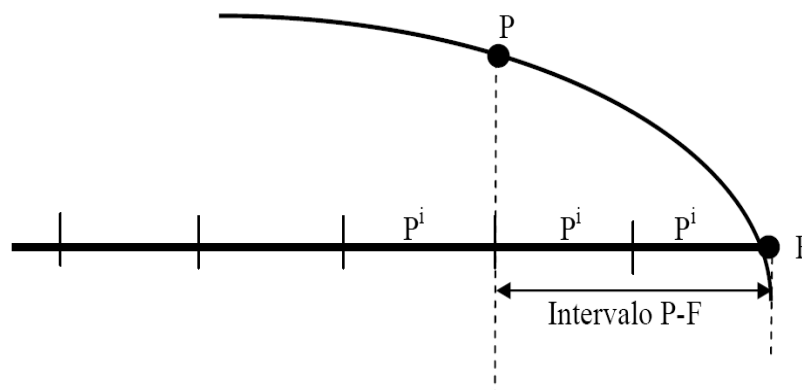
Esto se debe a que la probabilidad de que el valor del indicador (VI) en la inspección P^{i+1} sea menor que el valor límite del indicador (VLI) con la condición de que el valor del indicador en la inspección P^i sea menor o igual al valor crítico del indicador (VCI).

$$P[VI(P^{i+1}) < VLI \mid VI(P^i) \leq VCI];$$

Esta condición, para el elemento que provoca el fallo, supone, en términos de fiabilidad, lo siguiente:

$$R(P^{i+1}) / R(P^i) = R_r$$

John Moubray, en el libro “Reliability-centred Maintenance”, propone como solución práctica y rápida una periodicidad de la inspección igual a la mitad del periodo P-F.



b) Examen

El examen es una tarea predictiva que tiene como resultado una estimación numérica de la condición del elemento en ese momento, a través del valor del estimador de la condición. Contrariamente a las inspecciones, en este caso los resultados del examen afectan directamente a la programación del siguiente examen por la velocidad del acercamiento del estimador a su *nivel crítico*. Por lo tanto esta es una tarea que se realiza a intervalos (o periodos) variables, comenzando por el primero con un intervalo optimo. El proceso del examen debe incluir el cálculo del intervalo del próximo examen a realizar. En el momento en que el estimador de la condición alcanza su nivel crítico se debe tomar la decisión de realizar la correspondiente tarea de mantenimiento preventivo.

El cálculo de los periodos entre exámenes está basado en que un elemento está en estado de funcionamiento en tanto que el valor normal (VNE) de su estimador de condición se encuentra dentro del intervalo definido por su valor inicial (VIE) y su valor crítico (VCE). Cuando este estimador rebasa el valor prescrito, valor crítico del estimador (VCE), se presenta la transición al estado de fallo. El cálculo del primer intervalo para realizar el examen de la condición y posteriormente los sucesivos intervalos se obtienen de la siguiente forma:

1. Primer intervalo (P)

Se calcula en función del valor crítico del estimador (VCE), y debe ocurrir que la fiabilidad de la pieza (o piezas) que provoca el fallo, en ese momento, ha de ser superior a la fiabilidad requerida:

$$R(P^1) = \Pr (VNE(P^1) < VCE) > R_r$$

2. Segundo intervalo

El tiempo del segundo examen depende de la diferencia entre el VCE y el VNE(P¹). Cuanto mayor sea la diferencia, mayor será el tiempo de operación hasta el siguiente examen, P². Para este intervalo se debe cumplir:

$$\int_{P^1}^{t_2} f(t, VNE(P^1)) dt = \int_{VNE(P^1)}^{VCE} f_{VNE(P^2)}(c) dc$$

Donde $f(t, VNE(P^1))$ es una función de densidad de la intersección horizontal de la función aleatoria VNE(t) con el nivel VNE(P¹); $f_{VNE(P^2)}(c)$ es la función de densidad de la intersección vertical de VNE(t) en el instante del siguiente examen.

En el tiempo para el siguiente examen, Pⁿ, si es necesario calcularlo, debe seguirse el mismo procedimiento.

El cálculo, como se puede comprobar, resulta complicado y farragoso, por lo que lo normal es que la propia tecnología comercializada para dicho examen, incluya el programa de su cálculo.

Como hemos visto, tanto en las inspecciones como en los exámenes, la dificultad de encontrar los periodos adecuados para su óptima realización ha llevado a que en la práctica estas actividades se hagan de forma continua mediante equipos automáticos de indicación de la condición que provocan la correspondiente alarma cuando la condición está alcanzando su valor crítico y por lo tanto es necesario realizar la tarea de mantenimiento preventivo correspondiente.

4. ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

4.1 generalidades

Toda estrategia de mantenimiento comienza por decidir cómo se va a realizar el mantenimiento del sistema que vamos a operar, estrategia que debe ser pensada, diseñada o prevista por el futuro usuario del sistema. Esta decisión se ha de tomar desde el momento en que se decide la adquisición de un nuevo sistema, por lo que lo primero a definir es el Concepto de Mantenimiento que, por un lado, va a servir para que los diseñadores y constructores del sistema suministren el Apoyo Logístico más adecuado para el mismo y, por el otro, permitirá, al futuro usuario del sistema, tomar las decisiones oportunas para llevar a efecto el Plan de Mantenimiento en base al Apoyo Logístico suministrado.

La estrategia de mantenimiento debe estar basada, fundamentalmente, en los siguientes aspectos:

1. Que política de mantenimiento se va a aplicar a los distintos componentes del sistema. Esta política ha de basarse en el grado de esencialidad de cada componente con respecto a:
 - La seguridad
 - La misión
 - El coste

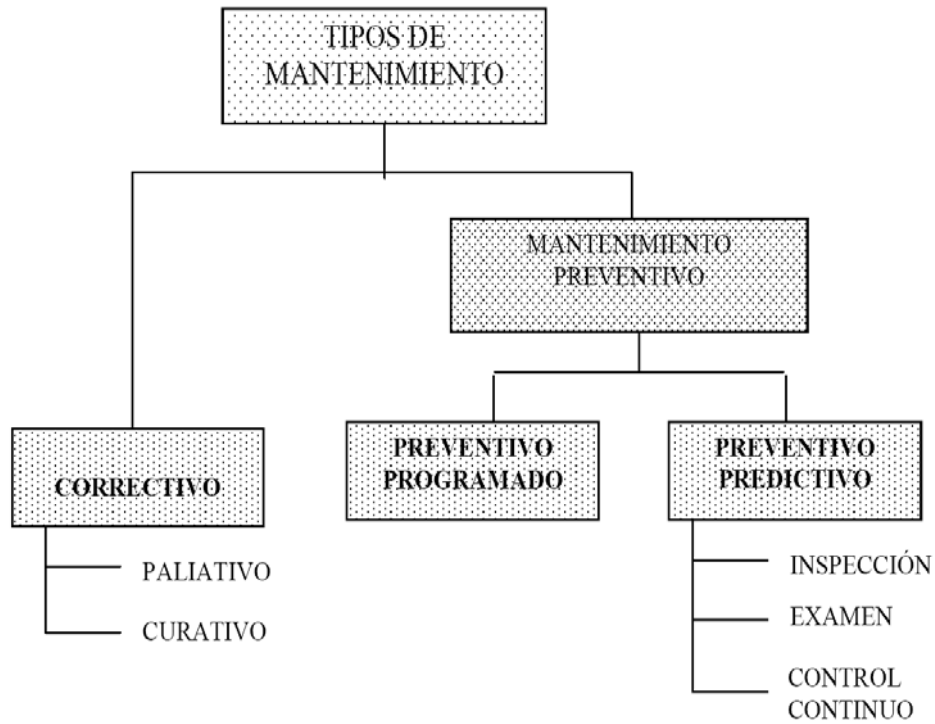
(Ver la figura siguiente "Tipos de Mantenimiento")

2. A qué nivel de mantenimiento se deben asignar las tareas de mantenimiento. Esta asignación debe ser hecha en base a la capacidad (de personal y medios) prevista de cada uno de los niveles.

3. La participación del usuario, prevista por el mismo, en la ejecución del Plan de Mantenimiento. La participación en la ejecución de tareas de mantenimiento, se entiende, ya que la gestión del plan debe ser siempre su responsabilidad.

Como ya se ha indicado en su momento, todos los criterios y requisitos contenidos en el Concepto de Mantenimiento son la base para el desarrollo de los distintos procesos que incluye el Análisis de Apoyo Logístico (AAL/LSA).

Figura: tipos de mantenimiento



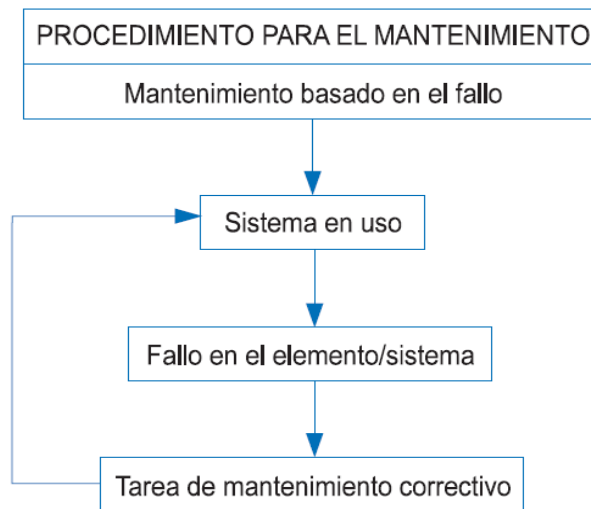
Fallos que no afectan a la seguridad, a la misión o al coste

Fallos que afectan a la seguridad, a la misión o al coste.
Cuando no existe un indicador o estimador de la condición adecuado.

Utilización de equipos de comprobación costosos y/o sistemas expertos.

4.2 Mantenimiento basado en el fallo (mantenimiento correctivo)

La política de mantenimiento basado en el fallo constituye un método por el que se realizan las tareas de mantenimiento correctivo tras ocurrir un fallo, a fin de recuperar la operatividad del sistema. Este método de mantenimiento se puede describir como de reparación de averías, posterior al fallo, o no programado.



Una política de mantenimiento basada en el fallo

El principal atractivo de esta política de mantenimiento radica en la total utilización de la vida operativa del componente que provoca el fallo. Ello significa en la práctica que el tiempo medio entre realizaciones de las tareas de mantenimiento correctivo (Mean Time Between Corrective Maintenance, MTBMc), de un sistema es idéntico a su tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failure, MTBF). Es decir:

$$\text{MTBMc} = \text{MTBF}$$

Esta política de mantenimiento tiene los siguientes inconvenientes:

- Al presentarse el fallo de forma aleatoria, este puede ocurrir durante el periodo de una misión, por lo que la disponibilidad operativa del mismo se puede ver muy reducida.
- El fallo de un componente (pieza) del elemento o sistema puede, a su vez, acarrear daños a otros componentes del mismo; son los aspectos conocidos como efectos de los fallos. Los análisis de costes de mantenimiento han demostrado que una reparación realizada tras un fallo, es normalmente de 3 a 4 veces más cara que si se hubiera realizado una tarea de mantenimiento preventivo.
- Como el tiempo de aparición del fallo es incierto no puede planearse la tarea de mantenimiento, por lo que deben esperarse mayores retrasos logísticos, debido a la indisponibilidad de recursos.

Por estos graves inconvenientes esta política se debe aplicar a elementos cuya pérdida de operatividad no repercute en la seguridad del usuario, del propio sistema o del entorno y no hay graves consecuencias económicas por el fallo.

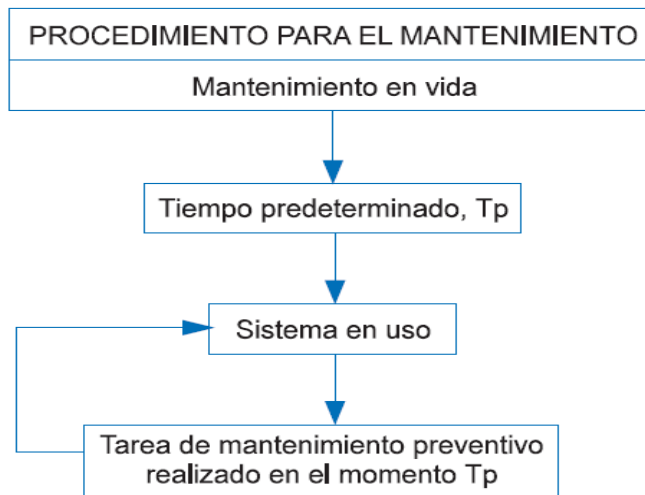
Por tanto, esta política puede llegar a ser más costosa, debido al coste directo para recuperar la funcionalidad del sistema, y al coste indirecto incurrido como resultado de la pérdida de producción, prestigio e incluso vidas.

El mantenimiento correctivo se dice que es "Paliativo", cuando se trata de un arreglo de carácter provisional y se dice "Curativo", cuando se realiza la reparación completa.

4.3 Mantenimiento basado en la vida operativa (mantenimiento preventivo programado)

La política de mantenimiento basada en la vida operativa constituye un método de planificación del mantenimiento para aquellos sistemas en los que la seguridad, la disponibilidad o el coste del mantenimiento deben ser tenidos muy en cuenta por los efectos que provoca en los beneficios que se pretenden obtener de los mismos.

Según esta política, las tareas de mantenimiento preventivo se realizan a intervalos fijos de tiempo (o de cualquier otro parámetro equivalente, como ciclos, aterrizajes, arranques, disparos, etc), en función de la duración prevista de vida operativa del sistema y de las distribuciones de vida de sus componentes, con objeto de reducir el riesgo de fallos a un nivel aceptable. El hecho de que el momento de ejecución de las tareas sea conocido desde el comienzo de la vida operativa del sistema implica que a las tareas realizadas según esta política se las denomine programadas.



Política de mantenimiento basada en la vida operativa del sistema

La principal ventaja de realizar el mantenimiento preventivo de forma planificada es que se conocen de antemano los recursos humanos y materiales que serán necesarios en un cada instante. El poder anticipar de esa manera la ejecución de las tareas contribuirá a asegurar que el personal adecuado esté disponible, así como que se cuente con las herramientas, equipos de apoyo, repuestos y consumibles necesarios.

En cuanto a inconvenientes, cabe destacar que en ocasiones este tipo de mantenimiento conlleva la sustitución de elementos cuyas características operativas son aún adecuadas, debido a que el tiempo medio entre mantenimientos programados $MTBM_P$ suele ser muy inferior al $MTBF$

$$MTBM_P \ll MTBF$$

Por ello, en ocasiones, este mantenimiento supone un extra coste y al requerir mayor número de tareas de mantenimiento existe un mayor riesgo de introducir averías por errores humanos durante la ejecución de la misma.

Esta política de mantenimiento puede aplicarse con efectividad a equipos o sistemas que cumplen con alguno de los siguientes requisitos:

- Al realizar la tarea se reduce la probabilidad de aparición de fallos en el futuro.
- El coste total de aplicar esta política es sustancialmente menor que el de la política de mantenimiento correctivo.
- La observación de la condición del elemento no es técnicamente factible o es económicamente inaceptable.

Entre las tareas programadas, mas características de un plan de mantenimiento, se encuentran aquellas que de una u otra manera tratan al elemento a mantener de forma global sin que se estén específicamente concebidas para mantener alguno de los componentes de dicho elemento. Las más conocidas son:

- Lubricaciones y Limpiezas
- Calibraciones y Ajustes
- Revisiones periódicas

4.4 Mantenimiento basado en la condición (mantenimiento preventivo predictivo)

Dado que, la realización de tareas programadas tienen como efecto reducir, de forma considerable, el coeficiente de utilización de los componentes o piezas que participan en la aparición del fallo, y que el mantenimiento preventivo programado no siempre es rentable; es posible, en ocasiones, condicionar la ejecución de la tarea de mantenimiento al estado real del elemento o elementos a los que se aplica. Por ello, en esta política de mantenimiento, la condición de los elementos se convierte en el aspecto determinante del cuándo debe realizarse el mantenimiento preventivo. No siempre es técnicamente posible o económicamente rentable monitorizar el estado de los elementos de un sistema, por lo que será necesario determinar para cada sistema considerado qué elementos son susceptibles de ser analizados para, en base a su estado, realizar las oportunas tareas de mantenimiento preventivo.

Esta política de mantenimiento sería la perfecta si siempre fuera posible analizar la condición, al no ser así, ocurre que los mayores inconvenientes para la aplicación de la misma son:

- a) Encontrar el indicador o estimador relevante de la condición.
- b) La necesidad de utilizar, en muchos casos, equipos especiales y costosos (Automatic Test Equipment, ATE o Built-in Test Equipment, BITE) para el análisis de la condición.
- c) Alta cualificación de los mantenedores por la complejidad de muchas de las técnicas avanzadas de vigilancia de la condición o de localización de averías.

Monitorizar el estado de los elementos tiene un coste que debe ser considerado para determinar si es más rentable hacerlo o desperdiciar la vida residual que puedan tener elementos sustituidos prematuramente. Además, no siempre es fácil identificar el parámetro o parámetros de un elemento que determinen su estado real. En algunos casos la comprobación del estado podrá hacerse de forma cuantitativa, mientras que en otros deberá ser más cualitativa.

Veamos un ejemplo. El cambio del aceite del motor de un automóvil es una tarea de mantenimiento preventivo que fácilmente puede establecerse de forma programada, es decir el fabricante recomienda que el aceite sea cambiado cada 5.000 kilómetros. Sin embargo, el tipo de conducción, factores ambientales o el uso inadecuado de aditivos, puede influir en la rapidez de la pérdida de las propiedades lubricantes del aceite, por lo que es recomendable inspeccionar con cierta frecuencia el nivel y aspecto del aceite (a los expertos en mecánica les basta echar un vistazo al color del aceite para conocer su estado) para proceder a rellenar hasta nivel o a sustituirlo, según lo que sea necesario. La determinación del estado del aceite se realiza en general, por su naturaleza, de forma cualitativa. Lo contrario ocurre con la sustitución de las zapatas de freno de las ruedas de un automóvil, que sí puede realizarse en base a determinar de forma cuantitativa su estado mediante el empleo de un testigo que indique el desgaste sufrido; una vez el desgaste llega a un cierto nivel predeterminado se procede a sustituir las zapatas, con independencia del número de kilómetros que se lleven recorridos.

Dependiendo del tipo de tarea de análisis de la condición podemos distinguir dos tipos de políticas de mantenimiento predictivo:

- a) Basada en la inspección
- b) Basada en el examen de la condición.

4.4.1 Política de mantenimiento basada en la inspección.

Esta política utiliza las inspecciones, de forma periódica, para determinar el estado de la pieza o componente del equipo que sufre la degradación y tiene como resultado un informe sobre la condición del elemento y la recomendación de seguir con las inspecciones o si es preciso ejecutar la tarea de mantenimiento preventivo. Esta política de mantenimiento mejora la seguridad y la fiabilidad de los sistemas y se produce un buen aprovechamiento de la vida de las piezas. No obstante, en los casos en los que es necesario hacer desmontajes para tomar valores del indicador, la disponibilidad se puede ver afectada.

Antes de que el equipo se ponga en servicio se determina la frecuencia más adecuada para las inspecciones. Así, durante la operación, las inspecciones se llevan a efecto con periodos fijos especificados (P) hasta que se alcanza el valor crítico del indicador de la condición, en cuyo momento se realiza la tarea de mantenimiento prescrita.

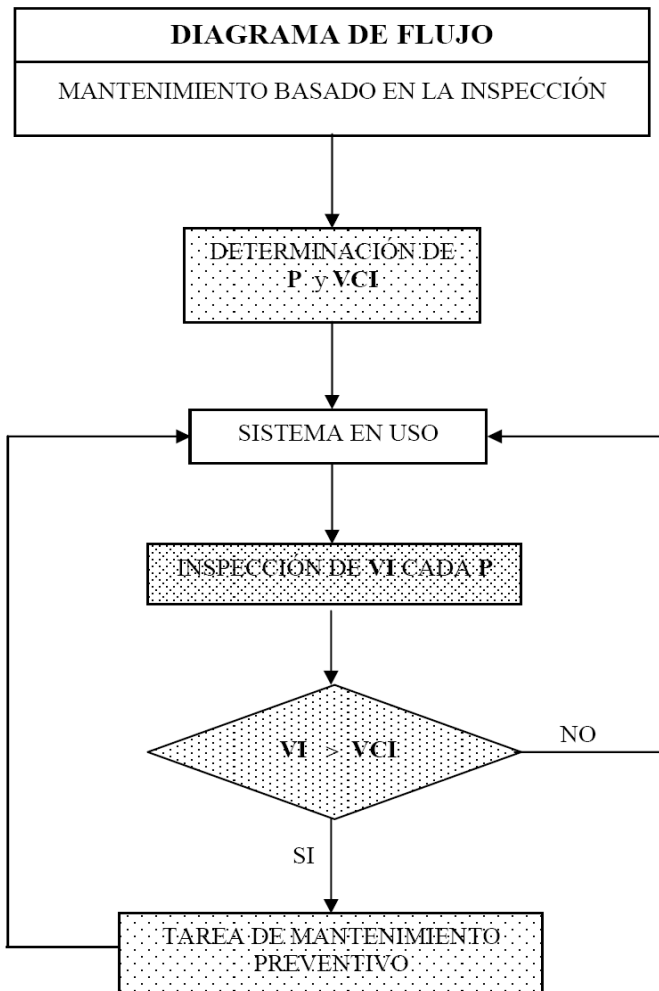
La decisión de realizar la tarea de mantenimiento preventivo se debe tomar cuando el valor del indicador (VI) es igual o superior al valor crítico del indicador (VCI), valor del indicador que debe corresponder con el momento en que aparece un fallo potencial.

La ventaja de este procedimiento es que proporciona una mejor utilización del elemento considerado que en el caso de la aplicación de mantenimiento preventivo, satisfaciendo el nivel requerido de seguridad o de utilidad.

La inspección es una tarea de mantenimiento condicional, que tiene como resultado un informe sobre la condición del elemento, es decir, si la condición es satisfactoria o no. El rasgo común de todas estas tareas es que los resultados obtenidos no tienen ningún efecto sobre la programación de la siguiente inspección. Antes de que el elemento o sistema se ponga en servicio se determina la frecuencia más adecuada para las inspecciones. Así, durante la operación del elemento o sistema, las inspecciones se llevan a cabo con intervalos fijos especificados hasta que se alcanza el nivel crítico. En cuyo momento se realizan las tareas de mantenimiento preventivo prescritas. Si el elemento falla entre inspecciones, se realiza un mantenimiento correctivo.

Los beneficios:

- Detección, lo más pronto posible, del deterioro en la condición y/o en las prestaciones de un elemento o sistema.
- Reducción del tiempo de inmovilización de los sistemas, ya que los ingenieros de mantenimiento pueden determinar el intervalo de mantenimiento óptimo, a través de la condición de los elementos componentes. Esto permite una mejor planificación del mantenimiento y un uso más eficaz de los recursos.
- Mejora de la seguridad, ya que las técnicas de vigilancia permiten al usuario detener el sistema antes de que se produzca un fallo.
- Aumento de la disponibilidad, al poder mantener los sistemas funcionando durante más tiempo.



Procedimiento de mantenimiento para una política basada en la inspección.

4.4.2 Política de mantenimiento basada en el examen de la condición (RPC).

Knezevic desarrolló una metodología para la determinación de la fiabilidad, basada en un estimador adecuado de la condición, RPC. Este nuevo método suministró información adicional sobre el cambio de la condición de los elementos considerados, durante su vida operativa. En consecuencia, se desarrolló un nuevo método de control de los procedimientos de mantenimiento. Mediante el suministro de una información más completa del proceso de cambio en la condición, se llegó a un nivel más alto de utilización de los elementos, conservando una baja probabilidad de fallo durante la operación.

Es un proceso dinámico, porque el tiempo para la realización del siguiente examen se determina completamente a partir de la condición real del sistema al efectuar cada examen. El control dinámico de las tareas de mantenimiento según este nuevo modelo permite que cada sistema individual realice la función requerida con la probabilidad de fallo exigida, como en el caso de mantenimiento preventivo basado en la vida del sistema, pero con una utilización más completa de la vida operativa, reduciendo así el coste total de operación y producción.

Se puede decir que el método RCP presentado anteriormente suministra una imagen más completa de la fiabilidad del elemento durante la vida operativa, porque se basa en un proceso continuo de cambio, mientras que el método del tiempo hasta el fallo se basa sólo en los momentos de transición al estado de fallo. La información sobre los cambios en la condición del elemento es muy valiosa para

los ingenieros, particularmente para los de mantenimiento, que la utilizan como base para la selección de una política o estrategia de mantenimiento.

El método convencional para determinar la fiabilidad a través del tiempo considera al elemento en estudio como una “caja negra” que realiza la función requerida hasta que falla. Tal método es totalmente satisfactorio desde el punto de vista de la estadística matemática, pero no tanto desde el punto de vista de la ingeniería, ya que los ingenieros, especialmente los ingenieros de explotación y de mantenimiento querrían saber lo que está pasando dentro de esa caja y específicamente el estado de aquellas piezas o componentes que son susceptibles de provocar fallos no deseados. Para lograrlo, es necesario conocer la condición del elemento provocador del fallo (pieza o componente) en cualquier instante de su vida. Para ello la ingeniería de mantenibilidad propone estimar la condición mediante los valores que alcanzan los síntomas captables desde el exterior de la “caja negra” y que son provocados por su mecanismo de fallo de las piezas.

El parámetro estimador de la condición suele estar ligado directa o indirectamente con la pieza, su mecanismo de fallo y sus prestaciones. Describe la condición del elemento durante su vida operativa, satisfaciendo los siguientes requisitos:

- a) Descripción completa de la condición del elemento.
- b) Cambio continuo y monótono durante el tiempo operativo,
- c) Definición numérica de la condición del elemento.

La decisión de realizar la correspondiente tarea de mantenimiento preventivo se debe tomar cuando el valor de su estimador de condición (VE) rebasa el límite prescrito del valor crítico del estimador (VCE), momento en el que se presenta la transición al estado de fallo.

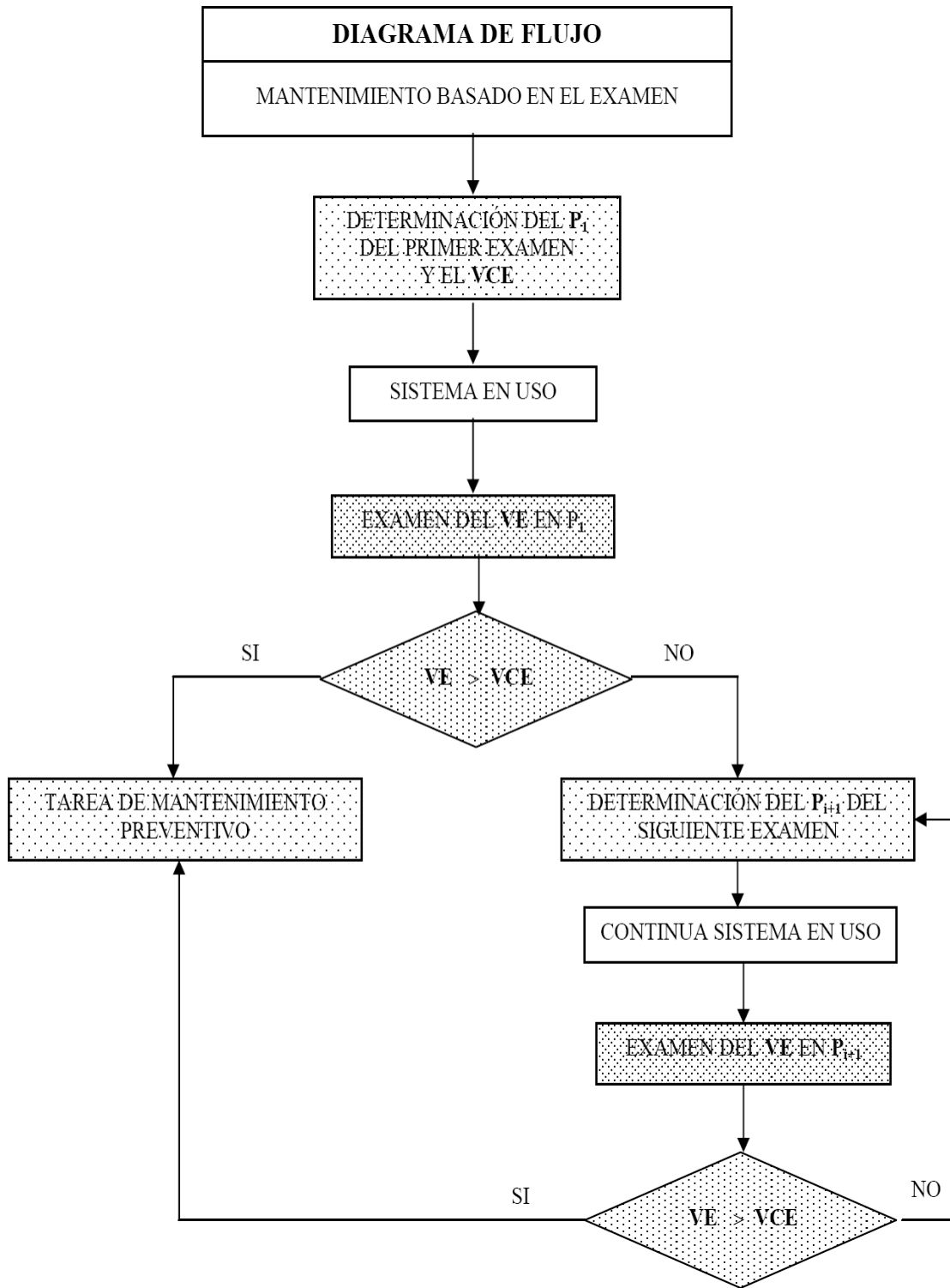
Los siguientes puntos representan las ventajas del método de mantenimiento basado en el RCP:

- Proporciona el nivel de fiabilidad exigido para cada elemento individual.
- Reduce el coste de mantenimiento como resultado de:
- Una vida operativa más larga para cada elemento individual que en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema.
- Una mayor disponibilidad del elemento gracias a la reducción del número de inspecciones, comparado con un mantenimiento basado en la inspección.

Desde el punto de vista del apoyo logístico, proporciona una planificación de las tareas de mantenimiento.

Es aplicable a todos los elementos de ingeniería.

Esta política de mantenimiento mejora la seguridad y la fiabilidad de los sistemas y se produce un buen aprovechamiento de la vida de las piezas, pero tiene un gran inconveniente y es que los equipos requeridos para la captación de los síntomas que nos permiten estimar la condición suelen ser muy costosos.



Algoritmo para el control del proceso de mantenimiento.

4.4.3 Política de mantenimiento basada en el control continuo de la condición.

Tanto la inspección como el examen requieren, en muchos de los casos, de:

- Equipos sofisticados de captación de los parámetros, indicadores o estimadores, de la condición.
- Especialistas en los cálculos requeridos para la estimación de la condición.
- Empresas especializadas en la realización de estas actividades.

La necesidad de recurrir a contratos específicos para el desarrollo de este tipo de actividades de mantenimiento y los costes periódicos que conlleva, ha llevado a que los usuarios de sistemas complejos, con elevados costes de mantenimiento, introduzcan en los propios sistemas dispositivos para vigilar, detectar y diagnosticar la condición del sistema de forma continua, aunque ello suponga una fuerte inversión inicial, si con ello reducimos costes de mantenimiento de forma rentable.

La cantidad de dispositivos requeridos para llevar a efecto un control continuo de la condición supone el que muchos modernos sistemas complejos, industriales o militares, incluyan un subsistema de control de la condición y del mantenimiento, expresamente diseñado para este fin. Como consecuencia de ello y en paralelo, estén apareciendo en el mercado nuevos sensores, instrumentos de medida, dispositivos de grabación y análisis y hasta sistemas expertos con inteligencia artificial que acaparan la atención de los ingenieros de mantenimiento.

En mantenimiento de sistemas complejos, la tendencia más actual es ir a sistemas de control continuo de la condición que sean expertos, ya que, mediante la utilización de la inteligencia artificial y la lógica digitalizada pueden:

- Procesar una gran cantidad de información rápidamente reduciendo el tiempo de diagnosis y de determinación de las posibles acciones de mantenimiento preventivo a realizar.
- Analizar la situación con objetividad sin olvidar ningún hecho relevante, reduciendo la probabilidad de realizar un diagnóstico erróneo.
- Detectar fallos incipientes mediante la vigilancia en directo de los parámetros de condición del sistema.
- Detectar fallos humanos.
- Analizar las consecuencias de un fallo producido y determinar las acciones a realizar para mitigar dichas consecuencias.

4.5 Mantenimiento basado en la oportunidad.

En un sistema existen muchos elementos heterogéneos que requieren una sustitución en grupo, por alguna de las siguientes razones:

- Necesidad de seguridad en la operación del sistema, tanto para los usuarios como para el entorno.
- Limitaciones en la tecnología o el diseño del sistema.
- En la mayoría de los casos, el fabricante recomienda una sustitución en grupo, incorporándolo en sus manuales de mantenimiento.

Con el fin de evitar interrupciones costosas, también es posible emprender sustituciones de grupo que afecten a elementos heterogéneos, de modo que, cuando uno de ellos falle, se sustituyan todos los elementos del grupo. De esta forma las tareas de mantenimiento se realizan en elementos que no han causado el fallo. Por tanto, la realización de esas tareas de mantenimiento adicionales es consecuencia de la oportunidad surgida durante el tiempo de baja obligatoria, causada por la realización

de la tarea de mantenimiento correctivo del elemento averiado. Esta política de mantenimiento se conoce como mantenimiento basado en la oportunidad (Opportunity Based, OB), y es apropiado para sistemas de costes elevados de inmovilización o indisponibilidad.

Esta política consiste, pues, en aprovechar oportunidades que se presenten para realizar tareas de mantenimiento preventivo de forma que su incidencia en los costes y/o en la operatividad del sistema sean lo menor posible.

Por ejemplo, supongamos que el fabricante de un automóvil recomiende a sus usuarios realizar una rotación de las ruedas cada 10.000 kilómetros, para asegurar un desgaste homogéneo. Normalmente dicha tarea se realizará en un taller, lo que conlleva una indisponibilidad momentánea del automóvil para el usuario, además de unos costes. Supongamos además que quedan pocos kilómetros para realizar esa tarea (por ejemplo, 1.500) y que el usuario debe llevar el automóvil al taller a cambiar las zapatas de los frenos (porque el testigo que llevan le avisa de que su reemplazo es necesario). En este caso el propietario del automóvil podría decidirse a aprovechar la estancia del vehículo en el taller para realizar además la rotación de las ruedas, lo que posiblemente redundará en algunos ahorros y en reducción de tiempos de indisponibilidad, además de seguramente en menores molestias para él.

Otro aspecto de esta política es la sustitución en grupo de elementos heterogéneos que se puede producir por alguna de las siguientes razones:

- Necesidad de seguridad en la operación del sistema, de los usuarios o del entorno.
- Limitaciones en la tecnología o el diseño del sistema.

La sustitución en grupo pretende aprovechar el cambio necesario de un componente por avería, sustituyendo otros con cercanas tasas de fallo para evitar nuevas acciones de mantenimiento tanto correctivas como preventivas. Esta política requiere de cierta planificación de inspecciones de piezas contiguas a la averiada o cercanas en su tasa de fallos. Con esta política se pretende:

- Reducción del número de paradas de mantenimiento
- Reducción del coste de mantenimiento

4.6 mantenimiento adaptativo

En sistemas electrónicos muy complejos, como es el caso de las direcciones de tiro en sistemas de combate, cuyos periodos de actividad son cortos pero en los que se requiere una seguridad y/o fiabilidad muy altas en el cumplimiento de su misión, es preciso evitar que, durante dicho periodo de misión, sea necesario ejecutar algún tipo de tarea de mantenimiento que requiera la intervención humana.

En este tipo de sistemas, la aparición de fallos críticos y el consiguiente mantenimiento han de ser evitados. Por ello, en base a elementos redundantes (tarjetas electrónicas, módulos reemplazables, etc.) previstos al efecto o caminos alternativos en las funciones esenciales, el propio software del sistema dirige la función interrumpida, mediante un proceso de reconfiguración del subsistema que realiza dicha función, por un nuevo camino.

4.7 Tecnologías avanzadas para el mantenimiento.

La toma de decisiones a la que obliga el RCM, en relación con la tarea de mantenimiento preventivo más idónea, ha provocado un gran avance en la tecnología de los procesos de mantenimiento, fundamentalmente en técnicas aplicadas a los siguientes aspectos:

- a) vigilancia de la condición,
- b) localización de averías.

4.7.1 Técnicas de vigilancia de la condición.

Las técnicas de vigilancia de la condición se basan en dispositivos utilizados para vigilar, detectar y diagnosticar la condición de los sistemas considerados. Por tanto, el objetivo de la técnica de vigilancia de la condición es suministrar información referente a la condición real del sistema y a los cambios que se producen en esa condición. Es importante entender el comportamiento del elemento al producirse el fallo, para que puedan seleccionarse las técnicas de vigilancia más efectivas. La decisión sobre la selección de las técnicas de vigilancia de la condición depende en gran forma del tipo de sistema usado, y en último término viene determinada por consideraciones económicas y/o de seguridad. Una vez que se ha tomado la decisión sobre las técnicas a usar, es posible definir el sistema que se necesitará para llevar a cabo la vigilancia de la condición. Debido al creciente interés en esta técnica durante los últimos años, existen muchos desarrollos de dispositivos relacionados con la vigilancia de la condición de sistemas. Los sensores, instrumentos, y dispositivos de grabación y de análisis han mejorado notablemente. Este desarrollo ha permitido obtener una información más fiable acerca de la condición del sistema. Una vez que se instalan los sensores de vigilancia de la condición y se recogen los datos, es necesario tener métodos fiables de interpretación de los mismos, para detectar en qué momento ocurren los fallos. Una tarea de mantenimiento condicional eficaz exige un gran número de medidas, efectuadas a intervalos que aseguren la identificación del cambio en la condición de un elemento o sistema, con tiempo suficiente antes de la acción correctiva. El volumen de datos necesario para determinar con precisión la condición del elemento o sistema, exige una considerable cantidad de tiempo para llegar a una presentación que pueda interpretarse. Por tanto, ha surgido una gran demanda de desarrollo de herramientas que diagnostiquen la condición del sistema y permitan la predicción del fallo. Los diagnósticos de los sistemas se han desarrollado hasta un punto en que la información disponible es de tal volumen, que el hombre necesita la ayuda del ordenador para sacar el mayor beneficio. La inteligencia artificial parece cubrir esta necesidad, suministrando numerosas técnicas potentes, para manejar grandes cantidades de datos. En todos los campos de la ingeniería se han aplicado técnicas de inteligencia artificial tales como sistemas expertos, redes neuronales, lógica difusa y sistemas basados en el conocimiento. En los últimos años, se han utilizado estas técnicas en el campo de la vigilancia y diagnosis de sistemas. Entre todas esas técnicas de inteligencia artificial, los sistemas expertos acaparan la mayor atención. Durante más de una década ha estado presente la idea de usar la tecnología de los sistemas expertos para desarrollar herramientas de apoyo de «software» para el mantenimiento de sistemas. Los sistemas expertos extienden la potencia del ordenador más allá de las funciones matemáticas y estadísticas habituales, usando el diálogo y la lógica para determinar diversas posibles acciones o consecuencias. Los sistemas expertos tienen varias ventajas sobre los expertos humanos:

- Pueden procesar la información mucho más rápidamente y, en consecuencia, pueden reducir el tiempo de diagnóstico de mantenimiento.
- Pueden analizar situaciones con objetividad y no olvidar ningún hecho relevante, reduciendo por tanto la probabilidad de realizar un diagnóstico erróneo.
- Pueden detectar fallos incipientes mediante la vigilancia en directo de los parámetros de condición del sistema.

Para seleccionar la técnica de vigilancia es necesario entender el comportamiento del elemento al producirse el fallo y los efectos que se provocan. En última instancia serán las consideraciones de tipo económico y/o de seguridad las que lo decidirán.

Los síntomas o efectos en los que se suelen basar estas técnicas pueden ser:

- Efectos dinámicos. (Vigilancia dinámica). *Vibraciones y ruidos.*

Estos análisis nacieron fundamentalmente para prevenir averías en cojinetes de rodillos y bolas. Los desgastes producen variaciones en los espectros de ruidos y vibraciones. Se aplica con frecuencia a: Bombas centrífugas; Motores; Turbinas; Torres de Refrigeración; Ventiladores; Turbinas de Gas; Compresores Centrífugos; Compresores Alternativos; Generadores; Reductores.

- Efectos químicos. (Vigilancia química) *Cambios de composición química.*
- Espectrometría y Cromatografía.

Efectos físicos. (Vigilancia de efectos físicos) *Roturas y desgastes. Líquidos penetrantes, Partículas magnéticas, Ultrasonidos. Radiografías.*

Estos análisis nacieron fundamentalmente para prevenir averías en los elementos de soporte de los motores de aviación. Las vibraciones de funcionamiento producen fisuras en la raíz de los soportes que con el tiempo se convierten en grietas peligrosas.

Efectos térmicos. (Vigilancia de la temperatura) *Incrementos de temperatura. Termografía*

Efectos eléctricos. (Vigilancia de efectos eléctricos) *Cambios en resistencia, conductividad y potencial dieléctrico. Meggers*

Efectos de partículas. (Vigilancia de partículas) *Emisión de partículas. Filtrados*

Estos análisis nacieron fundamentalmente para prevenir averías en cojinetes de fricción y engranajes de ruedas dentadas. Los desgastes producen partículas metálicas que se difunden en el aceite.

Entre la gran variedad de técnicas desarrolladas y existentes en la actualidad podemos destacar las siguientes:

1. Vigilancia de las vibraciones

Este tipo de técnica de vigilancia de la condición se basa en el hecho de que las máquinas giratorias, tales como bombas, compresores, cajas de cambios, turbinas, etc. producen vibraciones a medida que las máquinas se deterioran. Si alguno de estos sistemas empieza a fallar, sus niveles de vibración cambian; mediante la vigilancia de las vibraciones se trata de detectar y analizar estos cambios. A menudo sólo se mide y analiza el nivel de vibración global para vigilar la condición general del sistema. Los cambios en los niveles de vibración se pueden usar como un indicador para detectar fallos incipientes, y a veces para definir las posibles causas de un mal funcionamiento. Por tanto, la medida y el análisis del nivel de vibración pueden dar una buena indicación de la condición de la máquina, y usarse fiablemente en programas de mantenimiento basados en la condición, tanto como parámetro de vigilancia continua como en un programa periódico. La vibración puede caracterizarse mediante tres parámetros: desplazamiento, velocidad y aceleración. Basado en estos parámetros, existen básicamente tres transductores de medida de la vibración que pueden usar los ingenieros de mantenimiento para recopilar datos de las máquinas giratorias. Los tres transductores considerados son: transductor de desplazamiento, transductor de velocidad y acelerómetro. Hoy en día hay disponible una amplia gama de instrumentos que varían desde el simple hasta el especializado, así como sistemas basados en ordenador para la vigilancia de la vibración. Algunos de ellos son sistemas conectados en directo con sensores montados permanentemente. Otros se basan en medidas manuales. Al margen de si están conectados en directo o no, todos estos sistemas pueden analizar las medidas, almacenar los datos, deducir tendencias y representar gráficamente los resultados. El equipo de vigilancia de vibración consta normalmente de tres elementos principales: un dispositivo de adquisición de datos, efectuado mediante el uso de uno o más transductores apropiados localizados en la propia máquina, algún tipo de procesamiento de la señal, bien como análisis de series temporales o bien como espectro

de frecuencias, y un método por el cual se expone la condición de la máquina que se vigila. La mayoría de los análisis de vibración se basan en una o más técnicas de tendencia y análisis. Estas técnicas incluyen tendencia en banda ancha, tendencia en banda estrecha y análisis de firma. La importancia de la vigilancia de la condición de las máquinas giratorias por el análisis de vibraciones, crece continuamente y es probablemente una de las técnicas mejor desarrolladas en el campo del mantenimiento basado en la condición. Los problemas más importantes cuando se mide la vibración son: la gran cantidad de información a procesar y el pequeño número de personas expertas en el análisis de unos datos particulares de vibración que puedan deducir la condición de la máquina. Estas limitaciones se están venciendo mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial para automatizar la interpretación de los datos de vibración. Recientemente, ha habido un interés considerable en la aplicación de sistemas expertos a la vigilancia de la vibración de sistemas como turbinas de gas, cajas de cambios, etc.

2. *Vigilancia de la tribología*

Normalmente, las muestras de aceite se analizan en laboratorio usando diferentes métodos. La información del análisis es útil para determinar si una máquina, por ejemplo un motor, está sufriendo un desgaste anormal o si el lubricante está degradado. La vigilancia de la tribología emplea varias técnicas que pueden usarse en la ejecución de tareas de mantenimiento condicional.

A) **Análisis del aceite lubricante.** En los análisis del aceite lubricante, se estudian las muestras para determinar si cumplen todavía los requisitos de lubricación. Los resultados del análisis pueden emplearse para determinar la vida del lubricante y, por tanto, cuándo se debe cambiar o renovar para que siga cumpliendo los requisitos especificados. De esta forma, se puede usar el análisis del aceite lubricante para programar el intervalo de cambio de aceite, de acuerdo con su condición real. Los resultados del análisis pueden servir como base para cambiar el tipo de aceite a fin de mejorar las prestaciones. En conclusión, no se puede utilizar el análisis de aceite lubricante como una herramienta para determinar la condición operativa del sistema, pero sí como una ayuda importante para un mantenimiento basado en la condición.

B) **Análisis de partículas.** Es una técnica muy importante que se usa para suministrar una indicación acerca del cambio en la condición del sistema, así como para ayudar a determinar la causa del fallo. Las técnicas de vigilancia de los productos de desgaste se consideran como un método muy fiable para detectar una degradación de la condición operativa en casi todos los sistemas lubricados por aceite, porque una variación en el índice de contenido de dichos productos significa un cambio en la condición del sistema. Las partículas contenidas en el aceite lubricante proporcionan una información detallada e importante sobre la condición de la máquina. Esta información puede deducirse de la forma, distribución de tamaños y composición de las partículas. Se aplican distintas técnicas para la vigilancia de la condición de sistemas lubricados por aceite, a fin de comprender los procesos de desgaste que aparecen, y establecer un método apropiado que pueda aplicarse para detectar y diagnosticar una condición anormal del sistema. Mobley clasifica el análisis de partículas de desgaste en dos estados básicos: análisis del contenido de sólidos del lubricante, como cantidad, tamaño y composición, y análisis del tipo de desgaste.

Sin embargo, las limitaciones principales en el uso del análisis de la tribología como tarea de mantenimiento condicional son: el coste del equipo, la precisión en la adquisición de las muestras y la interpretación de los datos obtenidos.

3. *Vigilancia de las prestaciones*

La vigilancia de las prestaciones es un método que observa principalmente el modo en que los elementos o sistemas están realizando la función asignada. Las prestaciones que se consideran a estos

efectos son, por ejemplo: eficacia, temperatura, presión, caudal, velocidad, etc. Se recogen normalmente los datos de estos parámetros dentro de la rutina de funcionamiento para vigilar las prestaciones del sistema. Se puede explotar más a fondo su utilidad para que sirvan como indicadores de la condición del sistema. De esta forma, la vigilancia de las prestaciones se ha convertido en un procedimiento adoptado en muchas compañías, ya que puede ser una herramienta eficaz en la detección de fallos del sistema. De forma general, el análisis se compone simplemente de estudios de tendencia en función del tiempo. Se detecta una condición de fallo cuando se exceden ciertos valores límites. En grandes instalaciones es muy común que la mayoría de sistemas tengan instalada la instrumentación necesaria para medir los parámetros que indican la condición operativa real del sistema, como termómetros, indicadores de presión, etc. La masa de información que producen se recoge de una de estas dos formas: sistemas manuales o sistemas basados en microprocesadores; después, se analizan los datos para preparar salidas tales como gráficos, listados y, en algunos casos, órdenes de trabajo para el personal responsable de la tarea real de mantenimiento. En vez de estudiar los resultados de los sistemas de vigilancia de prestaciones, y decidir en consecuencia (lo que normalmente debería realizar personal altamente capacitado), se puede ahorrar mucho tiempo y dinero ejecutando inmediatamente los pasos de mantenimiento establecidos por sistemas expertos. La ventaja de tales sistemas de diagnóstico inteligente es que ayudan a interpretar la gran cantidad de datos de parámetros de prestaciones que suministran los sistemas convencionales de vigilancia de condición al personal de mantenimiento. Además, son adecuados para encontrar sentido a un conjunto complejo de datos en situaciones en que debe tomarse un gran número de decisiones interrelacionadas.

4. Inspección visual

A pesar de los muchos métodos complejos de inspección disponibles, todavía es importante la ayuda de la inspección visual. Un inspector experimentado puede detectar visualmente muchos defectos, tales como fugas, holguras en los montajes, grietas superficiales, etc. Se dispone de una amplia gama de herramientas que ayudan en la realización de las inspecciones visuales, como espejos, lentes, telescopios, etc. La inspección visual se usa ampliamente en la industria como una forma simple, rápida y relativamente barata de vigilar la condición, y a menudo juega un papel importante en el mantenimiento basado en la condición.

4.7.2 Técnicas de ensayos no destructivos.

Son técnicas que se usan para vigilar de forma directa el deterioro de la condición del componente en servicio. Entre las más utilizadas tenemos:

1. Inspección con partículas magnéticas

Se usa para detectar y localizar en los materiales ferromagnéticos las discontinuidades superficiales o cercanas a la superficie, mediante la generación de una corriente magnética en el elemento. Durante la revisión general de mantenimiento programada, se puede inspeccionar la existencia de grietas en elementos tales como ejes, volantes, álabes de turbinas de vapor, etc., mediante la inspección con partículas magnéticas. Este tipo de técnica no es un análisis cuantitativo, pero con ella un usuario cualificado puede ser capaz de proporcionar una estimación razonable de la profundidad de una grieta.

2. Examen por corrientes inducidas

Es un método que se basa en los principios del electromagnetismo. Cuando un material magnético está presente en un campo electromagnético y se produce algún movimiento entre ellos, se induce una corriente eléctrica en el material metálico (corrientes parásitas). La presencia de discontinuidades en el material, tales como grietas, burbujas, etc., determina la magnitud y fase de la corriente inducida. Se puede usar la técnica de las corrientes inducidas para detectar defectos superficiales o sub-superficiales en un elemento, y también para medir el espesor de capas, conductoras

o no conductoras, en materiales con base ferrosa o no ferrosa, así como para suministrar información sobre ciertas características estructurales tales como las condiciones metalúrgicas y las propiedades físicas.

3. *Emisión acústica*

Es la emisión de ondas de alta frecuencia cuando se libera rápidamente energía de deformación, como consecuencia de ciertos cambios estructurales ocurridos en un material, tales como el crecimiento de una grieta y la deformación plástica. Las transformaciones del material tienen como resultado la generación de señales acústicas que pueden detectarse y analizarse, y por tanto, es posible obtener información sobre la localización y la significación estructural de tales fenómenos. Esta técnica es capaz de detectar la localización de la transformación interna del material, pero sin embargo no es capaz de identificar la magnitud de la grieta o de cualquier otra transformación del material, precisando por tanto complementarse con otras técnicas, por ejemplo, la de ultrasonidos. Una de las aplicaciones de esta técnica es la inspección de las vasijas de presión en las plantas nucleares [Asociación Internacional de Energía Atómica (1993)]. La vigilancia acústica depende mucho del establecimiento de unas precisas condiciones iniciales. Una vez que se determina la firma acústica del sistema, los resultados pueden compararse con la base establecida. Los cambios respecto a ella representan cambios en las condiciones del sistema.

4. *Termografía*

Es la práctica de recoger imágenes de la radiación térmica emitida por los objetos en la región infrarroja del espectro. Por tanto, esta técnica se basa en el principio de que alguno de los sistemas en operación desprende calor. La termografía usa una instrumentación diseñada para medir emisiones de energía en el infrarrojo, como medio para determinar la condición operativa del sistema. La cantidad de calor emitida varía a medida que lo hacen las condiciones de operación. La termografía se utiliza en la vigilancia de la condición para distintas aplicaciones; quizá el mayor uso de esta técnica es en la detección de fallos en circuitos eléctricos, por ejemplo, para detectar conexiones eléctricas defectuosas en transformadores e interruptores eléctricos. Puede usarse también en la detección de la vida operativa de las paredes de hornos y en la alineación de las vasijas de presión en la industria petroquímica y del acero.

5. *Radiografías*

Se pueden fotografiar las discontinuidades superficiales o sub-superficiales causadas por fatiga, inclusiones, corrosión por tensión, etc., usando una radiación electromagnética de onda muy corta, principalmente rayos-X o rayos gamma. Esta técnica es una manera eficaz de detectar grietas internas, imperfecciones, faltas de homogeneidad, etc., pero la determinación del tamaño y posición de cualquier discontinuidad exige un personal muy especializado. Los inconvenientes de esta técnica son que exige el acceso a dos lados opuestos de un objeto, y que tiende a ser una técnica cara, comparada con otros métodos no destructivos. Esta técnica ha sido desarrollada más a fondo, y en la práctica se han aplicado métodos como la radiografía de neutrones, la estéreo-radiografía y la micro-radiografía.

6. *Inspección por ultrasonidos*

Es uno de los métodos más usados de ensayo no destructivo. Este método es apropiado para la detección, identificación y evaluación del tamaño para una amplia variedad de defectos superficiales y sub-superficiales en los materiales metálicos, siempre que haya acceso a la superficie. Se puede usar en la inspección rutinaria de aviones, vehículos de raíl, etc. para la búsqueda de grietas de fatiga incipientes. Puede emplearse también para medidas precisas de espesores, lo que puede realizarse usando técnicas de eco de los impulsos ultrasónicos. Este grado de precisión permite la vigilancia de la corrosión registrando los pequeños cambios en el espesor de una pared. Algunos equipos ultrasónicos, que están contruidos específicamente para la medida de espesores, suministran una lectura digital

directa del grosor de la pared. Este tipo de técnica de vigilancia parece ser el más apropiado para vigilar directamente el parámetro de condición. Esta técnica es difícil de usar cuando las partes inspeccionadas son rugosas, irregulares en su forma, o no homogéneas.

7. *Líquidos penetrantes*

Se usan principalmente para detectar discontinuidades abiertas superficiales, tales como grietas, porosidades, despegaduras y exfoliaciones.

4.7.3 Técnicas de diagnóstico mediante sistemas digitales.

En modernos y complejos sistemas electrónicos la comprobación integrada permite la detección de fallos y errores del mismo, con objeto de proteger al usuario y al sistema contra fallos u órdenes erróneas. Esta función de detección de fallos es por lo tanto parte de la función operativa básica del sistema.

Los elementos de comprobación integrada se denominan Built-in Test Equipment (BITE) y normalmente forman parte física del sistema, como un componente más. Los BITE están compuestos normalmente por algo "hardware" y mucho "software" y puede actuar de dos formas:

- a) Mediante pruebas puntuales o periódicas
- b) Mediante seguimiento operativo de las prestaciones.

Actualmente la evolución de los sistemas digitales a llevado al desarrollo de los denominados "Bus de Datos" que permiten monitorizar todos los datos del sistema, tanto operativos como de mantenimiento para mantener un total control de la disponibilidad operativa del sistema.

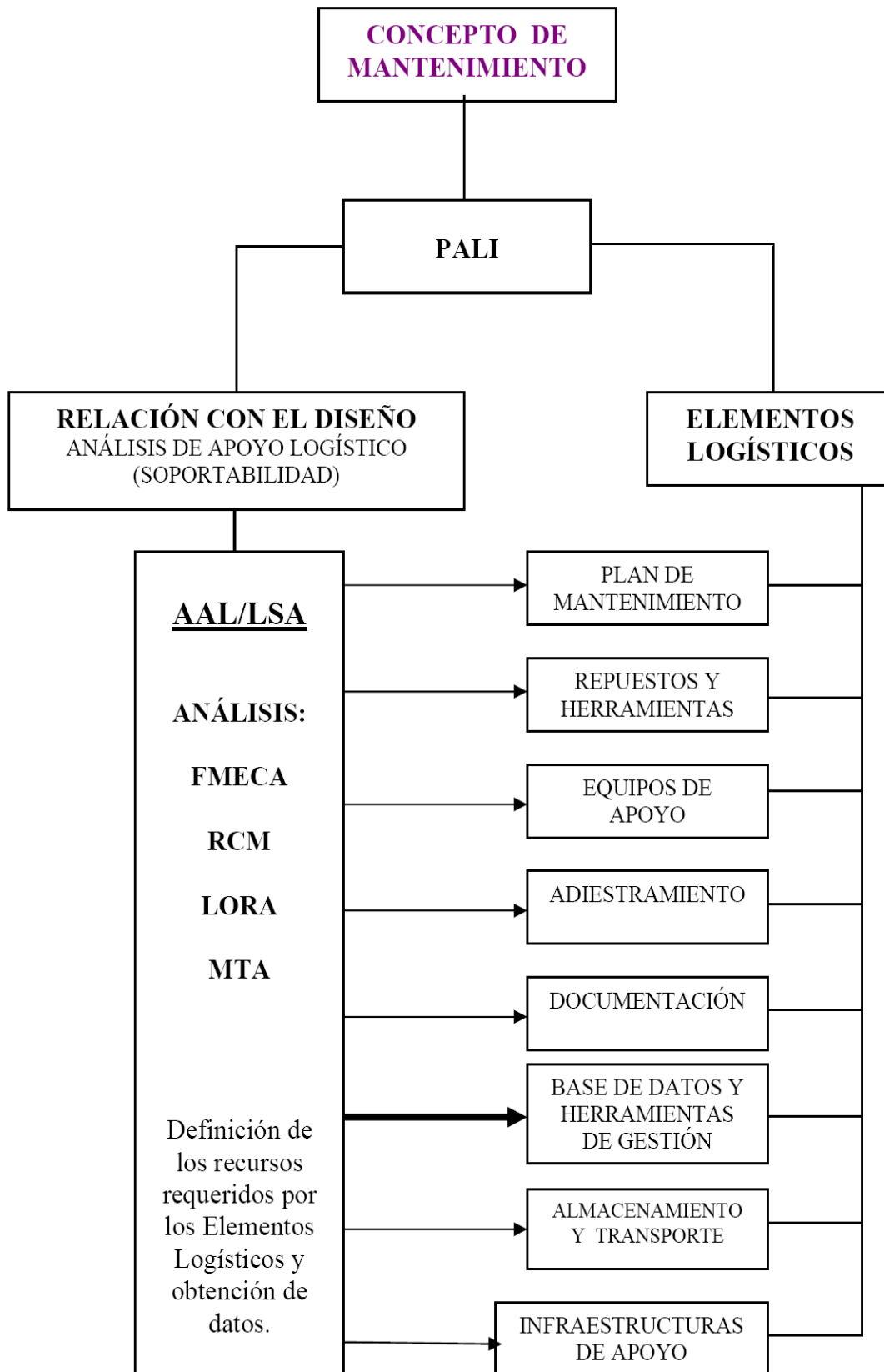
5 CONCEPTO DE MANTENIMIENTO

La aplicación de la estrategia del ALI, por parte de los diseñadores y constructores del sistema, comienza por conocer, del futuro usuario, como tiene previsto hacer el mantenimiento del mismo. El Concepto de Mantenimiento es el documento o texto donde el cliente, o futuro usuario del sistema, define el cómo va a desarrollar y gestionar el plan de mantenimiento a elaborar para el sistema. El Concepto de Mantenimiento es una especificación "a priori" del conjunto de requisitos que debe cumplir el proceso de mantenimiento, los cuales se derivan de la necesidad a satisfacer y de los requisitos operativos del sistema, ya que el mantenimiento tiene una gran influencia en su disponibilidad operativa. Es importante resaltar que si, el responsable del mantenimiento de un sistema de producción, se plantea como objetivo mejorar la eficacia del mantenimiento del mismo debería, como primer paso a dar, desarrollar un documento en el que se defina el Concepto de Mantenimiento que desea aplicar a su sistema.

El Concepto de Mantenimiento es uno de los aspectos que ha de figurar como un apartado más o capítulo de la especificación del sistema incluida en las peticiones de oferta que todo cliente remite a los posibles contratistas. Los requisitos que figuran en él son, además de requisitos de diseño, la base para definir las condiciones que han de ser tenidas en cuenta en los Análisis de Apoyo Logístico (LSA), fundamentalmente en los diagramas lógicos de decisión que figuran en sus diversas metodologías, los cuales nos permitirán definir los recursos de apoyo logístico más adecuados para el sistema en base a ese Concepto de Mantenimiento.

El Concepto de Mantenimiento es el desencadenante de todo el proceso de obtención del apoyo logístico de un sistema. El Concepto de Mantenimiento, redactado en primera instancia por el cliente, se integra en el Plan de Apoyo Logístico Integrado (PALI) que desarrolla el contratista en base a los modelos de PALI que tiene establecidos para cada tipo de sistema que fabrica o construye y que la estrategia del Apoyo Logístico Integrado (Integrated Logistic Support, ILS) propone como parte de la Ingeniería de Sistemas. El PALI especifica a) los Elementos Logísticos a desarrollar para el sistema

que se pretende obtener y b) actividades logísticas relacionadas con el diseño incluido el Análisis de Apoyo Logístico a realizar sobre sistema para la obtención de los recursos (materiales, datos, documentación, etc.) requeridos por cada Elemento Logístico, y todo ello enmarcado por los requisitos contenidos en el Concepto de Mantenimiento. Véase la figura:



5.1 Requisitos de mantenimiento.

Los principales requisitos integrantes del concepto de mantenimiento de un sistema se pueden agrupar de la siguiente forma:

- a) **Política general de mantenimiento.** Mediante este requisito se establece que estrategia de mantenimiento debe ser aplicada para el sistema que se solicita, la cual nos va a informar de las preferencias del usuario en relación con los tipos de mantenimiento, preventivo o correctivo, del aprovechamiento o desecho de los elementos sustituidos, es decir sobre la reparabilidad de las piezas y módulos de repuesto; sobre su capacidad de llevar a efecto las tareas de mantenimiento o si pretende contratar su ejecución, etc.
Cada estrategia tiene sus ventajas e inconvenientes, y en cada caso deberá analizarse cuál es la más adecuada desde un punto de vista operativo, técnico, y/o económico. Una mayor capacidad de reparación de los módulos de un sistema puede alargar los tiempos de ejecución de las tareas de mantenimiento, pero supone una dependencia menor de fuentes externas para el suministro de repuestos y, por tanto, un mayor grado de autonomía o autosuficiencia en la operación continuada del sistema. Por contra, la reparación por sustitución y posterior envío de los módulos averiados a reparar o desechar, permite alcanzar mayores disponibilidades operativas y seguridades de misión; es decir, permite obtener mayores niveles de efectividad del sistema.
- b) **Niveles de mantenimiento.** En el Concepto de Mantenimiento se definen los diferentes niveles o escalones a los que se asignará la ejecución de cada una de las tareas de mantenimiento. Estos niveles pueden ser tanto internos a la organización usuaria del sistema como externos a ella. En el diseño del sistema deberá tenerse en cuenta los niveles definidos por el usuario, así como los medios, recursos y capacidad disponible en cada uno de ellos
- c) **Responsabilidades de mantenimiento.** Es necesario definir en la organización usuaria del sistema las principales responsabilidades relacionadas con su mantenimiento (ejecución de las tareas, adquisición y almacenaje de los repuestos necesarios, etc.). La no delimitación de responsabilidades significará, inevitablemente, una disminución en la eficacia de la gestión del mantenimiento (por ejemplo, compras de repuestos realizadas por quienes no tienen la experiencia real de consumos históricos, o cursos de formación concebidos por personas ajenas a los conocimientos y problemática del personal de mantenimiento, etc.).
- d) **Figuras de Mérito de la Mantenibilidad.** La efectividad y eficiencia del mantenimiento (mantenibilidad) se expresa a través de diferentes figuras de mérito, como ya hemos visto, que definen fielmente los requisitos del sistema desde el punto de vista de su mantenimiento. En cada caso deben especificarse las métricas que sean realmente aplicables y apropiadas para definir y representar las características de mantenibilidad de un sistema.
- e) **Entorno ambiental de mantenimiento.** Es necesario especificar en qué tipo de entornos deberá realizarse el mantenimiento, para que el diseño del sistema así lo permita. La mantenibilidad está influenciada por las condiciones en el que se opera y mantiene el sistema (en los referente a temperatura, humedad, vibraciones, iluminación, ruidos, estabilidad, etc), por lo que la identificación y definición detallada de esos entornos es esencial para asegurar una mantenibilidad adecuada del sistema a lo largo de su vida operativa.
- f) **Entorno operativo de mantenimiento.** Es necesario especificar qué condiciones de disposición y configuración deben ser consideradas y sobre las cuales hay que tomar medidas en el diseño para optimizar la realización de las tareas de mantenimiento. Estos aspectos ya han sido considerados en el módulo de Mantenibilidad. Como resumen tenemos las siguientes practicas de diseño:

- Estandarización.
 - Modularidad.
 - Identificación o configuración física del sistema.
 - Accesibilidad.
 - Áreas de servidumbre.*
 - Remoción.*
 - Rutas de Desmontaje.*
 - Control y Observación.*
 - Testabilidad.
 - Ergonomía.
- g) Relación de otros elementos de apoyo logístico con el mantenimiento. Estos aspectos, que en las primeras fases del diseño se incluyen como parte del concepto de mantenimiento, pasarán luego a formar parte de la especificación del Plan de Apoyo Logístico Integrado (PALI). Aquí los trataremos en el siguiente apartado Soportabilidad.

5.2 La soportabilidad

Con el término Soportabilidad nos estamos refiriendo a la capacidad que va a tener y desarrollar el usuario para mantener el sistema operativo y conseguir cotas de indisponibilidad del mismo, lo más reducidas posibles. La soportabilidad va a depender de dos aspectos,

- b) los recursos de apoyo suministrados por el contratista, definidos y obtenidos mediante el desarrollo del Plan de Apoyo Logístico Integrado (PALI) y
- c) la capacidad de gestión del plan de mantenimiento del sistema por la propia organización empresarial del usuario.

La Soportabilidad se mide mediante el factor, o figura de mérito, denominado Tiempo Medio de Retrasos Logísticos (Mean Logistic Delay Time. MDLT), y que, como ya vimos en Mantenibilidad, es un componente de la fórmula de la Disponibilidad Operativa de los sistemas. Este valor representa el tiempo medio requerido para disponer de todos los recursos de apoyo a pie del elemento a mantener y es un tiempo independiente del tiempo de ejecución de la tarea de mantenimiento.

Los retrasos que componen el MDLT son los debidos a la no disponibilidad de los recursos requeridos por los siguientes Elementos Logísticos:

- **Mantenimiento.** Este Elemento Logístico incluye el plan de mantenimiento con toda la programación de ejecución de las tareas y con los datos requeridos para su gestión y la de los recursos requeridos. No disponer de un plan de mantenimiento informatizado provocará retrasos en el inicio de las tareas de mantenimiento por la necesidad de conocer previamente como se ha de realizar la tarea y los recursos requeridos por la misma.
- **Aprovisionamiento.** Este Elemento incluye la definición y obtención de los repuestos y herramientas requeridos por cada nivel de mantenimiento (primer nivel u operadores, segundo o tercero de mantenedores especializados), los procedimientos de codificación y adquisición y la colección de datos necesaria para la reposición de lo consumido. Los retrasos inducidos por la carencia de los repuestos necesarios para la realización de la tarea de mantenimiento son los más habituales y también los más importantes ya que pueden suponer hasta el 70% del valor del MDLT.
La identificación de elementos (codificación, catalogación, etiquetado, etc) permite una rápida localización de los repuestos y materiales necesarios para el mantenimiento. En general, la identificación de los elementos de un sistema mejora su soportabilidad al facilitar

la realización de las tareas a los técnicos de mantenimiento, reduciendo la probabilidad de que se cometan errores en la ejecución de las mismas. Un ejemplo claro es el del empleo de cables de diferentes trazas y colores en los mazos de cables eléctricos.

- **Equipos de Apoyo y Pruebas.** Este Elemento incluye la definición y obtención de los equipos de apoyo y pruebas requeridos por cada nivel de mantenimiento para la realización de las tareas que tienen asignadas. Se inducen retrasos por la no disponibilidad de los equipos adecuados.
- **Adiestramiento.** Este Elemento incluye la definición, planificación y realización del adiestramiento para operar y mantener el sistema. Incluyen también la ayudas necesarias para el adiestramiento, como pueden ser simuladores o ayudas informáticas para el desarrollo de los cursos de adiestramiento. El carecer de personal, con la capacidad adecuada para la realización de los mantenimientos, es otro de los factores que mayor incidencia tienen en el MLDT.
La formación que reciba el personal de mantenimiento es el complemento a la documentación, y tiene la misma incidencia en la facilidad y economía (de tiempo y recursos) con que se realiza el mantenimiento de los sistemas. El efecto de una buena formación del personal de mantenimiento es análogo al de una buena documentación.
- **Documentación.** Este Elemento incluye el desarrollo de toda la documentación requerida por el sistema, manuales técnicos, planos de diseño y construcción, manuales de mantenimiento etc. La carencia de la documentación de mantenimiento adecuada también induce retrasos.
Cuanto más detallada y clara sea la documentación de mantenimiento de un sistema, más fácil y rápida será la ejecución de las tareas de mantenimiento. Una documentación incompleta, poco detallada o confusa puede significar un mayor consumo de tiempo y recursos materiales y humanos en su ejecución, así como una mayor probabilidad de “introducir” averías en el sistema. Una buena documentación no sólo contribuye a mejorar la soportabilidad del sistema al aportar descripciones detalladas de las tareas que permitan su ejecución rápida y segura, sino que con ello contribuye a la fiabilidad reduciendo la probabilidad de introducción de averías en la propia ejecución de las tareas de mantenimiento.
- **Datos.** Uno de los aspectos más importantes del Análisis de Apoyo Logístico (AAL/LSA) es la obtención de datos logísticos que han de ser suministrados al cliente para su utilización en la gestión de todo el mantenimiento del sistema a lo largo de su ciclo de vida. La carencia de una base de datos logísticos puede provocar, además de una deficiente gestión, retrasos logísticos considerables.
- **Manejo, Empaquetado, Almacenamiento y Transporte.** Este Elemento Logístico define las necesidades relacionadas con estos aspectos y que son requeridas por los componentes del sistema a adquirir y de los materiales de apoyo. Todos estos aspectos, si no han sido adecuadamente considerados pueden también inducir retrasos adicionales a los del elemento anterior. Aspectos tales como los tiempos de transporte entre centros de mantenimiento.
- **Infraestructuras.** Este Elemento incluye la definición y obtención de todos los medios de infraestructuras, talleres, almacenes, centros de gestión y centros de adiestramiento, que nos van a permitir realizar el plan de mantenimiento del sistema con la autonomía que el usuario del mismo se ha propuesto. Los talleres propios o contratados requeridos por el despliegue del sistema influirán en su facilidad de mantenimiento y en la soportabilidad del sistema. El desconocimiento del taller o centro de mantenimiento de un determinado componente inducirá siempre retrasos.

Para que todos estos recursos y la ingente cantidad de datos requeridos para su gestión sean correctamente recibidos por el usuario el contratista y constructor del sistema ha de entregárselos y

previamente recopilarlos. Para la obtención de los mismos es necesario que se los exija a sus subcontratista mediante las correspondientes cláusulas que ha de incluir en las peticiones de oferta o en los pedidos de cualquier tipo de componente o equipo que vaya a formar parte del sistema complejo.

La optimización de la Soportabilidad del sistema es el objetivo principal del Análisis de Apoyo Logístico (LSA), y de todos los procedimientos y métodos involucrados en el mismo, ya que mediante su aplicación se obtienen todos los recursos de mantenimiento y todos los datos de gestión del mismo.

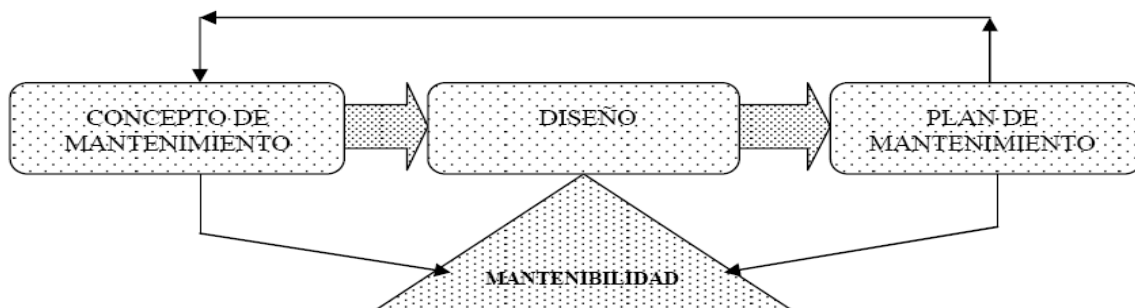
6. ORGANIZACIÓN, PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Todas las tareas de mantenimiento de las que hemos hablado hasta ahora y todos los recursos que precisan son el objetivo de la Soportabilidad. Su definición y planificación se obtiene mediante los Análisis de Apoyo Logístico (AAL/LSA), y de cuyos resultados se obtienen los datos que nos permitirán definir el plan de mantenimiento del sistema. Normalmente es de la base de datos LSAR de donde se obtiene el plan de mantenimiento.

6.1 El plan de mantenimiento

El concepto de mantenimiento recoge los requisitos de mantenibilidad y mantenimiento del sistema, y como tal es un input para el diseño. El sistema debe diseñarse de forma que satisfaga los requisitos de mantenibilidad y se le pueda aplicar la estrategia de mantenimiento especificados por el usuario. Una vez diseñado el sistema a partir de los requisitos especificados (tanto de mantenibilidad como del resto de disciplinas), de su configuración se derivarán unas tareas de mantenimiento requeridas para prevenir la aparición de fallos (o paliar sus efectos) y otras para devolverlo a estado operativo cuando haya fallado. Al conjunto de todas esas tareas y de su planificación se le denomina Plan de Mantenimiento del sistema.

El plan de mantenimiento es una consecuencia del diseño. A diferencia del concepto de mantenimiento, que era un input para el proceso de diseño, el plan de mantenimiento es un resultado de dicho proceso. Aunque de lo anterior se desprende que el concepto de mantenimiento tiene una incidencia clara en el plan de mantenimiento, ya que el primero influye en el diseño, del que el segundo es una consecuencia, también el plan de mantenimiento puede incidir en el concepto de mantenimiento. Por la naturaleza iterativa del diseño, es posible que durante el proceso de diseño de un sistema el plan de mantenimiento que resultaría pudiera ser incompatible con otros requisitos expresados por el usuario, por lo que ello puede motivar una revisión del concepto de mantenimiento (y tal vez de otros requisitos especificados). De esa forma, antes de que se alcance la configuración definitiva del sistema y finalice el diseño, la anticipación del plan de mantenimiento resultante puede condicionar la revisión de los requisitos de mantenibilidad establecidos. Esa doble relación entre el concepto de mantenimiento y el plan de mantenimiento se ilustra en la siguiente figura.



Relación entre concepto de mantenimiento y plan de mantenimiento.

El plan de mantenimiento es el medio con el que debe contar el usuario del sistema para gestionar todos los recursos de mantenimiento y ejecutar las tareas de mantenimiento programadas o no, que se prevén para el ciclo de vida operativa del sistema. El plan, por lo tanto planifica:

a) A quien se le debe hacer la tarea de mantenimiento

El plan de mantenimiento va dirigido a un sistema determinado por lo el plan debe incluir, obligadamente, la configuración física del sistema. Cada tarea de mantenimiento debe hacer referencia a la marca funcional (MF) o marcas funcionales a las que se debe aplicar.

b) Que se debe hacer

Lo que debe hacer no es más ni menos que todas las tareas de mantenimiento, programadas o no.

c) Cuando se debe hacer

Se refiere a la periodicidad de las tareas de mantenimiento preventivo programado o condicional y mediante la frase "cuando se requiera", las tareas de mantenimiento correctivo.

d) Como se debe hacer

Cada tarea de mantenimiento debe estar perfectamente documentada por medio de una "tarjeta de mantenimiento", en la que se define todas las actividades de mantenimiento a ejecutar.

e) Quien lo debe hacer

Es la categoría de los técnicos que intervienen en cada tarea de mantenimiento y el nivel de conocimientos requeridos para poder ejecutarla.

Las necesidades de mantenimiento de los sistemas suponen cargas de trabajo que hay que considerar, para dimensionar adecuadamente la plantilla encargada de su realización en cada uno de los niveles que intervienen. Un sobredimensionamiento de la plantilla de mantenimiento implicará costes innecesarios para la organización usuaria del sistema, y una plantilla excesivamente corta implicará mayores tiempos de espera en la prestación de servicios de mantenimiento y, por tanto, una disminución de la operatividad de los sistemas.

f) Donde se debe hacer

Se refiere al lugar donde se ejecuta la tarea, denominado nivel de mantenimiento, el cual dispone de todos los recursos necesarios para su realización.

Es necesario definir los diferentes niveles en los que se dividirá la asignación y ejecución de las tareas de mantenimiento. Estos niveles pueden ser tanto internos a la organización usuaria del sistema como externos a ella. El diseño del plan de mantenimiento del sistema deberá realizarse teniendo en cuenta los niveles definidos por el usuario, así como los medios, recursos y capacidad disponible en cada uno de ellos. La definición y adopción de niveles de mantenimiento va asociada a la definición de la política y las responsabilidades de mantenimiento, es decir la estrategia de mantenimiento. Por ejemplo, en el caso de un automóvil se puede considerar que existen sólo dos niveles; por un lado están las tareas que puede realizar el propio usuario (primer nivel) y por otro aquellas que deben realizarse en talleres o centros especializados (segundo nivel). Para el caso de un buque es fácil considerar que el usuario adoptará por lo menos tres niveles; ciertas tareas podrán ser realizadas directamente por la tripulación (primer nivel), otras serán realizadas en centros especializados pertenecientes a la organización usuaria (segundo nivel), y por último algunas las llevarán a cabo las empresas suministradoras de equipos en sus propias instalaciones (tercer nivel). El número de niveles a establecer en cada caso dependerá de la naturaleza del sistema y de las características y medios de la organización usuaria.

g) Con que medios.

Se refiere, fundamentalmente, a los repuestos y herramientas (comunes o especiales) que de se deben emplear en cada tarea de mantenimiento. De los Análisis de Apoyo Logístico se obtiene la cantidad de los mismos.

6.2 La documentación del mantenimiento.

Cada una de las tareas de mantenimiento debe estar perfectamente descrita en documentos de mantenimiento independientes. Estos documentos, en muchos casos y dependiendo del entorno donde se utilizan, tienen diferentes formas estandarizadas. Como por ejemplo, en el ámbito naval se denominan Maintenance Record Card (MRC); en el de centrales nucleares Gamas, etc.

Cada tarjeta de mantenimiento debe tener un contenido autosuficiente para que el técnico, o técnicos que han de ejecutarla no requieran de otra documentación o información adicional. Su contenido debe ser como mínimo el siguiente:

- a) Elemento sobre el que se ha de realizar la tarea. Deben indicarse datos tales como el sistema, subsistema, equipo, y módulo si es necesario, con sus correspondientes códigos funcionales y de clasificación.
- b) Código de la tarea. Este código suele hacer referencia a su periodicidad, al nivel de mantenimiento que debe ejecutarla, a la clase de equipo sobre la que se hace la tarea (electrónico, electromecánico, etc.), prioridad de la tarea, etc.
- c) Situación, o localización, del equipo.
- d) Categoría del personal de mantenimiento y su número.
- e) Duración de la tarea de mantenimiento y las horas/hombre totales.
- f) Descripción del mantenimiento. Breve descripción o simplemente la denominación de la tarea.
- g) Precauciones de seguridad. Todo técnico participante de la ejecución debe conocer que precauciones de seguridad específica o general que debe tomar para su propia seguridad o la del equipo.
- h) Materiales. Se refiere a las piezas de repuesto, materiales consumibles, herramientas y equipos de prueba que se deben utilizar para la tarea. Es importante que cada uno de estos elementos figure con su código de clasificación (Part Number o NSN).
- i) Procedimiento. En este apartado se debe describir, paso a paso, todas y cada una de las acciones de mantenimiento que incluye la tarea, así como los datos de inspección o parámetros a controlar. Si es necesario deberán incluirse las tablas y los gráficos o esquemas que sean necesarios.

Estos documentos, como el resto de documentación del sistema, deben estar sometidos al control de la configuración.

6.3 Los recursos del mantenimiento.

Durante las fases de diseño y construcción de un sistema la ingeniería logística, a través de la estrategia del Apoyo Logístico Integrado (ALI) y de la herramienta metodológica Análisis de Apoyo Logístico (LSA), define, obtiene y suministra al cliente todos los recursos necesarios para gestionar el mantenimiento del sistema a lo largo de su ciclo de vida operativa. Estos recursos se concretan en el **apoyo logístico inicial** entregado al cliente junto con el sistema y cuyo contenido es el siguiente:

- a) **Materiales de apoyo.** Repuestos, herramientas y equipos de apoyo y prueba iniciales. Los repuestos solo suelen cubrir las necesidades de mantenimiento de un corto periodo de tiempo.
- b) **Datos.** Incluye toda la documentación y bases de datos necesarios para la gestión de la operación y del mantenimiento del sistema.
- c) **Adiestramiento.** Adiestramiento inicial de operación y mantenimiento.

d) Infraestructuras. Nuevas construcciones de apoyo al mantenimiento si son requeridas por el cliente.

Con todo este apoyo logístico inicial, el usuario, mediante la función logística empresarial debe gestionar el suministro de los recursos necesarios para realizar con éxito todas las tareas operativas y de mantenimiento del sistema a lo largo de todo su ciclo de vida operativa.

6.4 Programas de gestión de mantenimiento

Son programas informáticos, muchos de ellos comerciales, que, utilizando las bases de datos creadas mediante la aplicación de las metodologías del Análisis de Apoyo Logístico, permiten gestionar el Plan de Mantenimiento de cualquier sistema de producción.

Los programas de gestión del mantenimiento de tipo comercial permiten gestionar, como mínimo, el programa de tareas de mantenimiento y los recursos de repuestos y herramientas a utilizar en dichas tareas. Adicionalmente pueden tener capacidad de gestionar:

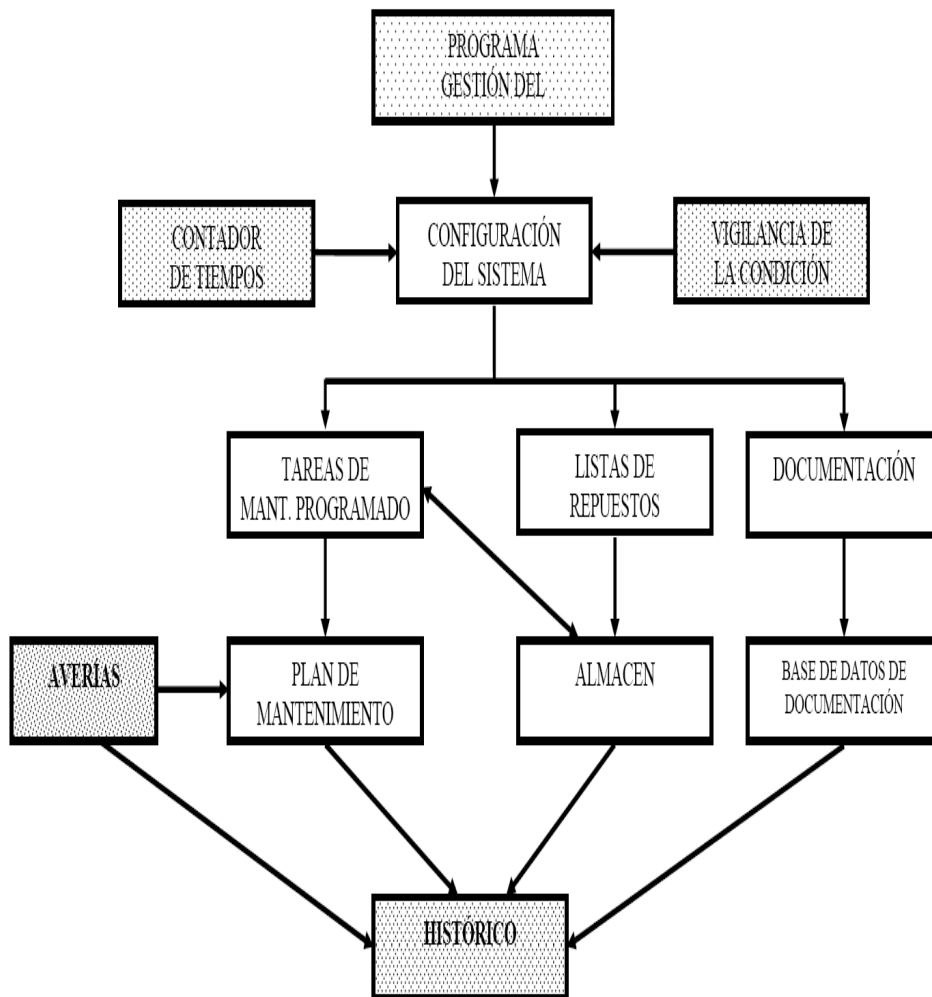
1. El almacenamiento de piezas de repuesto y su aprovisionamiento.
2. Control de la configuración del sistema.
3. Documentación de mantenimiento
4. Cursos de adiestramiento de mantenimiento
5. Contratos de mantenimiento
6. Control de costes
7. Almacenamiento de datos históricos

Por otra parte y dependiendo del tipo de sistema a mantener estos programas pueden ser simples gestores de bases de datos de mantenimiento o alcanzar el grado de sistemas expertos, lo que supone poder hablar de mantenimiento apoyado por ordenador. Cuando ocurre esto último, el programa informático tiene la capacidad de recibir información “on line” del propio sistema operativo, lo que permite una gestión del mantenimiento plenamente integrada con la operación del sistema y ello ayuda a una optimización de la disponibilidad del sistema productivo.

La información “on line” que normalmente se precisa recibir es, en primer lugar, el tiempo de funcionamiento de los componentes del sistema, ya que todas las acciones de mantenimiento están basadas en ese dato. En segundo lugar sería la información de todos y cada uno de los equipos automáticos de vigilancia de la condición que van a permitir al propio programa proponer, de forma experta, la ejecución de la correspondiente tarea de mantenimiento preventivo que evite el fallo que potencialmente esté comenzando a darse.

El diagrama siguiente muestra las posibles interrelaciones entre elementos de un programa de gestión del mantenimiento.

DIAGRAMA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO



6.5 Mantenimiento del software

Los nuevos sistemas civiles y militares implementan cada vez mas funcionalidad en software, esto les hace más flexibles, más adaptables y más inteligentes.

Al considerar todo el ciclo de vida del sistema hay que tener también en cuenta el apoyo al software.

El software, como componente de sistemas, tiene unas características que lo hacen diferente desde el punto de vista físico y lógico:

- Su diseño es caro, pero el coste de producción es casi nulo.
- No pesa, apenas ocupa espacio, puede distribuirse hasta por teléfono.
- No se rompe, no se oxida, no se desgasta.
- No tiene fallos, ¡tiene carencias (fracasos) de diseño!.
- No se repara, ¡se rediseña!
- Se repone cuando se reparan los componentes del sistema (hardware) que lo contienen. Para ello basta un solo “repuesto”, ¡la copia de seguridad!
- Su fracaso de funcionalidad (fallo), afecta a todo el sistema.
- Si el fracaso es “real” (fallo), no se arregla nada sustituyéndolo por su “repuesto”; el fracaso sigue allí.

El apoyo logístico del software cubre tres aspectos básicos del ciclo de vida del mismo:

- La operatividad del software
- La modificación del software
- La gestión logística del software

Consideraciones específicas:

1. Mando y control de interrelaciones (parejas entradas/salidas).
2. Diferentes elementos configurados de la estructura del programa del software. Diferente mantenimiento.
3. Bases de datos del software, como elementos configurados del mismo, y su actualización (mantenimiento).
5. Subrutinas. Diferentes subrutinas para diferentes interrelaciones. Equipos diferentes: pe. Impresoras.

6.6 Externalización del mantenimiento

Un aumento de los recursos de mantenimiento propias exige un aumento del coste de capital. Sin embargo, el aumento de las capacidades propias de mantenimiento 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 presenta un problema de costes difícil, ya que no sólo debe considerarse el coste requerido por los recursos exteriores, sino también el coste asociado con la pérdida de control de los trabajos de mantenimiento. Por ejemplo, usando recursos exteriores existe la posibilidad de que se produzca un mayor tiempo de inmovilización y, por consiguiente, un coste asociado de pérdida de ingresos.

La selección de la alternativa más favorable a realizar en un momento determinado, depende de:

- La naturaleza de la tarea de mantenimiento necesaria.
- Los recursos de mantenimiento disponibles en la casa.
- 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.

- Servicio de mantenimiento preventivo y correctivo
- Servicio de mantenimiento Integral
- Gestión del Mantenimiento por Ordenador
- Telemantenimiento.

Contrato de fiabilidad para el mantenimiento:

- “Garantía de Mejora de la Fiabilidad” (Reliability Improvement Warranty. RIW) Los contratos tipo RIW son fundamentalmente una previsión contractual de “Precio Fijo” por la cual el cliente se compromete con el contratista a contratarle la realización de ciertos mantenimientos y reparaciones del sistema durante un cierto periodo de tiempo. De esta forma el contratista se motiva a sí mismo a mejorar en todo lo posible sus diseños en cuanto a fiabilidad (MTBF) y mantenibilidad (MTTR) ya que esas mejoras en el diseño, o los posteriores rediseños, redundan en beneficios extra para él.

7. COSTES DEL MANTENIMIENTO

7.1 Coste de la tarea de mantenimiento.

El coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento (CTM), está relacionado con el coste de los recursos de mantenimiento utilizados directamente durante la ejecución de la tarea:

$$CTM = f(C_r, C_m, C_p, C_h, C_i, C_d) = C_r + C_m + C_p + C_h + C_i + C_d$$

Donde: C_r = coste de los repuestos, C_m = coste de los materiales de consumo, C_p = coste del personal, C_h = coste de las herramientas y equipos de pruebas, C_i = coste de las instalaciones, C_d = Coste de los datos.

El coste del personal ligado a una tarea de mantenimiento específico, es función de las siguientes variables:

$$C_p = f(HH_{cp}, CHH_{cp}, N_{cp}) = \sum (HH_{cpi} \times CHH_{cpi} \times N_{cpi})$$

Donde: HH_{cp} = horas/hombre de cada una de las categorías del personal involucrado en ejecución de la tarea, CHH_{cp} = coste de la hora/hombre de cada categoría y N_{cp} = número de personas de cada categoría.

Sin embargo, en la práctica diaria, los ingenieros tratan con más frecuencia con el valor medio del coste directo de las tareas de mantenimiento (CMTM), que puede definirse como:

$$CMTM = C_r + C_m + C_h + C_i + C_d + (MTTR \times CMH)$$

Donde: MTTR es el tiempo medio de reparación y CMH es el coste medio horario de mantenimiento.

7.2 Coste total directo de la política de mantenimiento correctivo

Para evaluar el coste directo relacionado con la aplicación de esta política de mantenimiento es necesario analizar todas las categorías de coste involucradas. El coste total directo del mantenimiento correctivo, CM^C para un tiempo de operación determinado, es una función de:

1. El coste directo de cada tarea de mantenimiento correctivo, CTM^C .
2. El número de tareas de mantenimiento correctivo, NTM^C , realizadas durante el tiempo de operación fijado.
3. La duración del propio tiempo de operación, To .
4. El coste de oportunidad o la pérdida potencial de ingresos, PPI.

De esta forma, la expresión general para el coste total directo de la política de mantenimiento basada en el fallo podría ser:

$$CM^C(T_o) = f(CTM^C, NTM^C, T_o, PPI)$$

Para los cálculos de predicción es conveniente actuar con costes medios, por lo que la expresión del coste medio de esta política de mantenimiento es.

$$CMM^C(T_o) = (CMTM^C + PPMI) \times NMTM^C(T_o)$$

Donde:

$$CMM^C(T_o) = \text{Coste total directo medio en el periodo } T_o.$$

$$CMTM^C = \text{Coste medio de la tarea de mantenimiento correctivo.}$$

PPMI = Pérdida potencial media de ingresos. Y que se calcula así:

$$PPMI = (MTTR + MLDT) \times PHI$$

$NMTM^C(T_o)$ = Numero medio de tares de mantenimiento correctivo en el periodo operativo T_o . Estas se pueden calcular mediante la fórmula:

$$NMTM^C(T_o) = T_o / MTBF$$

MTTR = Tiempo medio de reparación.

MLDT = Tiempo medio de retrasos logísticos.

PHI = Pérdidas horarias de ingresos.

MTBF = Tiempo medio entre fallos.

7.3 Coste total directo de la política de mantenimiento preventivo

El coste total directo del mantenimiento preventivo, CM^P , ya sea basado en la vida operativa o en la condición, para un tiempo de operación determinado, es una función de:

$$CM^P(T_o) = f(CTM^P, NTM^P, T_o, PPI)$$

Para evaluar este coste es conveniente actuar con costes medios, por lo que la expresión del coste medio de esta política de mantenimiento es.

$$CMM^P(T_o) = (CMTM^P + PPMI) \times NMTM^P(T_o)$$

Donde:

$CMM^P(T_0)$ = Coste total directo medio en el periodo T_0 .

$CMTM^P$ = Coste medio de la tarea de mantenimiento preventivo.

PPMI = Pérdida potencial media de ingresos. Y que se calcula así

$PPMI = (DMTM + RLA) \times PHI$

$NMTM^P(T_0)$ = Numero medio de tares de mantenimiento preventivo en el periodo operativo T_0 .
Estas se pueden calcular mediante la fórmula:

$NMTM^P(T_0) = T_0 / MTBM^P$

DMTM = Duración media de la tarea de mantenimiento preventivo.

RLA = Retrasos logísticos administrativos.

PHI = Pérdidas horarias de ingresos.

MTBM^P = Tiempo medio entre mantenimientos preventivos.

"Una buena localización de averías no es más que un buen razonamiento deductivo. En medio de ese razonamiento existe una cuidadosa observación y evaluación de la evidencia física. Desgraciadamente, muchos dispositivos en los aviones utilizan «chips» de ordenador para realizar una función que anteriormente desempeñaban componentes o subsistemas básicamente mecánicos.

Consecuentemente se dificulta la localización de averías, en el sentido tradicional de búsqueda de evidencias físicas del fallo. No se puede localizar una avería en un «chip» de ordenador buscando evidencias físicas. Un «chip» averiado no ofrece un aspecto distinto de otro en buen estado. Aunque se puede argumentar que los «chips» averiados desprenden humo en ocasiones, pocas veces se evidencia el de fallo. Los «chips» averiados no gotean, no vibran, ni hacen ruido.

En su interior, un «software» defectuoso no deja charcos o manchas como evidencia de su comportamiento erróneo. Por decirlo de otro modo, es difícil ver caer los unos y ceros del extremo de una patilla de conexión."

John Hessburg,
Mecánico Jefe Grupo Aéreo Comercial Boeing
[Airliner/Enero-Marzo 1995]

Anexo A

DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DE MANTENIBILIDAD

Distribución Exponencial

$$m(t) = 1/\underline{\mathbf{M}} \exp [- t/\underline{\mathbf{M}}] = 1/\underline{\mathbf{M}} e^{-t/\underline{\mathbf{M}}}$$

$$\mathbf{M}(t) = 1 - e^{-t/\underline{\mathbf{M}}}$$

Dónde.

t = tiempo de reparación/mantenimiento para cada ensayo

$\underline{\mathbf{M}} = [\Sigma t]/N$ = media (parámetro de escala)

N = número total de ensayos

σt = desviación típica de tiempo de reparación/mantenimiento (parámetro de forma): $\sigma t = \sqrt{\underline{\mathbf{M}}}$

El tiempo medio de reparación/mantenimiento (la media) viene dado por:

$$\mathbf{MTTR} = \underline{\mathbf{M}} = [\Sigma t]/N = (-t)/\ln[1 - \mathbf{M}(t)]$$

El tiempo máximo de reparación/mantenimiento viene dado por:

$$\mathbf{M}_{ctmax} = \underline{\mathbf{M}} + k \sqrt{\underline{\mathbf{M}}}; k = \text{Valor que se obtiene de tablas estandarizadas.}$$

También se puede obtener de la siguiente forma reducida:

$$\mathbf{M}_{max} = k_e \underline{\mathbf{M}}; k_e = \text{Los valores siguientes (según :}$$

α (nivel de confianza)	k_e
80 %	1.61
85 %	1.90
90 %	2.31
95 %	3.00

Distribución Normal

$$m(t) = [1/\sigma_t \sqrt{2\pi}] \exp [(-1/2)\{(t - \underline{M})/ \sigma_t\}^2]$$

$$M(t) = \Phi[(t - \underline{M})/ \sigma_t] \text{ (}\Phi \text{ es la función normal de Laplace)}$$

Donde:

t = tiempo de reparación/mantenimiento para cada ensayo

\underline{M} = $[\sum t]/N$ = media (parámetro de escala)

σ = desviación típica de tiempo de reparación/mantenimiento (parámetro de forma) =

$$= \left[\frac{\sum (t - \underline{M})^2}{N-1} \right]^{1/2}$$

N = número de acciones de reparación/mantenimiento

El tiempo medio de reparación/mantenimiento (la media) viene dado por:

$$MTTR = \underline{M} = [\sum t]/N$$

El tiempo máximo de reparación viene dado por:

$$M_{max} = \underline{M} + z(\alpha) \sigma_t$$

$z(\alpha)$ = El valor de la abscisas en la función de distribución normal tipificada que corresponde a un porcentaje (α) en la función de mantenibilidad para la que se define la M_{max} . Los valores siguientes:

(α) (nivel de confianza)	$z(\alpha)$
80 %	0.8416
85 %	1.036
90 %	1.282
95 %	1.645
99 %	2.326

Distribución Lognormal

$$m(\ln t \sqrt{2\pi})] \exp [-1/2 \{(\ln t - \underline{\ln M})/ \sigma_{\ln t}\}^2]$$

$$M(t) = \Phi[(\ln t - \underline{\ln M})/ \sigma_{\ln t}]$$

Donde:

Φ es la función normal de Laplace

t = tiempo de reparación/mantenimiento para cada ensayo

$\underline{\ln M} = [\sum \ln t]/N =$ media $\ln t$ (parámetro de escala)

$\sigma_{\ln t} =$ desviación típica del \ln del tiempo de reparación o mantenimiento (parámetro de forma)

$$= \left[\frac{\sum (\ln t - \underline{\ln M})^2}{N-1} \right]^{1/2}$$

N = número de acciones de reparación/mantenimiento.

El tiempo medio de reparación (la media) viene dado por:

$$MTTR = \underline{M} = \exp [\underline{\ln M} + (1/2)(\sigma_{\ln t})^2]$$

El tiempo máximo de reparación viene dado por:

$$M_{\max} = \exp [\underline{\ln M} + z(\alpha) \sigma_{\ln t}]$$

$z(\alpha) =$ El valor de la abscisas en la función de distribución normal tipificada que corresponde a un porcentaje (α) en la función de mantenibilidad para la que se define la M_{\max} . Los valores más usados son los que se han indicado para la Normal.

Distribución Weibull

$$m(t) = Bm(t)^{Bm-1} / (Am)^{Bm} \cdot \exp\{-(t/Am)^{Bm}\}$$

$$M(t) = 1 - \exp\{-(t/Am)^{Bm}\}$$

Donde:

t = tiempo de reparación/mantenimiento para cada ensayo

Am = α = parámetro de escala

Bm = β = parámetro de forma

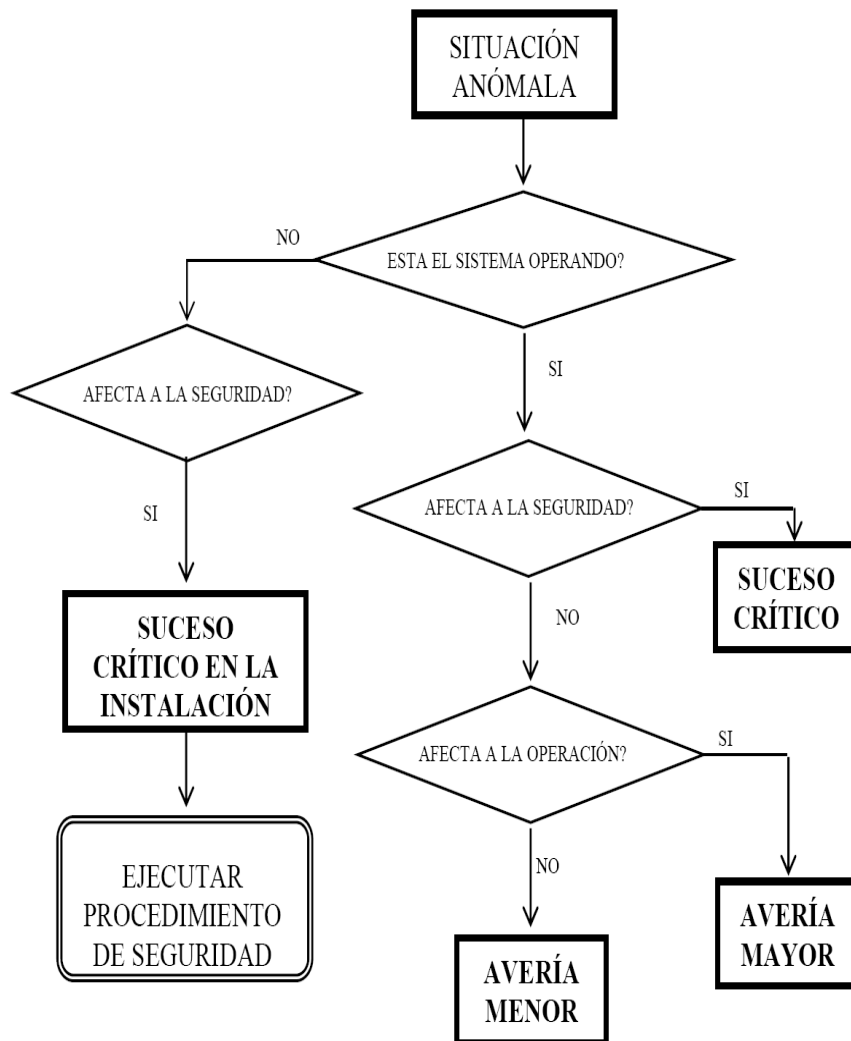
El tiempo medio de reparación/mantenimiento (la media) viene dado por:

$$MTTR = Am \Gamma(1 + 1/Bm)$$

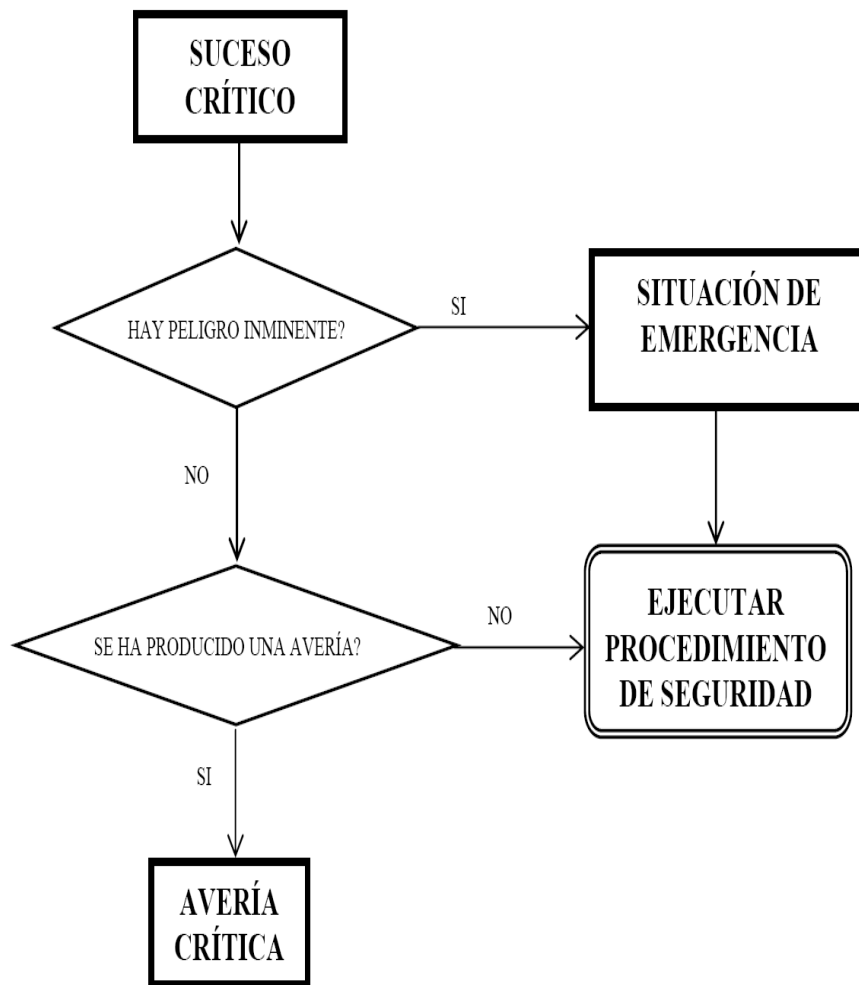
ANEXO B

DIAGRAMAS DE TOMA DE DECISIONES EN FALLOS

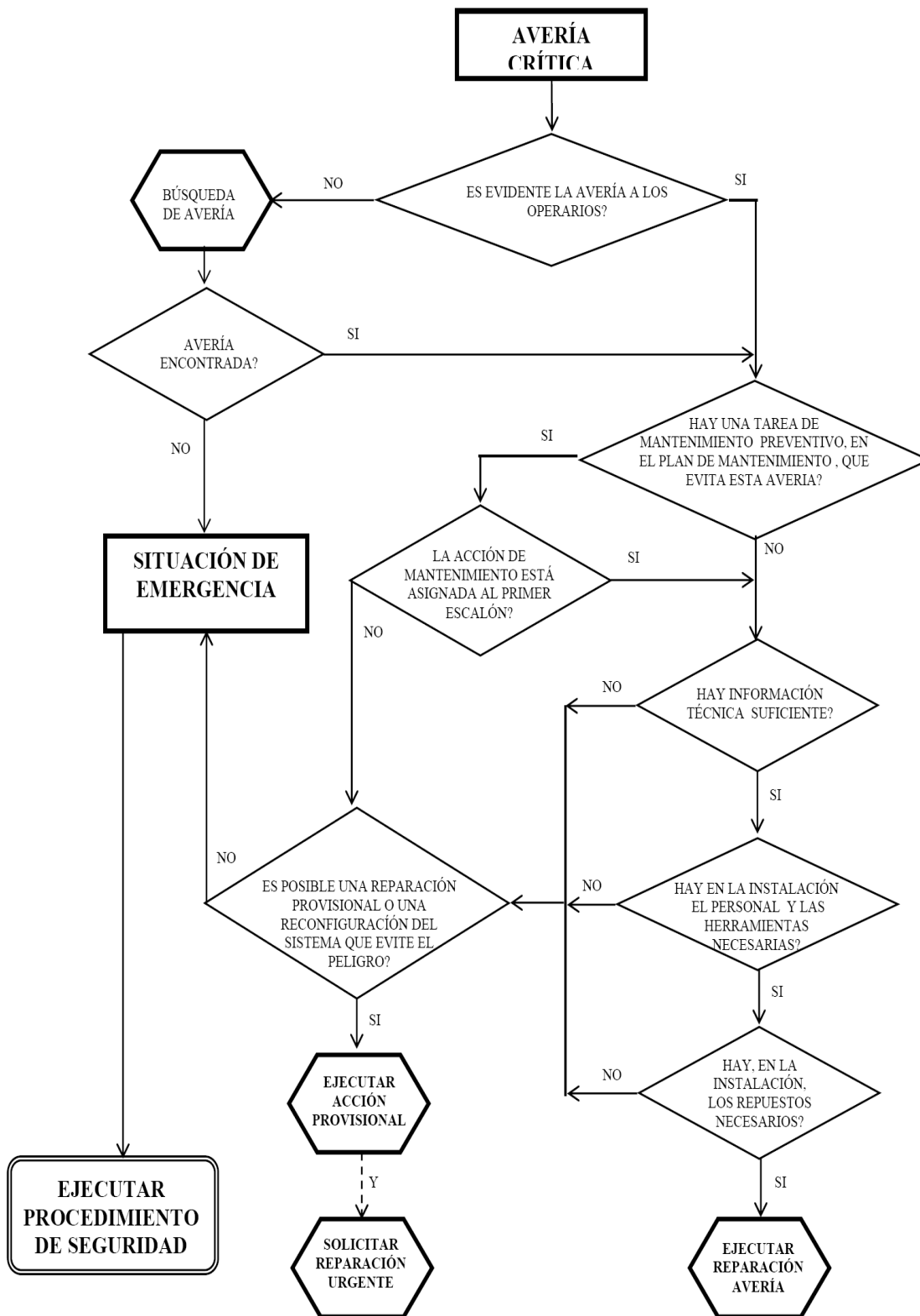
1. Situación Anómala en el Sistema Productivo



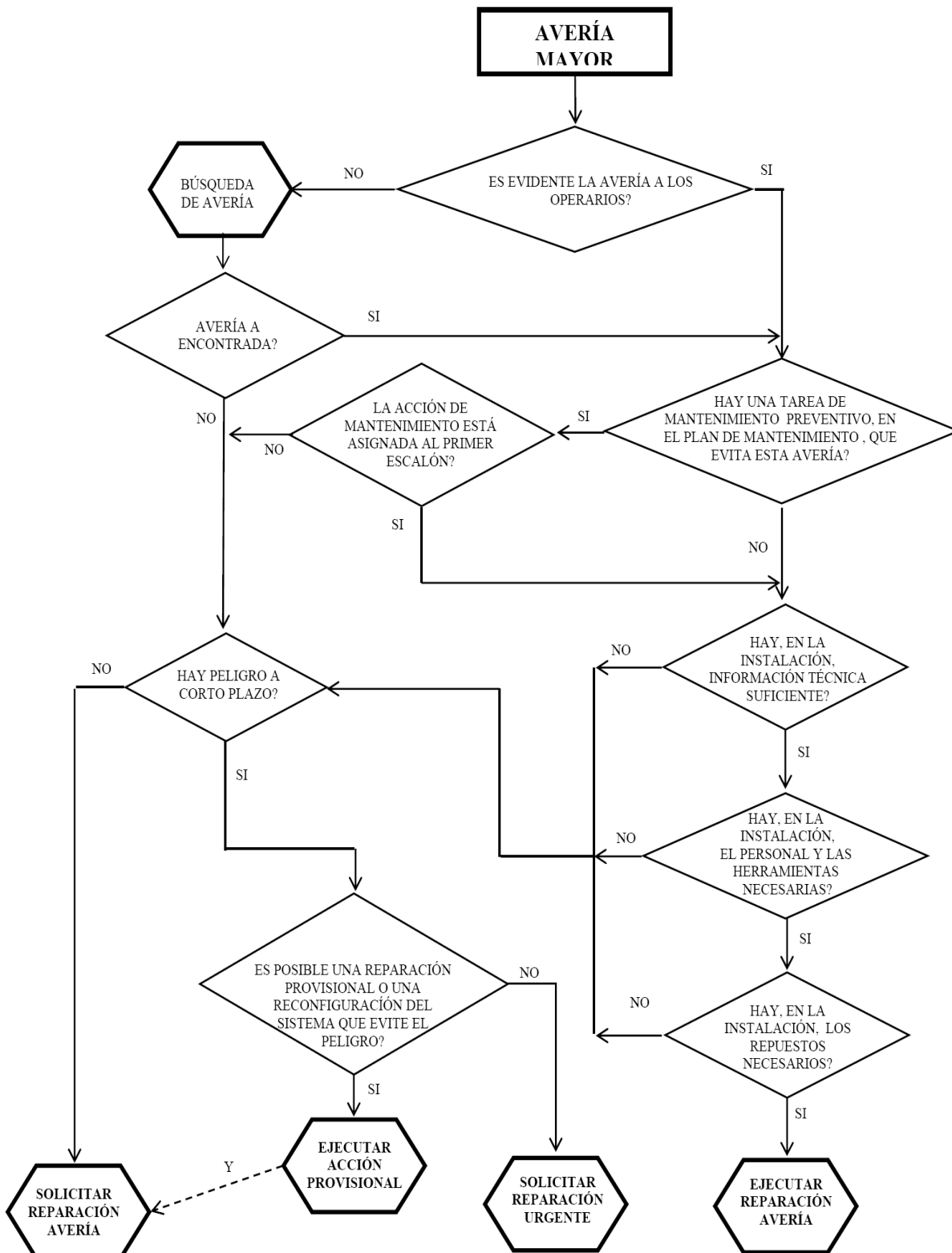
2. Suceso Crítico



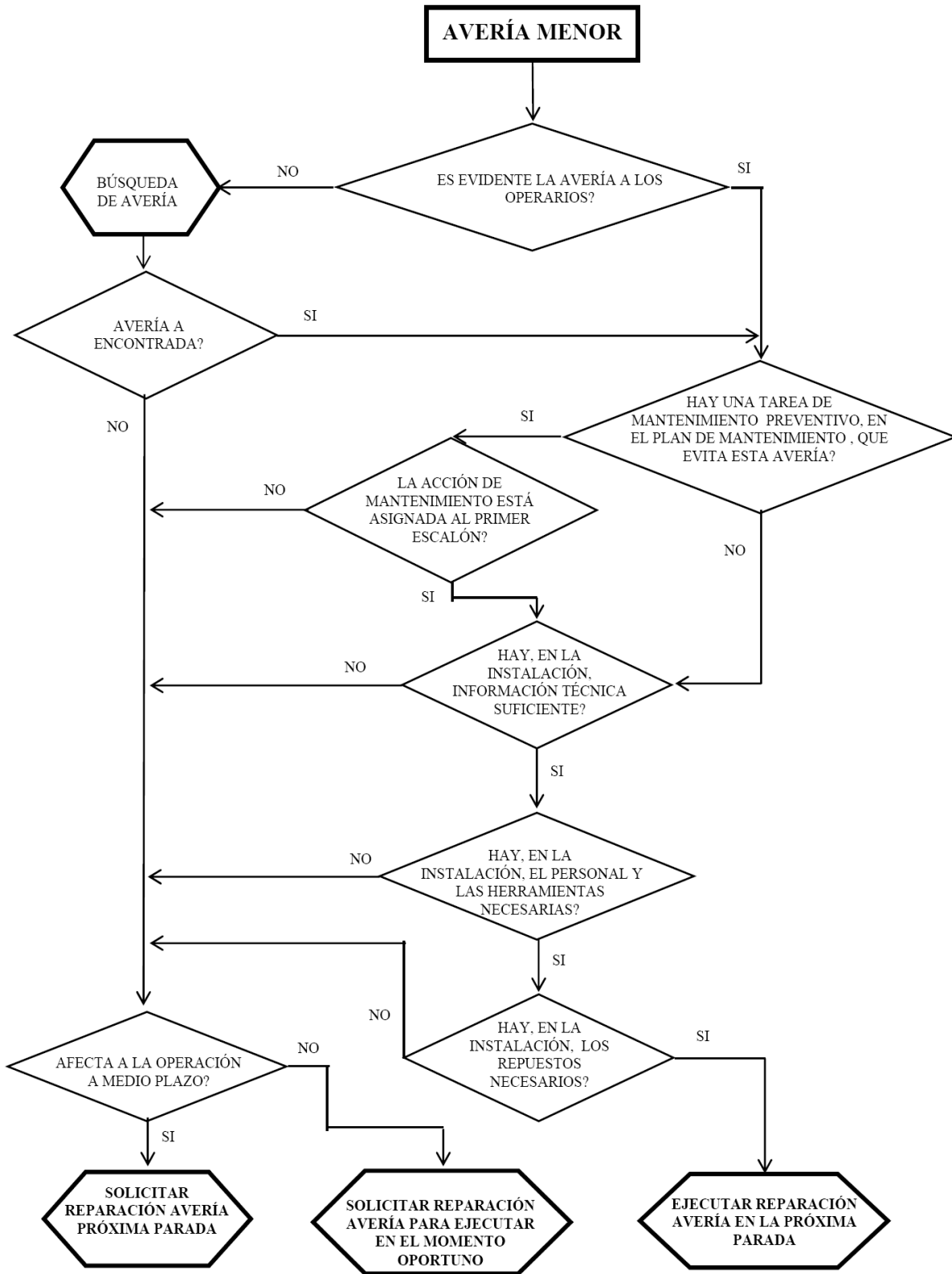
3. Avería Crítica



4. Avería Mayor



5. Avería Menor



DICCIONARIO DE SIGLAS

SIGLAS	ESPAÑOL	INGLÉS
AAL/LSA	Análisis de Apoyo Logístico	Logistic Support Analysis
Ao	Disponibilidad Operativa	Operational Availability
Ai	Disponibilidad Inherente	Inherent Availability
AEC	Árbol de Elementos Configurados	
BPR	Reingeniería	Business Process Reengineering
BS	Estructura Ramificada	Breakdown Structure
Ca	Costes de Adquisición	
CAD	Diseño Asistido por Ordenador	Computer-aided Design
CAE	Ingeniería Asistida por Ordenador	Computer-aided Engineering
CAM	Gestión Asistida por Ordenador	Computer-aided Management
CALS	Adquisición y apoyo continuado durante el ciclo de vida	Continuous Acquisition and Life-Cycle Support
CBS	Estructura Ramificada del Coste	Cost Breakdown Structure
CE	Ingeniería Concurrente	Concurrent Engineering
CIM	Fabricación Integrada por Ordenador	Computer Integrated Manufacturing
CO	Capacidad Operativa	
Co	Costes de operación	
Cm	Costes de mantenimiento	
CSDB	Base de datos fuente Común	Common Source Data Base
Cr	Costes de retirada	
Do	Confiabilidad Operativa	Dependability
DTD	Definición de tipo de Documento	Document Type Definition
EC	Elemento Configurado	
EDI	Intercambio Electrónico de Datos	Electronic Data Interchange
ERP	Planificación de los Recursos de la Empresa	Enterprise Resource Planning
FMECA	Análisis de la Criticidad los Efectos y los Modos de los Fallos	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FTA	Análisis del Árbol de fallos	Fault Tree Analysis
IETM	Manuales Electrónicos Interactivos	Interactive Electronic Technical Manual
I+D	Investigación y Desarrollo	
IDEF	Integration DEFinition language	
IDEF0	Integration Definition For Function Modeling	
ILS	Apoyo Logístico Integrado	Integrated Logistic Support
IT	Tecnologías de Información	Information Technologies
JIT	Justo a Tiempo	Just in Time

LC	Ciclo de Vida	Life Cycle
LCC	Coste del Ciclo de Vida	Life Cycle Cost
LSA/AAL	Análisis de Apoyo Logístico	Logistic Support Analysis
MC	Marca de Clasificación	
MF	Marca Funcional	
MLDT	Tiempo Medio de Retrasos Logísticos	Mean Logistic Delay Time
MTBF	Tiempo Medio Entre Fallos	Mean Time Between Failures
MTTR	Tiempo Medio De Reparación	Mean Time To Repair
MRP; MRPII	Planificación de las Necesidades de Material	Material Requirements Planning
NC	Control Numérico	Numeric Control
PDM	Gestión de Datos del Producto	Product Data Management
QFD	Despliegue de la Función de Calidad	Quality Function Deployment
Ro	Apresto Operativo	Readiness
RL	Retrasos Logísticos	
SE	Eficacia del Sistema	System Effectiveness
SGML	Norma ISO para el Lenguaje Marcado y Generalizado	Standard Generalized Markup Language
STEP	Norma ISO para el Intercambio de Datos del Producto	Standard for Exchange of Product data (ISO 10303)
TAR	Tiempo Activo de Reparación	
TPM	Mantenimiento Total de la Producción	Total Productive Maintenance
TQM	Gestión de la Calidad Total	Total Quality Management
WBS	Estructura Ramificada de Actividades	Work Breakdown Structure

GLOSARIO

DE FIABILIDAD

- **COHERENCIA.** Un sistema de componentes es coherente si: (a) su función de estructura no es decreciente con respecto al vector de estado de los componentes, y (b) cada componente del sistema es relevante.
- **DISPONIBILIDAD.** La disponibilidad (puntual) de un dispositivo es la probabilidad de que funcione en cualquier instante de tiempo.
- **DISPONIBILIDAD LÍMITE.** La disponibilidad límite de un dispositivo es el límite matemático de la función de disponibilidad puntual.
- **DISPONIBILIDAD MEDIA.** La disponibilidad media de un dispositivo a lo largo de un intervalo de tiempo es la integral de la función de disponibilidad en dicho intervalo, normalizada por la longitud del mismo.
- **DISPONIBILIDAD MEDIA LÍMITE.** La disponibilidad media límite de un dispositivo es el límite matemático de la función de disponibilidad media.
- **DISTRIBUCIÓN RESIDUAL DE VIDA.** Esta es la distribución de las vidas residuales de dispositivos de una edad determinada pertenecientes a una muestra dada.
- **FIABILIDAD.** Probabilidad de que un dispositivo funcione de forma adecuada a lo largo del tiempo, cuando se utiliza en el entorno para el que fue diseñado.
- **GARANTÍA PRORRATEADA.** Un compromiso de que en caso de fallo antes de la expiración del período de garantía, el fabricante «pagará» al cliente una parte del precio del producto garantizado, y la proporción a pagar dependerá de la edad del producto en el momento del fallo.
- **GARANTÍA TOTAL DE SUSTITUCIÓN.** La garantía de reparar o sustituir un producto que ha dejado de funcionar (o un componente del producto), para lograr que el producto resultante sea tan bueno como nuevo.
- **ÍNDICE CONSTANTE DE FALLOS.** Una distribución de vida se considera una distribución de índice constante de fallos (CFR) cuando la derivada de su función de riesgo es siempre cero.
- **ÍNDICE CRECIENTE DE FALLOS.** Una distribución de vida se considera una distribución de índice creciente de fallos (IFR) cuando la derivada de su función de riesgo es siempre no negativa.
- **ÍNDICE DECRECIENTE DE FALLOS.** Una distribución de vida se considera una distribución de índice decreciente de fallos (DFR) cuando la derivada de su función de riesgo es siempre no positiva.
- **NUEVA MEJOR QUE USADA.** Una distribución de vida se considera nueva mejor que usada (NBU) cuando la probabilidad condicional de supervivencia de la distribución es menor que la probabilidad inicial de supervivencia, cuando ambas se evalúan a lo largo de un intervalo de duración arbitraria.
- **NUEVA PEOR QUE USADA.** Una distribución de vida se considera nueva peor que usada (NWU) cuando la probabilidad condicional de supervivencia de la distribución es mayor que la probabilidad inicial de supervivencia, cuando ambas se evalúan a lo largo de un intervalo de duración arbitraria.
- **PROCESO DE RENOVACIÓN.** Un proceso de renovación es una secuencia de variables aleatorias no negativas, independientes e idénticamente distribuidas.
- **RELEVANCIA.** Un componente de un sistema se considera irrelevante a la estructura si la función de estructura es constante con respecto al valor de estado del componente. De otro modo, el componente es relevante a la estructura.
- **SISTEMA k-de-n.** Un sistema k-de-n es aquél en que el funcionamiento de k cualesquiera de sus n componentes asegura el funcionamiento adecuado del sistema.
- **SISTEMA PARALELO.** Un sistema en que el funcionamiento adecuado de cualquier componente asegura el funcionamiento del sistema.

- **SISTEMA SERIE.** Un sistema en el que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que el sistema lo haga.

DE MANTENIBILIDAD

- **ANÁLISIS ANTROPOMÉTRICO.** Es el conjunto de actividades realizadas para identificar los requisitos de configuración y localización de los componentes de un sistema, a fin de proporcionar suficiente accesibilidad y espacio de trabajo al personal de mantenimiento.
- **ANÁLISIS DEL NIVEL DE REPARACIÓN.** Es la evaluación económica de los métodos alternativos de apoyo de un determinado elemento/sistema, con los correspondientes recursos necesarios para realizar las tareas de mantenimiento.
- **ASIGNACIÓN DE MANTENIBILIDAD.** Es el proceso por el que se descomponen y distribuyen los requisitos del sistema entre sus componentes, de forma que reunidos, los requisitos asignados cubren los requisitos del sistema global.
- **DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.** Cualquier expresión de función de probabilidad que tenga por dominio un conjunto exhaustivo de sucesos mutuamente excluyentes.
- **EXPERIMENTO.** Un proceso o acción, bien definidos, que produce un resultado simple, bien definido.
- **FIABILIDAD.** La característica inherente de un elemento relativa a su capacidad para mantener la funcionabilidad, cuando se usa como está especificado.
- **FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN, $F(a)$.** Probabilidad de que una variable aleatoria X tome un valor igual o inferior a una cantidad dada a .
- **FUNCIÓN DE FALLO, $F(t)$.** Probabilidad de que se produzca un fallo en el tiempo t o antes.
- **FUNCIÓN DE FIABILIDAD, $R(t)$.** Probabilidad de que el estado de funcionamiento se mantenga en el tiempo t .
- **FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD.** Es la probabilidad de que se complete con éxito una tarea específica de mantenimiento dentro de un tiempo t .
- **FUNCIÓN DE PROBABILIDAD.** Una función que asocia a cada suceso A un número real $P(A)$, la probabilidad del suceso A .
- **FUNCIONABILIDAD.** La característica inherente de un producto, relativa a su capacidad de realizar una función especificada, de acuerdo con unos requisitos específicos y bajo una condición operativa especificada.
- **INGENIERÍA DE FIABILIDAD.** Una disciplina científica que estudia los procesos, actividades y factores relativos a la capacidad de un producto para mantener la funcionabilidad a lo largo de su vida operativa, y que establece métodos para su obtención, predicción, evaluación y mejora.
- **MANTENIBILIDAD.** La característica inherente de un elemento, relativa a su capacidad de poder ser recuperado, cuando se lleva a cabo la tarea de mantenimiento especificada, según se requiere.
- **PROCESO DE MANTENIMIENTO.** El conjunto de tareas de mantenimiento llevadas a cabo por el usuario, a fin de mantener la funcionabilidad de un sistema durante su utilización.
- **SISTEMA.** Un conjunto de elementos relacionados mutuamente, con objetivos comunes.
- **SISTEMA DE INGENIERÍA.** Un conjunto de componentes, dispuesto de tal forma que realice una función específica.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO.** Es el conjunto de las actividades que deben realizarse por el usuario para mantener la funcionabilidad del elemento.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO CONDICIONAL.** Se realiza con la intención de conseguir visión de la condición del elemento/ sistema, para determinar el curso de las acciones posteriores.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO COMBINADO.** Representa un conjunto de actividades de mantenimiento, algunas de las cuales se realizan en secuencia y algunas simultáneamente.

- **TAREA DE MANTENIMIENTO COMPLEJO.** Un conjunto de actividades de mantenimiento realizadas simultánea y secuencialmente, todas las cuales deben completarse para finalizar la tarea.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.** Se realizan con la intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.** Se realiza para reducir la probabilidad de fallo o maximizar el beneficio operativo.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO SECUENCIAL.** Representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente dependientes, realizándose todas ellas en un orden predeterminado.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO SIMULTÁNEO.** Representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente independientes, realizándose todas ellas concurrentemente.
- **TASA DE FALLOS.** La tasa con que se producen fallos en un cierto intervalo (t_1, t_2) .
- **TEORÍA DE LA MANTENIBILIDAD.** Una disciplina científica que estudia las actividades, factores y recursos relativos a la recuperación de la funcionalidad de un producto, mediante la realización de las tareas de mantenimiento especificadas; establece los métodos para la cuantificación, obtención, evaluación, predicción y mejora de esta característica.
- **TIEMPO MEDIO AL FALLO, MTTF.** Esperanza matemática de la variable aleatoria TTF (Tiempo de Fallo), para componentes no reparables.
- **TIEMPO MEDIO DE RECUPERACIÓN.** Valor medio de la variable aleatoria TTR (Tiempo de Recuperación).
- **TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS, MTBF.** Esperanza matemática de la variable aleatoria TTF (Tiempo de Fallo), para componentes reparables.
- **TIEMPO MEDIO ENTRE SUSTITUCIONES NO PROGRAMADAS,**
- **MTBUR.** Esperanza matemática de la variable aleatoria TBUR.
- **TIEMPO TTR_p.** Duración del tiempo de mantenimiento para el que se recupera la funcionalidad de un porcentaje dado de la población.
- **VARIABLE ALEATORIA.** Una función que asigna un número (normalmente un número real) a cada punto del espacio muestral.
- **VARIABLE ALEATORIA CONTINUA.** Variable que puede tomar cualquier valor de un conjunto infinito de valores.
- **VARIABLE ALEATORIA DISCRETA.** Variable que puede tomar solamente valores en un conjunto finito o infinito numerable.

DE MANTENIMIENTO

- **ANÁLISIS ANTROPOMÉTRICO.** Es el conjunto de actividades realizadas para identificar los requisitos de configuración y localización de los componentes de un sistema, a fin de proporcionar suficiente accesibilidad y espacio de trabajo al personal de mantenimiento.
- **ANÁLISIS DEL NIVEL DE REPARACIÓN.** Es la evaluación económica de los métodos alternativos de apoyo de un determinado elemento/sistema, con los correspondientes recursos necesarios para realizar las tareas de mantenimiento.
- **DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.** Cualquier expresión de función de probabilidad que tenga por dominio un conjunto exhaustivo de sucesos mutuamente excluyentes.
- **ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS PARA LA SEGURIDAD.** Aquellos elementos cuyo fallo es probable que tenga efectos peligrosos y que requieren un control especial para conseguir una probabilidad de fallo individual suficientemente baja.
- **ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS PARA LA UTILIDAD.** Aquellos elementos que no son críticos para la seguridad, pero cuyo fallo es probable que tenga efecto sobre la producción de utilidad, requiriendo por tanto un control para lograr los objetivos comerciales.
- **ESTIMADOR ADECUADO DE CONDICIÓN.** Un parámetro observable que describe la condición del elemento en cada instante del tiempo de operación.

- **EXAMEN.** Una tarea específica de mantenimiento condicional cuyo resultado es una descripción numérica de la condición del elemento en ese momento mediante el RCP.
- **FIABILIDAD.** La característica inherente de un elemento relativa a su capacidad para mantener la funcionabilidad, cuando se usa como está especificado.
- **FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN, $F(a)$.** Probabilidad de que una variable aleatoria X tome un valor igual o inferior a una cantidad dada a .
- **FUNCIÓN DE FALLO, $F(t)$.** Probabilidad de que el fallo se produzca en el instante t , o antes.
- **FUNCIÓN DE FIABILIDAD, $R(t)$.** Probabilidad de que el estado de funcionamiento se mantenga en el tiempo t .
- **FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD.** Es la probabilidad de que se complete con éxito una tarea específica de mantenimiento dentro de un tiempo “ t ” especificado.
- **FUNCIÓN DE PROBABILIDAD.** Una función que asocia a cada suceso A un número real $P(A)$, la probabilidad del suceso A .
- **FUNCIONABILIDAD.** La característica inherente de un producto, relativa a su capacidad de realizar una función especificada, de acuerdo con unos requisitos específicos y bajo una condición operativa especificada.
- **INDICADOR ADECUADO DE CONDICIÓN.** Un parámetro observable que indica la condición del elemento o sistema en el instante de la comprobación.
- **INSPECCIÓN.** Una tarea específica de mantenimiento condicional cuyo resultado es un informe sobre la condición del elemento, esto es, si su condición es satisfactoria o insatisfactoria, determinada de acuerdo con el RCI.
- **MANTENIBILIDAD.** La característica inherente de un elemento, relativa a su capacidad de poder ser recuperado, cuando se lleva a cabo la tarea de mantenimiento especificada, según se requiere.
- **POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL FALLO.** Política de mantenimiento fundada en llevar a cabo tareas de mantenimiento correctivo, después de que se ha producido un fallo, para recuperar la funcionabilidad del elemento o sistema considerado.
- **POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN LA VIDA DEL SISTEMA.** Tareas de mantenimiento preventivo ejecutadas a intervalos fijos que son función de la distribución de vida de los elementos considerados.
- **PROCESO DE MANTENIMIENTO.** El conjunto de tareas de mantenimiento llevadas a cabo por el usuario, a fin de mantener la funcionabilidad de un sistema durante su utilización.
- **SISTEMA.** Un conjunto de elementos relacionados mutuamente, con objetivos comunes.
- **SISTEMA DE INGENIERÍA.** Un conjunto de componentes, dispuesto de tal forma que realice una función específica.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO.** Es el conjunto de las actividades que deben realizarse por el usuario para mantener la funcionabilidad del elemento.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO COMBINADO.** Representa un conjunto de actividades de mantenimiento, algunas de las cuales se realizan en secuencia y algunas simultáneamente.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO COMPLEJO.** Un conjunto de actividades de mantenimiento realizadas simultánea y secuencialmente, todas las cuales deben completarse para finalizar la tarea.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO CONDICIONAL.** Se realiza con la intención de conseguir visión de la condición del elemento/sistema, para determinar el curso de las acciones posteriores.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.** Se realizan con la intención de recuperar la funcionabilidad del elemento o sistema.
- **TAREA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.** Se realiza para reducir la probabilidad de fallo o maximizar el beneficio operativo.
- **TASA DE FALLOS.** La tasa con que se producen fallos en un cierto intervalo (t_1, t_2) .
- **TEORÍA DE LA MANTENIBILIDAD.** Una disciplina científica que estudia las actividades, factores y recursos relativos a la recuperación de la funcionabilidad de un producto, mediante la

realización de las tareas de mantenimiento especificadas; establece los métodos para la cuantificación, obtención, evaluación, predicción y mejora de esta característica.

- **TIEMPO TTR_p**. Duración del tiempo de mantenimiento para el que se recupera la funcionalidad de un porcentaje dado de la población.
- **TIEMPO MEDIO DE RECUPERACIÓN**. Valor medio de la variable aleatoria TTR (Tiempo de Recuperación).
- **TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS, MTBF**. Esperanza matemática de la variable aleatoria TTF (Tiempo de Fallo).
TIEMPO MEDIO ENTRE SUSTITUCIONES NO PROGRAMADAS, MTBUR. Esperanza matemática de la variable aleatoria TBUR.
- **TIEMPO MEDIO HASTA EL FALLO, MTTF**. Esperanza matemática de la variable aleatoria TTF (Tiempo de Fallo).
- **VARIABLE ALEATORIA**. Una función que asigna un número (normalmente un número real) a cada punto del espacio muestral.
- **VARIABLE ALEATORIA CONTINUA**. Variable que puede tomar cualquier valor de un conjunto infinito de valores.
- **VARIABLE ALEATORIA DISCRETA**. Variable que puede tomar solamente valores en un conjunto finito o infinito numerable.

APUNTES Y LIBROS DE REFERENCIA PARA ESTE TRABAJO:

- 1. Blanchard, B. S.,** Logistics Engineering and Management, (Prentice Hall Inc., 1974).
- 2. Sols, Alberto.** “FIABILIDAD, MANTENIBILIDAD, EFECTIVIDAD. Un Enfoque Sistémico.
”Colección Ingeniería nº 12 de la Universidad Pontificia de Comillas.
- 3. Boucly, F.** Gestión del Mantenimiento. AENOR
- 4. Jones, J. V.,** Logistics Support Analysis Handbook, (TAB Books, 1989).
- 5. Kelly & Harris.** Gestión del Mantenimiento Industrial. Publicaciones Fundación Repsol.
- 6. Knezevic, J.,** Mantenimiento, Serie de monografías de ingeniería de sistemas, Isdefe, 1996.
- 7. Moubray, Jhon,** Reliability-Centred Maintenance (Butterworth-Heinemann Ltd. 1993).
- 8. TPM para Operadores.** Productivity Press (1994).
- 10. MIL-HDBK 470,** Designing and Developing Maintainable Products and Systems, USA DoD.
- 11. Knezevic, J.,** Mantenibilidad, Serie de monografías de ingeniería de sistemas, Isdefe, 1996.
- 12. Joel A. Nachlas.** Fiabilidad, Serie de monografías de ingeniería de sistemas, Isdefe, 1996

BIBLIOGRAFIA (para aprender más)

- 1. Spiegel, Murray R.**, Estadística (Serie SCHAUM, McGRAW-HILL).
- 2. Al-Najjar, B.:** On the Selection of Condition Based Maintenance for Mechanical System, K. Holmberg & A. Folkesson (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd., Inglaterra, 1991.
- 3. Barlow, R. E. & F. Proschan:** Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Holt, Rhinehart & Winston, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1975.
- 4. Blanchard, B. S. & E. E. Lowery:** Maintainability Principles and Practices, McGraw-Hill Book Co., Nueva York (EE.UU.), 1969.
- 5. Barlow, R.E. and F. Proschan,** Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Holt, Reinhart, & Winston, Inc., Nueva York (USA), 1975.
- 6. Barlow, R. E. and R. Campo,** Total Time on Test Processes and Applications to Failure Data Analysis, in Reliability and Fault Tree Analysis, (R. E. Barlow, J. Fussell, and N. D. Singpurwalla, eds.), SIAM, Philadelphia (USA), 1975.
- 7. Blanchard, B. S., D. Verma & E. L. Peterson:** Maintainability, John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.), 1995
- 8. Billinton, A.:** Reliability Evaluation of Engineering Systems Concept and Techniques, Pitman Books Limited, Londres (Inglaterra), 1983.
- 9. Bland, R. & J. Knezevic:** A Practical Application of a New Method for Condition-based Maintenance, Maintenance Management International, Elsevier, Vol. 7, No. 1,
- 10. Bogdanoff, J. L. & F. Kozin:** Probabilistic Models of Cumulative Damage, John Wiley & Sons, 1985.
- 11. Burwell, J. T.:** Survey of Possible Wear Mechanisms, Wear, 1
- 12. Carter, A. D. S.:** Mechanical Reliability, Macmillan, Londres (Inglaterra), 1972.
- 11. Carter, G. M., J. L. Henshall & R. J. Wakeman:** Influence of surfactants on the mechanical properties and comminution of wet-milled calcite, Powder Technol.
- 13. Catuneanu, V. & A. Mihalache:** Reliability Fundamentals, Elsevier Science Publishing, Inc., 1989.
- 14. Crow, L. H,** Confidence Interval Procedures for the Weibull Process with Applications to Reliability Growth, Technometrics, Vol. 24, 1982.
- 15. Collins, J. A.:** - Failure of Materials in Mechanical Design, second edition, John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.), 1993.
- Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- 16. Collacott, R. A.:** Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring, Chapman and Hall Ltd., 1977.
- 17. Cox, D. R.,** Regression Models and Life Tables, J. Royal Statistics Society, Series B.
- 18. Cunningham, C. E. & W. Cox:** Applied Maintainability Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1972.
- 19. Damask, A. C. and G. J. Dienes,** Point Defects in Metals, Gordon and Breach Science Publishers, Inc., Nueva York (USA), 1963.
- 20. Dekker P.:** Applications of Maintenance Optimisation Models: A Review and Analysis, Report 9228/A, Econometric Institute, Erasmus University, Rotterdam (Holanda).
- 21. Dhillon, B. S. & Chanan Singh:** Engineering Reliability New Techniques and Applications, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- 22. Dreyfuss, H.:** The Measure of Man, Nueva York: Whitney Library of Design, 1967.
- 23. Duane, J. J., Learning Curve Approach to Reliability Modeling,** IEEE Trans. on Aerospace,
- 24. El-Haram, M. & J. Knezevic:**
- The New Developments in Condition Based Approach to Reliability, Proc. 10th International Logistics Congress, Exeter (Inglaterra),

-Practical Application of the Condition-Based Approach to Monitoring Particle Size Distribution, Proc. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM'94, Nueva Delhi (India), septiembre 1994.

25. Esary, J. D., F. Proschan, and D. W. Walkup, Association of Random Variables with Applications, Annals Mathematics Statistics, Vol. 38, 1967, pp. 1466 - 1474.

26. Gertsbakh, I. B. & Kh. B. Kordonskiy: Models of Failure, Springer-Verlag, Nueva York (EE.UU.), 1969.

27. Goldman, A. & T. Slattery: Maintainability, A Major Element of System Effectiveness, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1967.

28. Gumbel, E. J., Statistics of Extremes, Columbia University Press, Nueva York (USA), 1958.

29. Hahn, G. J. & S. Shapiro: Statistical Models in Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1967.

30. Hjorth, U., A Reliability Distribution with Increasing, Decreasing, Constant and Bath-tub-Shaped Failure Rates, Technometrics,

31. Jardine, A. K. S.: Maintenance, Replacement, and Reliability, A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1973.

32. Kapur, K. C. & L. R. Lamberson: Reliability in Engineering Design, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1977.

33. Klefsjo, B., On Aging Properties and Total Time on Test Transforms, Scandinavian Journal of Statistics, Vol. 9, 1982.

34. Knezevic, J.:

- Methodology 'EXETER' for Selecting an Optimal Part- Replacement Policy, Maintenance Management Int., Vol. 5, Elsevier Science Publishers, 1985.

- Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics, Reliability Engineering, Vol. 19, No. 1.

- On the application of a condition parameter based reliability approach to pipeline item maintenance, Proc. 2nd International Conference on Pipes, Pipeline and Pipe Line Items, Utrecht (Holanda), junio 1987.

35. Knezevic, J. & L. Henshall: Estimation of the Design Life for Notched Components Subjected to Creep Cracking Using a Condition Parameter Based Reliability Approach, Proc. Conference 'Materials and Engineering Design', Londres (Inglaterra), 9-13 mayo, 1988.

36. Kolmogorov, A. N.: Foundation of the Theory of Probability, Chelsea Publishing Company, Nueva York (EE.UU.), 1950.

37. Lansdown, A. R. & A. L. Price: Materials to Resist Wear: A Guide to their Selection and Use, Pergamon Press Ltd., 1986.

38. Lomnicki, Z. A., A Note on the Weibull Renewal Process, Biometrika, Vol. 53, 1966.

29. Lydersen, S.: Reliability Testing Based on Deterioration Measurements, Ph. D. Thesis, Trondheim (Noruega), 1988.

39. Lloyd, D. K. and M. Lipow, Reliability: Management, Methods, and Mathematics, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ (USA), 1962.

40. Malik, M. A. K.: Reliable Preventive Maintenance Scheduling, AIIE Trans., Vol. 11, págs. septiembre 1979.

41. Mann, L.: Maintenance Management, Lexington Books, D.C. Heath & Co., Lexington, Massachusetts (EE.UU.), 1976.

42. Mobley, R. K.: An Introduction to Predictive Maintenance, Van Nostrand Reinhold, Nueva York (EE.UU.), 1990.

43. Nachlas, J. A. and A. Kumar, Reliability Estimation Using Doubly Censored Field Data, IEEE Trans. on Rel., Vol. 42.

44. Nakajima, S.:

- Total Productive Maintenance (TPM), Productivity Press, Inc. Cambridge Massachusetts 02140, (EE.UU.), 1988.

- TPM Development Program: Implementing Total productive Maintenance, Productivity Press, Inc., Cambridge, Massachusetts 02140, (EE.UU.), 1989.

45. Neale, M. J.: Trends in Maintenance and Condition Monitoring, Condition Monitoring'87, Proc. International Conference on Condition Monitoring, págs. Swansea (Inglaterra), 1987.

46. Newborough, E. T.: Effective Maintenance Management, McGraw-Hill Book Co., Nueva York (EE.UU.), 1967.

47. Niczyporuk, Z. T.: Role of Technical Diagnostics in Improvements of Safety in Coal Mines, Condition Monitoring'94, Proc. International Conference on Condition Monitoring. Swansea (Inglaterra), 1994.

48. Niebel, B. W.: Engineering Maintenance Management, Marcel Dekker, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1985.

49. Onsoyen, E.: Accelerated Testing and Mechanical Evaluation of Components Exposed to Wear, Ph. D. Thesis, The University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Noruega, diciembre 1990.

50. Parzen, E.: Stochastic Processes, Holden-day, Inc., 1962.

51. Patton, J. D.: Maintainability and Maintenance Management, 2nd Edition, Instrument Society of America, 67 Alexandria Drive, P.O. Box 12277, Research Triangle Park, N.C. 27709, (EE.UU.), 1988.

52. Paulsen, J. L. & K. Lauridsen: Information Flow in a Decision Support System for Maintenance Planning,

Holmberg K. & Folkesson A., (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd., Inglaterra., 1991.

53. Petroski, H.: - Design Paradigms, Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge (Inglaterra), 1994.

- To Engineer is Human, MacMillan, Londres (Inglaterra), 1985.

54. Pludek, V. R.: Design and Corrosion Control, MacMillan Press Ltd., Londres (Inglaterra), 1977

55. Scully, J. C.: The Fundamentals of Corrosion, Pergamon Press, Oxford (Inglaterra), 1990.

56. Sherif, Y. S. & M. L. Smith: Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure - a Review, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 28, 1981.

57. Smiley, Cmdr. W. Robert: Design Review and Field Feedback Trigger System Improvement, Trans. Joint AIAA, SAE, ASME Aerospace Maintainability Conf., Washington, D.C. (EE.UU.), 1963.

58. Standtorv, H. & M. Rausand: RCM-Closing the Loop between Design Reliability and Operational Reliability, Maintenance Journal, Vol. 6, No. 1, marzo 1991.

59. Sternstein, E. & T. Gold: From Takeoff to Landing, Pocket Books, Siomm & Schuster Inc., Nueva York (EE.UU.), 1991.

49. White, M. F.: Experiences from Condition Monitoring of Turbo-Compressors, Condition Monitoring'87, Proc. International Conference on Condition Monitoring, Swansea (Inglaterra), 1987

60. Willmott, P.: Maintenance Engineering in Europe-the Scope for Collaborative Technology Transfer and Joint Venture, Maintenance Journal, Vol. 4, No.4, diciembre 1989.

61. Weibull, W., A Statistical Theory of the Strength of Materials, Proc. Royal Swedish Inst. of Eng. Research, No. 151, Estocolmo (Suecia), 1939.

62. Yan, X. P.: Oil Monitoring Based Condition Maintenance Management, Proc. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management,

63. COMADEM'94, pp. 154-161, Nueva Delhi (India), septiembre 1994.

British Standard BS 3811, Glossary of Maintenance management terms in terotechnology,

British Standards Institution, Londres (Inglaterra).

64. British Standard BS 4778, Glossary of International terms, Section 3.2, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).

65. British Standard BS 5760, Reliability of Systems, Equipment and Components, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).

- 66. DOD Directive 5000.40**, Reliability And Maintainability, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
- 67. IAEA Training Courses Series**, Handbook on Safety Related Maintenance (draft), IAEA, Viena (Austria), 1993.
- 67. US Military Handbook 189**, Reliability Growth Management, National Technical Information Service, Springfield, Virginia (USA), 1981.
- 68. US Military Handbook 217F**, Reliability Prediction of Electronic Equipment, National Technical Information Service, Springfield, Virginia (USA), 1991.
- 68. MIL-HDBK-472, Military Handbook**, Maintainability Prediction, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
- 69. MIL-STD-470B, Military Standard**, Maintainability Program for Systems and Equipment, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
- 70. MIL-STD-471A, Military Standard**, Maintainability Verification, Demonstration, Evaluation, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
- 71. MIL-STD-721C, Military Standard**, Definitions of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human Factors and Safety, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
- 72. MIL-STD-2084, Military Standard**, General Requirements for Maintainability, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
- 73. MIL-STD-2165, Military Standard**, Testability Program for Electronic Systems and Equipments, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).