

COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Sr. D. Martín Aleñar Ginard
Teniente General (R) del Ejército de Tierra

Vocales

Sr. D. Eduardo Avanzini Blanco
General de Brigada Ingeniero del Ejército del Aire

Sr. D. Carlos Casajús Díaz
Vicealmirante Ingeniero de la Armada

Sr. D. Luis García Pascual
Vice-Rector de Investigación y Postgrado de la UPCO

Sr. D. Javier Marín San Andrés
Director General de Navegación Aérea

Sr. D. Ricardo Torrón Durán
General de Brigada Ingeniero del Ejército de Tierra

Sr. D. Alberto Sols Rodríguez-Candela
Ingeniero de Sistemas. Isdefe

Sra. Dña. M^a Fernanda Ruiz de Azcárate Varela
Imagen Corporativa. Isdefe



Isdefe

Ingeniería de Sistemas

c/ Edison, 4
28006 Madrid
Teléfono (34-1) 411 50 11
Fax (34-1) 411 47 03
E-mail: monografias@isdefe.es

P.V.P.: 1.000 Ptas.
(IVA incluido)

Otros títulos publicados:

1. Ingeniería de Sistemas. *Benjamin S. Blanchard.*
2. La Teoría General de Sistemas. *Ángel A. Sarabia.*
3. Dinámica de Sistemas. *Javier Aracil.*
4. Dinámica de Sistemas Aplicada. *Donald R. Drew.*
5. Ingeniería de Sistemas Aplicada. Isdefe.
6. CALS (Adquisición y apoyo continuado durante el ciclo de vida). *Rowland G. Freeman III.*
7. Ingeniería Logística. *Benjamin S. Blanchard.*
8. Fiabilidad. *Joel A. Nachlas.*

9

MANTENIBILIDAD. Jezdimir Knezevic

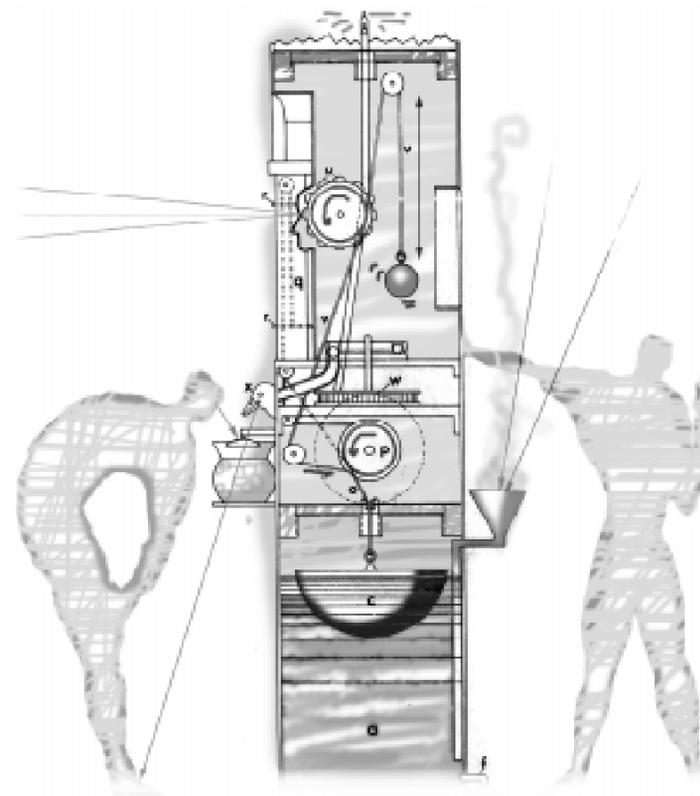


Publicaciones de Ingeniería de Sistemas

MANTENIBILIDAD

por

Jezdimir Knezevic



Isdefe

9



Jezdimir Knezevic

El Dr. Knezevic tiene más de 15 años de experiencia en aplicaciones de fiabilidad, mantenibilidad e ingeniería logística.

Autor de más de 100 publicaciones técnicas y científicas, es profesor de Fiabilidad e Ingeniería Logística de la Escuela de Ingeniería y Director del Centro de Investigación MIRCE (Management of Industrial Reliability and Cost Effectiveness), de la Universidad de Exeter. Fue fundador y presidente del Capítulo de Exeter de la Society of Logistics Engineers, de la que actualmente es Vice-Presidente Internacional para Europa.

Pertenece al Comité Asesor de la International Foundation in Research in Maintenance. Es miembro de la Royal Statistical Society y de la Safety and Reliability Society. Pertenece al Comité Editor del Quality in Maintenance y del Communications in Reliability, Maintainability and Supportability.

ILUSTRACIÓN DE PORTADA
Sección semitransversal del reloj de agua de Pseudo-Arquímedes.

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, por fotocopia, por registro o por otros métodos, sin el previo consentimiento por escrito de los titulares del Copyright.

Primera Edición: Febrero - 1996
1.250 ejemplares

© **Isdefe**

c/ Edison, 4
28006 Madrid.

Diseño y fotomecánica:
HB&h Dirección de arte y producción

Traducción:
Joaquín Teigeiro Tarancón

Infografía de portada:
Salvador Vivas

Impresión:
T. G. Forma, S.A.

ISBN: 84-89338-08-6

Depósito legal: M- -1996

Printed in Spain - Impreso en España.

A Sir Geoffrey Holland

PRÓLOGO

Los principales objetivos de esta monografía son introducir:

- a) Los *conceptos* de mantenibilidad de un sistema.
- b) Las *medidas* que describen dichas características, de forma cuantitativa y cualitativa.
- c) La metodología para la *predicción* de esas características.
- d) La metodología para la *evaluación* cuantitativa de las medidas de esas características, basándose en los datos empíricos disponibles.

Para hacer más fácil la presentación, se asignan significados específicos a determinadas palabras a lo largo de esta monografía. De esta forma, *elemento* se usa como un término genérico para un producto, módulo, subsistema, componente, etc. cuando se analiza como un objeto simple, y *sistema* se usa como un término genérico para productos que se analizan como un conjunto de muchos objetos coherentes. Ello significa que la palabra elemento se utilizará para referirse a un coche, de la misma forma que para un motor, un carburador y una tapa de distribuidor, cuando se trata como un objeto simple. Por otra parte, la palabra sistema se empleará para un coche

cuando se le trate como un conjunto de objetos coherentes, tales como motor, transmisión, chasis, frenos, etc.

En el Capítulo 2 se definen y deducen las medidas que definen cuantitativamente la mantenibilidad de un elemento, junto con un ejemplo numérico explicado con objeto de ilustrar su aplicación práctica.

El Capítulo 3 trata de las metodologías para estimación de las medidas de fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad, basadas en los datos empíricos disponibles.

En los Capítulos 4 y 5 se abordan las relaciones entre la función de promover o rebajar ningún producto, fabricante o usuario.

El Capítulo 6 presenta métodos de predicción de medidas de mantenibilidad, mientras que el Capítulo 7 introduce sus aspectos antropométricos. Por último, el Capítulo 8 establece la conexión entre la mantenibilidad y el mantenimiento de un sistema.

Como ingeniero mecánico que ha pasado más de quince años tratando con fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad, tanto en ingeniería como en análisis, teórica y prácticamente, me complacería que mi experiencia, resumida en esta monografía, pueda ser útil a ingenieros y estudiosos.



J. Knezevic
Exeter, canícula de 1995

AGRADECIMIENTOS

Es un verdadero placer estar en disposición de escribir esta monografía y formar parte de un equipo de expertos reconocidos internacionalmente, reunidos bajo la gran visión del equipo de ISDEFE. En particular, desearía mostrar mi más sincero aprecio por la larga colaboración y apoyo que me ha prestado Alberto Sols, quien hizo posible mi participación en este proyecto.

Agradezco también a todos los estudiantes no graduados, postgraduados y participantes de cursillos de la industria, que han dado forma a través de los años a mi línea de investigación, proporcionándome la necesaria «realimentación» para su continua mejora. Deseo asimismo extender mi sincero agradecimiento a dos de mis alumnos, Peter Hodson, que ha realizado una extensa investigación sobre el Boeing 777, y Mohamed El-Haram, por su contribución a la versión final de los diagramas lógicos. También deseo mostrar mi aprecio a Thelma Filbee, secretaria del Centro de Investigación para la Gestión de Fiabilidad, Coste y Eficacia Industrial, MIRCE, por transcribir e imprimir las distintas versiones de esta monografía, y finalmente acortar sus vacaciones veraniegas para cumplir el plazo fijado.

Ježdimir Knezevic

ÍNDICE GENERAL

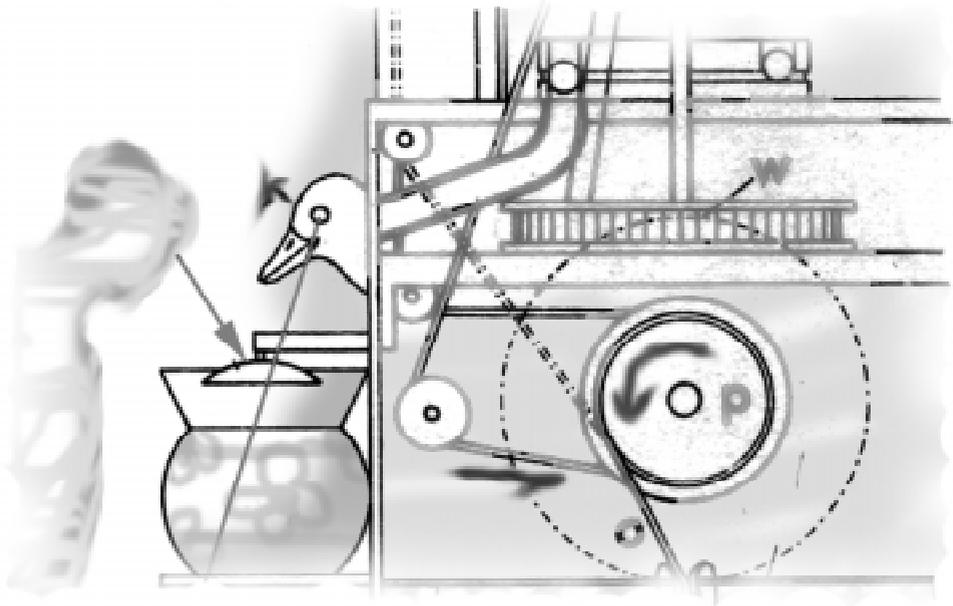
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. El concepto de perfil de funcionabilidad	18
1.2. El proceso de mantenimiento	24
1.3. La importancia de la disponibilidad	27
1.4. La mantenibilidad como determinante de la disponibilidad	28
1.4.1. <i>Prácticas desafortunadas de mantenibilidad</i>	31
1.4.2. <i>Prácticas adecuadas de mantenibilidad</i>	33
1.5. Observaciones finales	42
2. EL CONCEPTO DE MANTENIBILIDAD	45
2.1. La definición de la mantenibilidad	47
2.2. Enfoque de la mantenibilidad basado en el tiempo empleado	48
2.2.1. <i>Medidas de la mantenibilidad</i>	54
2.2.2. <i>Características de mantenibilidad</i>	55
2.2.3. <i>La función de mantenibilidad</i>	57
2.2.4. <i>El tiempo TTR_p</i>	58
2.2.5. <i>El tiempo esperado de recuperación</i>	59
2.2.6. <i>Realización de la recuperación</i>	60
2.3. Factores de horas de mano de obra de mantenimiento	64
2.4. Factores de frecuencia de mantenimiento	65
2.5. Factores de coste de mantenimiento	67
2.6. Otros factores relacionados con el mantenimiento	68
3. DATOS EMPÍRICOS Y MEDIDAS DE LA MANTENIBILIDAD	71
3.1. Posibles métodos de análisis de los datos existentes	73
3.2. Método paramétrico para los datos de mantenibilidad	73
3.3. Método de ajuste de distribución para los datos de mantenibilidad	75
3.3.1. <i>Análisis de los resultados experimentales</i>	76
3.3.2. <i>Método paramétrico</i>	81
3.3.3. <i>Método del ajuste de distribución</i>	84
3.4. Observaciones finales	86

4. LA MANTENIBILIDAD COMO OBJETIVO DEL DISEÑO	89
4.1. El papel de la función de diseño	91
4.2. El papel de la función de mantenibilidad	93
4.3. Adecuación de la función de mantenibilidad	94
4.4. Impacto de los requisitos de mantenibilidad en la ingeniería de diseño	97
4.5. Métodos de diseño para lograr la mantenibilidad	99
4.6. Análisis y revisión de mantenibilidad del diseño	102
4.7. Demostración, informe e investigación de mantenibilidad	108
4.8. Comentarios finales	109
4.9. Estudio de un caso: mantenibilidad del tren TGV	110
5. LA ASIGNACIÓN DE MANTENIBILIDAD	123
5.1. Las técnicas actuales de asignación de mantenibilidad	125
5.1.1. <i>DEF-STAN 00-41 (ediciones 2 y 3)</i>	125
5.1.2. <i>MIL-STD 470B</i>	126
5.1.3. <i>Literatura publicada</i>	127
5.1.4. <i>BRITISH STANDARD 6548</i>	128
5.1.5. <i>Método 1 - diseño nuevo</i>	129
5.1.6. <i>Método 2 - diseño parcialmente nuevo</i>	129
5.1.7. <i>Método 3 - conocimientos previos disponibles</i>	129
5.2. Desventajas de los métodos actuales	130
5.3. Nueva técnica propuesta - programación lineal (PL)	132
5.4. Aplicación de la PL a la asignación de mantenibilidad	132
5.5. Ventajas de usar la PL	133
5.6. Observaciones finales	135
5.7. Ejemplo ilustrativo	135
6. LA PREDICCIÓN DE LAS MEDIDAS DE MANTENIBILIDAD	139
6.1. Diagrama de bloques de la actividad de mantenimiento	142
6.1.1. <i>Mantenimiento simultáneo</i>	143
6.1.2. <i>Mantenimiento secuencial</i>	145
6.1.3. <i>Mantenimiento combinado</i>	146
6.2. Análisis de la tarea de mantenimiento	146
6.3. Medidas de mantenibilidad para tareas de mantenimiento simultáneo	148
6.4. Medidas de mantenibilidad para tareas de mantenimiento secuencial	149
6.5. Medidas de mantenibilidad para tareas de mantenimiento combinado	150
6.6. Ejemplo ilustrativo	150
6.7. Observaciones finales	157

7. LA EVALUACIÓN ANTROPOMÉTRICA DE LA MANTENIBILIDAD	159
7.1. Descripción general	161
7.2. Identificación de la población de usuarios	161
7.3. Identificación de los datos antropométricos del usuario	162
7.4. Evaluación de los planos de ingeniería	164
7.5. Maniqués y superponibles antropométricos	164
7.6. Herramientas del diseño asistido por ordenador	164
7.7. Evaluación en maqueta del sistema	165
7.8. Validación de la evaluación antropométrica	165
7.9. Pruebas operativas de prototipos	166
7.10. Pruebas de demostración y de operación	166
7.11. Aplicación	166
8. LA MANTENIBILIDAD Y EL PROCESO DE MANTENIMIENTO	173
8.1. Clasificación de las tareas de mantenimiento	177
8.2. Mantenimiento centrado en la fiabilidad	178
8.3. Niveles de mantenimiento	182
REFERENCIAS	191
BIBLIOGRAFÍA	195
GLOSARIO	203

1

Introducción



*"Todo lo que la raza humana ha realizado
y pensado está relacionado con la satisfacción
de necesidades y el alivio del dolor."*

A.Einstein

La única característica común entre todos los sistemas creados por el hombre es su capacidad para satisfacer una necesidad, desempeñando una función específica. Consecuentemente, la funcionalidad es la característica más importante de cualquier sistema creado por el hombre y está relacionada con su capacidad inherente para desempeñar una función específica. Por ejemplo, un hervidor es un sistema creado por el hombre, que satisface la necesidad de calentar el agua hasta el punto de ebullición.

No sólo se espera de un sistema dado que realice una función especificada, sino también que satisfaga unos requisitos especificados, especialmente unas prestaciones especificadas. Por tanto, un hervidor que necesita, por ejemplo, 45 minutos para calentar un litro de agua hasta que hierva, no ofrecerá una prestación satisfactoria para ciertos usuarios. La expresión *prestación satisfactoria* es una descripción común para los requisitos que el sistema debe satisfacer, mientras realiza la función especificada. La mayor parte de las veces, los requisitos de prestaciones están relacionados con el tamaño, volumen, forma, capacidad, caudal, velocidad, aceleración y muchas otras

características físicas y operativas. La mayoría son numéricamente cuantificables, pero quedan otros que sólo se pueden describir de forma cualitativa. En cualquier caso, suelen estar bien definidos y requeridos.

Es necesario especificar las *condiciones de operación* bajo las que se supone debe funcionar el sistema. En el caso del hervidor, las condiciones operativas están primordialmente relacionadas con el voltaje de alimentación, vibraciones, humedad y factores similares.

Por consiguiente, para la «satisfacción de las necesidades y el alivio del dolor», se deben reunir los aspectos de *funcionalidad*, *prestaciones* y *condiciones operativas* a fin de obtener una imagen completa del sistema que satisfaga la necesidad. Esto ha sido realizado por Knezevic, introduciendo el concepto de *funcionabilidad* como mecanismo de unión de estos tres aspectos, y definiéndolo como «la capacidad inherente de un elemento/sistema para desempeñar una función requerida con unas prestaciones especificadas, cuando es usado según se especifica [1]».

En la definición anterior, la palabra «inherente» es usada para recalcar que todas las decisiones relacionadas con la funcionabilidad de un sistema están tomadas en la fase de diseño. Por ejemplo, un vehículo motorizado «funcionable» es aquel que desempeña una función de transporte, satisfaciendo unas prestaciones específicas, como velocidad, consumo de combustible y aceite, aceleración, carga (número de pasajeros y equipaje), comodidad y muchas otras características, cuando es utilizado bajo condiciones operativas especificadas (tipo de superficie de rodadura, configuración del terreno, temperatura exterior, octanaje del combustible, etc.). Por supuesto, la lista es mucho mayor y más exhaustiva en la realidad, porque las «necesidades» están más definidas y enfocadas hacia un nivel de precisión superior.

De la definición anterior está claro que hay una diferencia significativa entre funcionalidad y funcionabilidad de un sistema en

consideración. La primera está relacionada puramente con la función desempeñada, mientras que la segunda toma en consideración el nivel de prestaciones obtenido. Por ejemplo, la mayoría de los motores usados consumen más cantidad de combustible que cuando entraron en servicio. Así, aunque los vehículos con motores usados desempeñan aún la función de transporte, el nivel de prestaciones obtenido (consumo de combustible y aceite, velocidad máxima y demás) no está a la altura del nivel de un sistema nuevo.

1.1. El concepto de perfil de funcionabilidad

A pesar de que un sistema sea «funcionable» al comienzo de su vida operativa, todo usuario es completamente consciente de que, independientemente de la perfección del diseño de un sistema o de la tecnología de su producción o de los materiales usados en su fabricación, durante su operación se producirán algunos cambios irreversibles. Estos cambios son resultado de procesos tales como corrosión, abrasión, acumulación de deformaciones, distorsión, sobrecalentamientos, fatiga, difusión de un material en otro, etc. A menudo estos procesos se superponen e interactúan los unos con los otros y causan un cambio en el sistema, como resultado del cual cambiarán sus características de actuación. La desviación de esas características respecto a los valores especificados es considerado un fallo del sistema.

El fallo del sistema puede, por consiguiente, ser definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas, o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados. Independientemente de las razones de su aparición, un fallo causará la transición del sistema desde su estado satisfactorio a un nuevo estado insatisfactorio, conocido como estado de fallo, *SoFa* (State of Failure).

Por tanto, desde el punto de vista de la capacidad para satisfacer las «necesidades» de acuerdo con las especificaciones establecidas,

todos los sistemas creados por el hombre pueden pertenecer a uno de los dos posibles estados:

- Estado de Funcionamiento, *SoFu* (State of Functioning).
- Estado de Fallo, *SoFa* (State of Failure).

Para creaciones humanas como cohetes, satélites, baterías, bombillas, resistencias, fusibles, «chips», etc., una transición al estado de fallo implica su baja. Su perfil funcional puede ser representado como se muestra en la Figura 1. Los sistemas de ingeniería de este tipo son conocidos como no recuperables, simplemente porque es imposible recuperar su capacidad de realizar una función, una vez que ha ocurrido una transición al estado de fallo.

Por contra, existe una multitud de sistemas cuya funcionalidad puede ser recuperada, y son los llamados *sistemas recuperables*. Así, cuando alguien dice que un sistema específico es recuperable, se

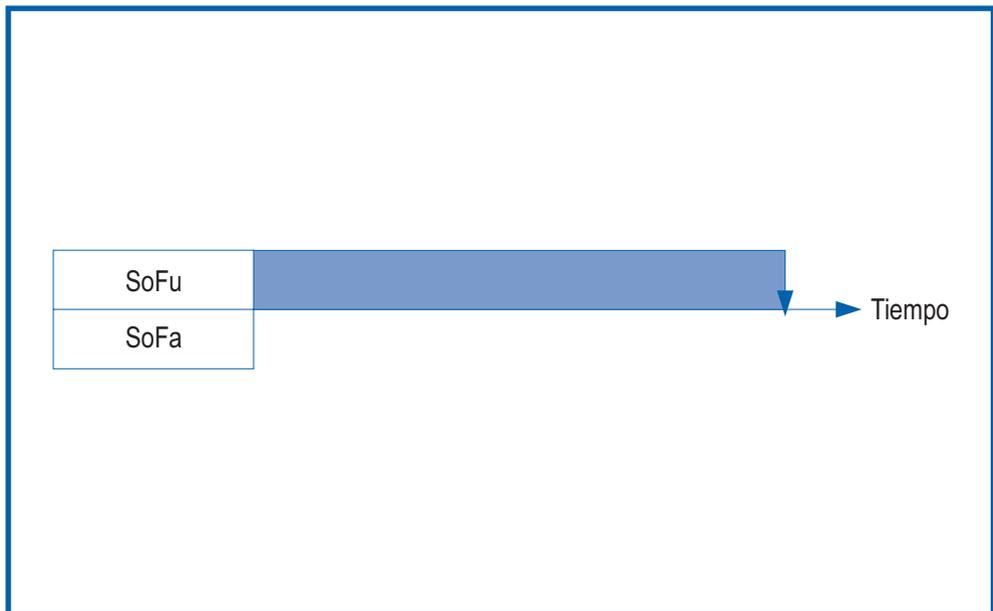


Figura 1 - PERFIL DE FUNCIONABILIDAD
DE UN SISTEMA DE INGENIERÍA NO RECUPERABLE -

entiende que después de haber fallado se puede recuperar su capacidad de realizar una función especificada. Consecuentemente, el término *recuperabilidad* será utilizado para describir la capacidad de un sistema de ser recuperado tras su fallo.

Para que un sistema recupere la capacidad de realizar una función es necesario realizar unas tareas especificadas, conocidas como *tareas de mantenimiento*. Las tareas de recuperación más comunes son limpieza, ajuste, lubricación, pintura, calibración, sustitución, reparación, restauración, renovación, etc.; a menudo es necesario realizar más de una tarea para recuperar la funcionalidad de un sistema. Además de las tareas de mantenimiento requeridas por el fallo durante la operación, un sistema puede requerir tareas adicionales para mantenerlo en estado de funcionamiento. Generalmente, estas tareas son menos complejas que las necesarias para la recuperación de la funcionalidad estando tipificadas por actividades tales como limpieza, ajuste, comprobación e inspección.

Desde el punto de vista de la funcionalidad, un sistema recuperable fluctúa entre *SoFu* y *SoFa* durante su vida operativa hasta su baja, como se muestra en la Figura 2. La configuración establecida se llama *perfil de funcionalidad* porque muestra los estados del sistema durante su proceso de uso [1]. Normalmente se usa el tiempo de calendario como unidad de tiempo operativo en la representación del perfil.

Es extremadamente importante para el usuario del sistema en consideración, tener al principio de su vida operativa información sobre la funcionalidad, coste, seguridad y otras características. Sin embargo, es igualmente importante, si no más, tener información sobre las características que definen la forma de su perfil de funcionalidad, ya que la razón principal para la adquisición de cualquier sistema es la prestación satisfactoria de su función esperada. Simplemente, el sistema es útil cuando, y sólo cuando, realiza la función exigida. Un avión comercial produce ingresos sólo cuando está volando, transpor-

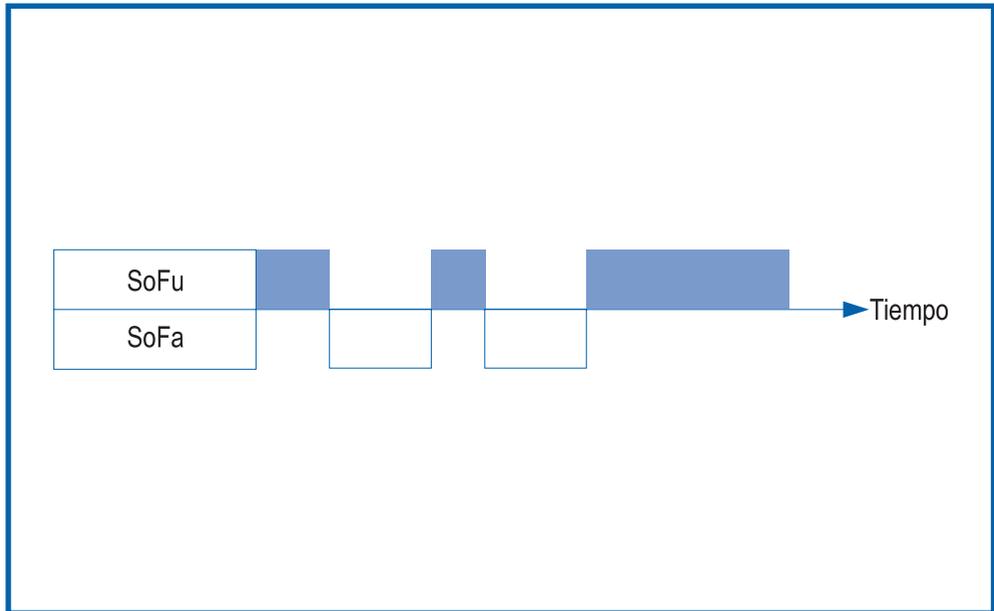


Figura 2 - PERFIL DE FUNCIONABILIDAD
DE UN SISTEMA DE INGENIERÍA RECUPERABLE -

tando a los pasajeros que han pagado su billete hasta su destino. La situación es similar con coches, hervidores, ordenadores, autopistas, puentes, etc. Esta afirmación puede representarse gráficamente como se hace en la Figura 3, donde el signo (+) significa:

- Una fase de ganancia de dinero en todos los sistemas que producen ingresos, como aviones comerciales, trenes, líneas de montaje, taxis, fábricas de helados, etc.
- Una fase de contribución positiva de todos los sistemas públicos y no lucrativos, como autopistas, hospitales, sistemas de armas, semáforos, y similares, que no producen ingresos en un sentido directo, pero ciertamente suministran sentimientos de satisfacción al usuario.

De esta manera, una de las mayores preocupaciones de los usuarios es la forma de su perfil de funcionalidad, con un énfasis

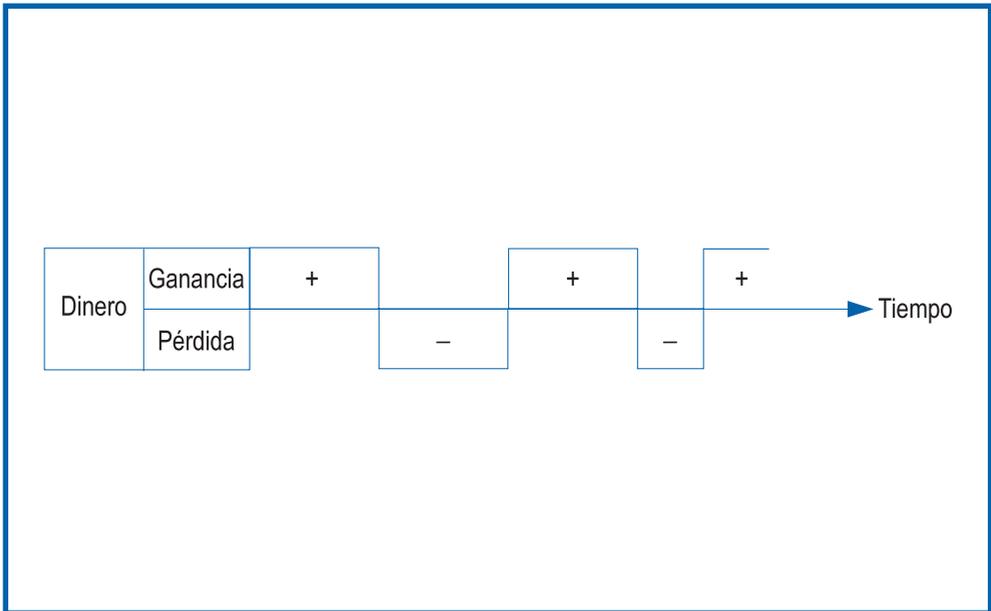


Figura 3 - CONTRIBUCIONES DE UN SISTEMA EN DIFERENTES ESTADOS -

específico en la proporción del tiempo durante el que estará disponible el sistema en consideración para el cumplimiento de la funcionalidad. Claramente, los dos siguientes factores son los principales responsables de su forma específica:

- a) las características inherentes de un sistema, como fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad [1], que determinan directamente la frecuencia de presencia de fallos, la complejidad de las tareas de recuperación y la facilidad del apoyo de las labores exigidas;
- b) la función logística, cuyo objetivo es gestionar el suministro de los recursos necesarios para la conclusión con éxito de todas las tareas operativas y de mantenimiento [2]. El sistema podría permanecer en *SoFa* por un largo período de tiempo, debido a la ausencia de los recursos necesarios, como repuestos, instalaciones adecuadas,

personal cualificado, herramientas especiales y equipos, etc.

Consecuentemente, la proporción de tiempo durante el que el sistema en consideración es funcional, depende de la interacción entre las características inherentes de un sistema desde el diseño, como fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad, y la gestión y ejecución de la función logística, relativa al suministro de los recursos necesarios para el éxito en la operación y el mantenimiento.

Por ejemplo, un rápido vistazo al cuaderno de navegación del primer Boeing 747, propiedad de PanAm, con número de registro N747PA, ilustra claramente la interacción entre los procesos de operación y mantenimiento durante los 22 años de servicio. Así, este avión en particular, ha:

- volado 80.000 horas;
- recorrido 37.000.000 millas;
- transportado 4.000.000 pasajeros;
- realizado 40.000 despegues y aterrizajes; y
- consumido más de 271.000.000 galones de combustible.

Estas son algunas estadísticas relacionadas con el *SoFu*, dirigido bajo el plan comercial de PanAm.

Para cumplir el escenario operativo anterior, entre otros muchos recursos llevados a cabo, el avión ha:

- gastado 21.000 neumáticos;
 - usado 350 sistemas de frenado;
 - incorporado más de 125 motores;
 - sufrido cuatro reposiciones del compartimento de pasajeros y de los lavabos;
 - consumido 806.000 horas-hombre de mantenimiento;
 - sido sometido a inspecciones estructurales por fatiga del metal y corrosión, que han necesitado más de 9800 radiografías; y
-

- sufrido 5 reposiciones de su revestimiento metálico en su estructura, alas y fuselaje.

1.2. El proceso de mantenimiento

Hay multitud de sistemas creados por el hombre cuya funcionalidad debe ser conservada durante su utilización por el usuario. El proceso durante el que se mantiene la capacidad del sistema para realizar una función, es conocida como *proceso de mantenimiento*, y se define como «el conjunto de tareas de mantenimiento realizadas por el usuario para mantener la funcionalidad del sistema durante su utilización».

Cuando se analizan los objetivos de las tareas de mantenimiento realizadas durante un proceso de mantenimiento, es posible clasificarlos de este modo:

- *Reducción de la tasa de cambio de condición*, lo que conduce al alargamiento de la vida operativa del sistema. Ejemplos típicos son: lavado, limpieza, pintura, filtrado, ajuste, lubricación, calibración, etc.
 - *Garantía de la fiabilidad y la seguridad exigidas*, lo que reduce la probabilidad de presencia de fallos. Las actividades más comunes de este tipo son: inspección, detección, exámenes, pruebas.
 - *Provisión de la tasa óptima de consumo* de elementos como combustible, lubricantes, neumáticos, etc., que contribuye al coste-eficacia del proceso de operación.
 - *Recuperación de la funcionalidad* del sistema, una vez que se ha producido la transición al *SoFa*. Las actividades más frecuentemente realizadas para recuperar la funcionalidad son: sustitución, reparación, restauración, renovación, etc.
-

Es necesario hacer hincapié en que se necesitan algunos recursos para facilitar este proceso. Los recursos más frecuentemente usados son: repuestos, material, personal cualificado, herramientas, equipo, manuales, instalaciones, «software», etc. Como el fin principal de estos recursos es facilitar el proceso de mantenimiento, se les designará con el nombre de *recursos de mantenimiento* (Maintenance Resources, MR).

Consecuentemente, el principal interés de un proceso de mantenimiento está en la tarea de mantenimiento, que se podría definir como «un conjunto de actividades que necesitan realizarse por el usuario para conservar la funcionalidad del elemento» [1].

Es necesario fijarse que cada tarea específica requiere un recurso específico para su finalización, y que cada tarea se realiza en un entorno específico, por ejemplo a bordo de un barco, bajo lluvia/nieve, en condiciones de guerra, radiación solar, humedad, temperatura y situaciones similares, cada una de las cuales podría tener un impacto significativo en la seguridad, precisión y facilidad de la finalización de la tarea.

Para ilustrar el concepto de tarea de mantenimiento, se usará un ejemplo simple. Está relacionado con el cambio del conjunto de llanta y neumático de un turismo pequeño. Así, el objetivo de esta tarea es reemplazar una rueda defectuosa por una funcional. La lista de actividades especificadas que deben ser realizadas en secuencia se muestra en la Tabla 1.

La lista de los recursos necesarios para la finalización de la tarea considerada se muestra en la Tabla 2.

Una detallada descripción de todas las tareas de mantenimiento puede encontrarse en el manual de mantenimiento, que es entregado al usuario por el fabricante, al comienzo de la fase de uso del sistema/elemento.

Número de orden	Descripción de la Actividad
1	Sacar rueda de repuesto del maletero
2	Retirar el embellecedor de la rueda
3	Aflojar los cuatro pernos de la rueda montada
4	Colocar y encajar el gato
5	Levantar el coche
6	Quitar los pernos y retirar la rueda
7	Reemplazar la rueda y apretar a mano los pernos
8	Bajar el gato
9	Apretar los cuatro pernos
10	Instalar el embellecedor de la rueda
11	Colocar la rueda sustituida y el gato en el maletero

Tabla 1 - LISTA DE ACTIVIDADES COHERENTES DE MANTENIMIENTO -

TIPO DE RECURSO	RECURSO ESPECÍFICO
Personal	El existente (el conductor, no precisa información)
Material	Rueda de repuesto
Equipo	Gato mecánico
Herramientas	Destornillador, llave fija de 19 mm.
Instalaciones	Las existentes
Datos	Presión del neumático
Información técnica	Manual de usuario
Recursos informáticos	Ninguno

Tabla 2 - LISTA DE RECURSOS PRECISOS -

1.3. La importancia de la disponibilidad

*"Incluso el mecánico más joven
puede mantener un avión en el hangar
si algo no está bien."*

American Airlines

Dado que se espera que el cohete enviado a la Luna llegue a ella, el tren llegue en tiempo fijado, el avión nos lleve al destino planeado, los coches de bomberos estén disponibles cuando se produce un incendio, los enemigos sean detenidos por un sistema de protección cuando se solicite, y que muchos otros sucesos ocurran como esperamos y planeamos, los diseñadores, principalmente de productos aeroespaciales y militares, han sido sometidos por los usuarios en los últimos treinta años a fuertes presiones, para que suministren información sobre la forma esperada del perfil de funcionabilidad, junto con una lista de todos los recursos necesarios para su consecución.

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento. Es una medida extremadamente importante y útil en casos en los que el usuario tiene que tomar decisiones con respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibilidades alternativas. Por ejemplo, ¿qué elemento debe escoger el usuario, si el elemento A tiene medidas de fiabilidad más favorables, el elemento B es superior con respecto a la mantenibilidad, y el C podría recibir el mejor apoyo? Claramente es una tarea muy difícil, porque la información ofrecida está relacionada con características diferentes. Por esto, para tomar una decisión objetiva con respecto a la adquisición del nuevo elemento, es necesario utilizar información que abarque todas las características relacionadas. Así, la disponibilidad es una medida que suministra una imagen más completa sobre el perfil de funcionabilidad.

1.4. La mantenibilidad como determinante de disponibilidad

La mayoría de los usuarios afirman que necesitan la disponibilidad del equipo tanto como la seguridad, porque no se puede tolerar tener un equipo fuera de servicio. Hay varios medios con los que los diseñadores pueden lograrlo. Uno es construir las cosas extremadamente fiables y, consecuentemente, costosas. El segundo es suministrar un sistema que, cuando falle, sea fácil de recuperar. Así, si todo está construido muy fiable y todo es fácil de reparar, el fabricante tiene un sistema muy eficaz, que nadie puede permitirse comprar. Consecuentemente, la pregunta es: ¿cuánto se necesita la utilidad del sistema, y cuánto está dispuesto uno a pagar por ello? Por ejemplo, ¿cuánta necesidad tiene el explotador del tren en ponerlo en marcha, cuando 1000 pasajeros que han pagado desean partir a las 6:25 a.m.? Claramente, los pasajeros no están interesados en saber cuál es el problema, o si es un error de los diseñadores, fabricantes, personal de mantenimiento o explotadores. Sólo les importa salir a las 6:25 a.m. para llegar al destino elegido a las 7:30 a.m. Por ello, si surge cualquier problema debe ser resuelto.

Consecuentemente, debe diseñarse para la mantenibilidad, como uno de los factores principales del logro de un alto nivel de disponibilidad operativa.

Otra área a considerar en la mantenibilidad es la localización de averías del sistema dentro del tiempo permitido. Normalmente, este tiempo es, para las compañías aéreas, de sólo una hora, más o menos, entre vuelo y vuelo, antes de su salida hacia su destino. Se precisa un dispositivo fácilmente manejable, para el diagnóstico de todos los diferentes sistemas, a fin de determinar su estado e identificar el elemento que falla. La práctica demuestra que una sustitución innecesaria cuesta prácticamente igual que un fallo real, cuando el componente investigado es desmontado y reemplazado. La disminución de estas situaciones sería un gran reductor de coste. En la industria aeroespacial se han desarrollado dispositivos con esas

características, como resultado de estudios e investigaciones de mantenibilidad.

Por ejemplo, el diseño del Boeing 777 incluye el «Sistema de Mantenimiento a Bordo», con el objetivo de proporcionar a las compañías aéreas un dispositivo de mejor coste-eficacia y tiempo de respuesta, a fin de evitar costosos retrasos a la hora del embarque, así como cancelaciones de vuelos. Para propósitos similares, la División de Control de Vuelo del Laboratorio Wright, USAF, ha desarrollado un sistema de detección/aislamiento de fallos para el avión F-16, que permite al personal de mantenimiento, independientemente de su experiencia, encontrar el componente que ha fallado.

Con las flotas más viejas, tanto el sector comercial como el militar tienen gran necesidad de detectar fácilmente la corrosión. Cuando estos aviones fueron construidos, se diseñaron para un determinado ciclo de vida y sin considerar una prolongación de su vida en servicio. A medida que se aumenta el número de horas de vuelo de un avión, aumenta también la probabilidad de corrosión y fatiga estructural. Una de las tareas potenciales de la investigación de mantenibilidad es el desarrollo de un sistema para detección e identificación de fallos, antes de que provoquen que la seguridad del avión se vuelva crítica.

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. Por ejemplo, podría requerirse al diseñador que sólo se acepten tres tornillos en un determinado panel de separación, para acceder rápidamente a su interior. Sin embargo, este requisito debe contemplarse en un contexto más amplio y puede llegar a plantear la necesidad de un compromiso. Si el componente tras el panel debe comprobarse sólo una vez cada cincuenta y seis años, o, digamos, cada 50.000 millas, no tiene mucho sentido concentrar mucho esfuerzo intelectual y gastar dinero del

proyecto en lograr un acceso rápido. Se podrían tolerar muchos tornillos y conectores, y no disponer de un rápido acceso al componente, pero todo ello tiene que ser sopesado frente al coste y a la eficacia operativa del sistema.

Adicionalmente, los que toman las decisiones deben tener en cuenta el entorno en el que se mueve el personal de mantenimiento. Es mucho más fácil hacer el mantenimiento de un elemento en un banco de trabajo, que en la puerta de embarque, en un ambiente de guerra, en medio de la congestión del tráfico matinal, o en cualquier otro entorno forzado por los resultados a obtener, y con la obligación de respetar un programa. Así, el proceso del compromiso debe tener en cuenta el entorno operativo y la importancia de la consecuencia de que la tarea no sea llevada a cabo satisfactoriamente. Según Hessburg, mecánico jefe de nuevos aviones de Boeing, «los gestores de mantenimiento quieren tener la puerta de embarque despejada; su programa de trabajos de la línea de mantenimiento debe basarse en una puerta de embarque despejada y en no dar lugar a que se posen los pájaros en los planos de los aviones. Es necesario, pues, intentar influir en el diseño en esa dirección, y decir, ‘esto es lo que los mecánicos tienen que hacer cuando el avión está en la puerta de embarque’».

Actualmente, la mayoría de los usuarios se preocupan en la ventaja competitiva que la mantenibilidad y el mantenimiento pueden proporcionar a una compañía. Para ilustrar la importancia económica del mantenimiento, un estudio reciente de prácticas de ingeniería de mantenimiento demostró que:

- Los compañías aéreas de los Estados Unidos gastaron en mantenimiento 9 mil millones de dólares, aproximadamente el 11 por ciento de su coste de operación.
 - El sector militar muestra incluso más preocupación por el costo de mantenimiento, que se eleva hasta un 30 por ciento del
-

coste del ciclo de vida del sistema de armas. En 1987/88, la Royal Air Force gastó alrededor de 1.900 millones de libras en mantenimiento de aviones y equipos.

- La industria de fabricación británica, según el informe realizado por el Departamento de Comercio e Industria, gasta cada año el 3,7 por ciento del valor anual de ventas en el mantenimiento del sistema de producción directa. Traduciendo este porcentaje a dinero gastado en mantenimiento por la industria del Reino Unido, la cuantía se eleva a 8.000 millones de libras en el año 1988.

1.4.1. Prácticas desafortunadas de mantenibilidad

Se citan aquí varios ejemplos de la vida real, para ilustrar algunas decisiones desafortunadas de mantenibilidad tomadas en el pasado, que han causado problemas considerables a los usuarios.

EJEMPLO 1. El sistema de arranque de motor en el avión Hunter. Al ser una característica operativa primordial el arranque rápido del motor Avon 200, pesado y de gran tamaño, los diseñadores se concentraron en un pequeño arrancador de turbina alimentada por nitrato de iso-propilo. Su alta inercia forzó a la turbina a trabajar en el máximo de sus actuaciones. En caso de sobrevelocidad se podría haber causado daño al motor, lo que ciertamente habría sido catastrófico en el aire. Consecuentemente, se revisó el diseño y se introdujo un sistema de relé para desconectar el ciclo de arranque en caso de que la turbina no se hubiese desembragado a las 1600 rpm. Esta fue una buena decisión de diseño, especialmente desde el punto de vista de seguridad, pero se tomaron poco en cuenta los aspectos de fiabilidad y mantenibilidad. De aquí que, debido a la altísima tasa de fallos del sistema rediseñado, la disponibilidad del avión se redujo drásticamente, especialmente debido al hecho de que no podía ser cambiado «in situ», salvo si el mecánico hubiese tenido «brazos de 3 metros de largo».

Como consecuencia, tenía que retirarse el motor. Desgraciadamente, para conseguirlo debía también retirarse la parte posterior del avión. Para lograrlo, había que desprender los conectores de control de vuelo y del motor. Los resultados finales fueron: 40 horas para cambiar un relé, de las cuales aproximadamente 5 minutos eran los necesarios para el cambio del relé en sí mismo. Además, siempre que era destacado el escuadrón, el personal de mantenimiento debía llevar consigo un voluminoso equipo de apoyo para cumplir la inevitable necesidad de cambiar algunos relés.

EJEMPLO 2. El cambio de motor en el Harrier GR3. Para realizar esta tarea debe desmontarse el ala del avión. Para ello es necesario desconectar un conjunto de sistemas de control. El total de la tarea requiere 24 horas, precisando de un voluminoso y pesado equipo.

EJEMPLO 3. El diario The Times, en fecha 11 de Febrero de 1995, relató la siguiente historia: un lujoso Renault 25 TX, con casi 75000 kilómetros en el cuentakilómetros, había estado prácticamente libre de problemas a lo largo de su vida. Sin embargo, las alarmas sonaban suavemente cuando el calefactor dejaba de funcionar y la aguja de la temperatura no se movía, pero transcurridos unos 10 minutos, se disparaba a la zona roja. El técnico del taller Renault se expresó sombríamente, como un doctor diagnosticando una larga, dolorosa y exótica enfermedad. «La matriz de calefacción se ha estropeado, casi lo peor que podía haber pasado. Es muy raro. ¡Qué mala suerte!». La matriz de calefacción es una pieza rectangular de metal de 30 cm por 15 cm por 5 cm, con forma de pequeño radiador, cuya función principal es suministrar aire caliente para calentar el coche. Se supone que nunca falla, por lo que los fabricantes lo instalan profundamente donde puede quedar sin tocar hasta que se desgace el coche. Sin embargo, su fallo implica problemas y dinero.

El precio de la matriz de calefacción en sí era 57,50 libras. Sin embargo, el coste total de la reparación fue 553,30 libras, incluido IVA.

Esto es debido a que se emplearon 10,5 horas de trabajo en retirar la antigua y colocar la nueva.

En vez de abrir simplemente el capó, desatornillarla y atornillar otra en su lugar, los mecánicos tuvieron que desmantelar virtualmente todo el salpicadero, desmontar la mayoría de sus elementos interiores y por un orificio, al estilo de un cirujano, ingeniárselas para sacar la matriz a través de la guantera. El trabajo duró un par de días durante los que el usuario no pudo usar su vehículo, mientras se llevaba a cabo la operación de cirugía.

La oficina central de Renault en Gran Bretaña confirmó que 10,5 horas era el tiempo de trabajo necesario para reemplazar la matriz en ese modelo en particular. Sin embargo, Renault señaló que en su último modelo, el Laguna, y como resultado de un cambio de diseño, el mismo componente podía ser reemplazado en 1,5 horas. La matriz es accesible ahora a través del motor, en vez de por la guantera.

1.4.2. Prácticas adecuadas de mantenibilidad

Ciertamente, hay muchas más prácticas de mantenibilidad que son adecuadas, donde se han hecho esfuerzos a nivel de diseño con el objetivo de lograr una positiva contribución a la precisión y seguridad de conservación de la funcionalidad del sistema, por parte del usuario.

EJEMPLO 4. Durante el transcurso de la mayoría de las carreras de Fórmula 1, los coches realizan, al menos, una parada en boxes a mitad de carrera para cambiar las ruedas. De vez en cuando, el resultado de esta tarea de mantenimiento determina la diferencia entre un primer y un segundo puesto. Por consiguiente, para reducir al mínimo el tiempo usado en boxes, las ruedas de los coches de Fórmula 1 se diseñan de tal modo que una sola tuerca central proporciona suficiente fuerza para su fijación al eje. En la Tabla 3 se muestran los tiempos típicos de cambio de las cuatro ruedas.

EQUIPO	CONDUCTOR	TIEMPO (seg.)
McLaren	A. Senna	5,11
Benetton	M. Shumacher	5,50
Ligier	M. Brundle	6,75
Williams	D. Hill	7,61
Williams	A. Prost	8,02
Lotus	A. Zanardi	9,21

Tabla 3 - TIEMPOS PARA EL CAMBIO DE NEUMÁTICOS, GRAN PREMIO DE GRAN BRETAÑA 1993 -

Las tareas anteriores requieren quince mecánicos, tres para retirar y poner cada rueda, dos con gatos de elevación rápida, y el mecánico jefe que sujeta un cartel delante del coche con rótulos de «Frenos apretados / Salida». A ellos se puede unir otro mecánico para estabilizar el coche.

La situación es similar con los demás componentes, como muestra la Tabla 4.

EJEMPLO 5. Este ejemplo está relacionado con prácticas de trabajo aplicadas durante la creación del nuevo Boeing 777, y está basado en la comunicación privada del autor con Mr. Eugene Melnick, Ingeniero de Mantenibilidad de Boeing, Seattle.

El avión 777 ha sido diseñado para una vida útil de 20 años. Boeing recomienda, y las autoridades de la FAA y JAA deciden, qué mantenimiento es necesario para conservar el avión en condiciones

Elemento	Motor	Caja de Cambios	Cuatro amortiguadores	Conjunto de pedales, asiento y arnés
Tiempo	60	30	12	10

Tabla 4 - TIEMPO MEDIO DE SUBSTITUCIÓN EN MINUTOS -

de vuelo mientras esté en servicio. Ello implica definir qué mantenimiento programado y no programado, debe ser llevado a cabo para seguir volando. El mantenimiento programado se realiza a intervalos determinados, ligados al número de horas de vuelo, número de ciclos (como encendidos/apagados, despegues y aterrizajes), etc. Consta principalmente de inspecciones, seguidas por acciones de mantenimiento, prevención de corrosión, etc. El mantenimiento no programado se lleva a cabo después de que se ha producido un fallo. Dependiendo de la criticidad del fallo, el mantenimiento se realiza, bien antes de que el avión sea devuelto a su estado de servicio, o bien en un intervalo especificado.

Cuando se considera el coste total a lo largo del ciclo de vida, es evidente que los costes de operación y apoyo del avión pueden exceder el precio de adquisición inicial. A fin de que Boeing consiga que el avión sea atractivo para las compañías aéreas, los ingenieros deben incluir en el diseño ahorros del coste de mantenimiento. Esto se logró

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

La cifra escogida para medir la reducción de los costes posteriores fue la fiabilidad de programación. En otras palabras, ¿cuántas veces cumplirá el avión, o flota de aviones, el tiempo programado de despegue? El objetivo para la entrega inicial es del 97,8% con mejora al 98,8% cuando se alcanza la madurez de la flota. Para que el avión alcance tan elevada cifra, debe ser altamente fiable. Se usa redundancia doble y triple en áreas críticas, permitiendo el aplazamiento del mantenimiento hasta un período nocturno, mientras el sistema de reserva mantiene el avión en vuelo hasta ese momento.

Debe poderse completar el mantenimiento durante los períodos de inmovilización programados, sea durante una inspección de 45 minutos entre vuelos o durante la noche. Esto implica tener buenos medios de identificación y localización de fallos, así como un buen acceso a los equipos. Se emplearon unos innovadores modelos humanos ayudados por ordenador para garantizar un buen acceso de mantenimiento, sin hacer uso de maquetas de alto coste. Se refuerza la identificación y localización de fallos mediante el empleo de equipos de prueba integrados, con mensajes indicadores en las pantallas de ordenador de los mecánicos. Se tuvo mucha precaución para asegurar que los mensajes de mantenimiento estuvieran priorizados, fueran de fácil comprensión, no dieran información errónea y tuvieran la necesaria precisión. Esta información se complementa con los necesarios manuales de aislamiento de fallos y mantenimiento.

Se transmitieron a los fabricantes de equipos los requisitos de fiabilidad, especificando tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures, MTBF) y el objetivo de tiempo medio entre sustituciones no programadas (Mean Time Between Unscheduled Removals, MTBUR). Este último se estimó entre el 0,8 y el 0,9 del MTBF, pero sólo pudo ser verificado por la experiencia en servicio. Se reconoció que las sustitu-

ciones no programadas también incluían las veces que el equipo fue sustituido erróneamente como consecuencia de la urgencia con que un mecánico de línea tiene que corregir un fallo durante una revisión de 45 minutos. La tendencia es reemplazar la primera unidad o grupo de unidades sospechosos para eliminar del proceso los fallos obvios. Así, los mensajes de mantenimiento deben dar la información correcta que impida la sustitución de componentes en buen estado. La especificación del MTBF y del MTBUR implica que se pueden controlar la fiabilidad inherente y la fiabilidad de trabajo.

Para sistemas o componentes tolerantes al fallo, el índice de fiabilidad fue el tiempo medio entre alertas de mantenimiento (Mean Time Between Maintenance Alerts, MTBMA). Las alertas de mantenimiento son los mensajes de mantenimiento basados en fallos internos de equipo, que no afectan inmediatamente a la función.

Boeing también documentó datos sobre «lecciones aprendidas» para nutrir el historial de servicio y realimentarse de la experiencia de otros aviones a fin de evitar los mismos errores en el diseño del nuevo avión. Representantes de compañías aéreas asistieron a las revisiones de diseño y otras reuniones pertinentes de los equipos de ingeniería. De cuando en cuando, sus mecánicos de línea visitaban Boeing y aportaban sus experiencias. El resultado fue una relación de trabajo en común que benefició a ambas partes y que implicará un aumento en la fiabilidad y mantenibilidad.

Es necesario señalar que siempre ha existido un Piloto Jefe en cada modelo de Boeing, pero el 777 es el primer modelo de Boeing con un Mecánico Jefe. Esto ilustra ciertamente el reconocimiento de la importancia del proceso de mantenimiento para la acertada operación de una compañía aérea.

EJEMPLO 6. Según Paul Monserie, Ingeniero General Adjunto al Director de Material Móvil de la SNCF, ha existido sinergia entre los especialistas de mantenimiento y los equipos de diseño desde el

comienzo del proyecto TGV, tren de alta velocidad francés. Se adoptó una estructura de proyecto con un grupo multidisciplinario, donde los ingenieros de mantenimiento jugaban un papel importante y oficialmente reconocido. Trabajaban directamente con los ingenieros de diseño del material móvil y les aportaban el beneficio de su experiencia, evitando así problemas y retrasos. En la práctica, los criterios aplicados a la mantenibilidad se seleccionan tras un exhaustivo análisis de los distintos tipos de posibles fallos, incluyendo todos los tipos de operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo necesarias y la forma en que se ejecutan.

En el terreno del mantenimiento preventivo:

- Se diseña un equipo automático de vigilancia para satisfacer la necesidad de examinar e inspeccionar regularmente el material móvil. El equipo de prueba y detección de fallos se diseña para satisfacer la necesidad de restablecer rápidamente la redundancia, en caso de que ocurra un fallo.
 - Los elementos deben estar convenientemente localizados para facilidad de su acceso.
 - Los elementos que utilizan una particular tecnología deben agruparse en unidades funcionales correspondientes a la misma especialidad técnica.
 - Una aproximación modular es una garantía fundamental de facilidad de sustitución; aún más, esto sólo puede alcanzarse si el equipo de interfase está normalizado. El campo de variación de las magnitudes físicas en la entrada y salida de cada módulo asegura que no se requieren más reajustes cuando se incorporan en una unidad de equipo.
 - El desgaste ha sido reducido desde hace algún tiempo lubricando y eliminando elementos mecánicos (engranajes, roda-
-

mientos). Pero, más recientemente, la tecnología de estado sólido ha reemplazado elementos móviles; por ejemplo, se han sustituido ventajosamente funciones electromagnéticas de conmutación y contacto por convertidores electrónicos estáticos indeseables y sin mantenimiento.

- También se tienen en cuenta la facilidad de limpieza y las posibilidades de limpieza mecanizada en el diseño del área de pasajeros, por razones higiénicas, de comodidad y de estética.

Con respecto al mantenimiento correctivo:

- Se han tomado disposiciones para la facilidad de prueba, lo que en la práctica implica la posibilidad de medir la magnitud de los parámetros físicos que son esenciales para la detección de fallos, aunque funcionalmente no sea necesario. De aquí que muchas de las funciones complejas incorporadas en el TGV incluyan instalaciones de prueba integradas o un sistema remoto de detección de fallos; estos sistemas pueden funcionar como sistemas de análisis de fallos e incluyen dispositivos para transmitir datos a centros de reparación.
 - Para tareas de mantenimiento que impliquen la sustitución de componentes averiados, se toman precauciones para garantizar una sustitución rápida y segura (acoplamientos automáticos, ranuras polarizadas, mecanismos de elevación y manejo, etc.).
 - Se ha considerado la capacidad de reparación y renovación de estructuras, esto es, soldabilidad, desmontabilidad de elementos y partes vulnerables a impactos, desgaste y envejecimiento.
 - Selección de materiales y alojamientos, con objeto de eliminar problemas como combustión, oxidación y envejecimiento, que
-

por décadas ha representado la mayor parte del trabajo de reparación y renovación de equipos de ferrocarriles.

Estos criterios para la mantenibilidad han sido aplicados a cada composición de tren como un todo, y, en este particular proyecto, este concepto se conoce por mantenibilidad «de a bordo del tren».

Además, en el Capítulo 4 se dan detalles sobre el análisis de mantenibilidad y las consideraciones de diseño durante la etapa de diseño de este tren.

EJEMPLO 7. Una preparación operativa pre-vuelo completa del avión Grippen para una misión de caza en las Fuerzas Aéreas Suecas, incluyendo reabastecimiento, recarga del cañón, montaje de seis misiles aire-aire y realización de una inspección, puede ser realizada en menos de 10 minutos con un equipo mínimo formado por cinco reclutas bajo la supervisión de un técnico. No se necesitan herramientas para abrir y cerrar los paneles de servicio, que están situados a una altura cómoda para trabajar. Todas las luces, indicadores e interruptores necesarios durante la revisión están localizados en la misma área del avión, junto con las conexiones de combustible y comunicación con el piloto.

1.4.3. Impacto de la mantenibilidad en la seguridad

Por último, la realización de cualquier tarea de mantenimiento está relacionada con un riesgo asociado, tanto en términos de la realización incorrecta de una tarea de mantenimiento específica, como de las consecuencias que la realización de la tarea produce en otro componente del sistema, esto es, la posibilidad de inducir un fallo en el sistema durante el mantenimiento.

EJEMPLO 8. 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 al 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 en condición y hacer funcionar los spoilers tras su desactivación.

EJEMPLO 9. 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.

1.5. Observaciones finales

El principal objetivo de la existencia de cualquier elemento/sistema realizado por el hombre es proporcionar utilidad, mediante la realización de una función requerida. De aquí que, una vez que se proporciona la funcionabilidad, la principal preocupación del usuario es alcanzar la disponibilidad y seguridad más elevadas posibles, con la menor inversión en recursos.

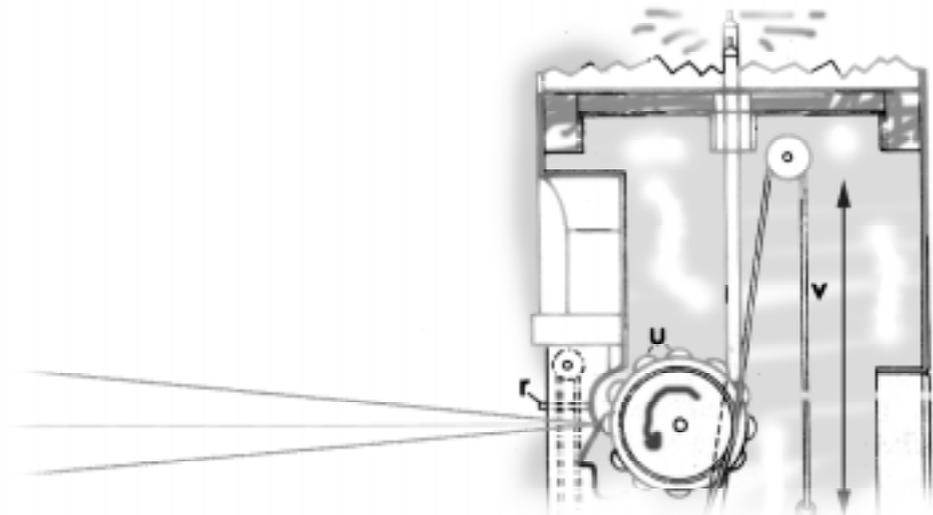
La realización de cualquier tarea está relacionada con unos costes asociados, tanto en términos de coste de recursos de mantenimiento, como de coste de las consecuencias de no tener el sistema disponible para la operación. Por esto, los departamentos de mantenimiento son unos de los centros de mayor coste, requiriendo a la industria miles de millones de pesetas cada año, y de esa forma se han convertido en un factor crítico en la ecuación de rentabilidad de muchas compañías. Por tanto, puesto que las acciones de mantenimiento se vuelven cada vez más costosas, la ingeniería de mantenibilidad gana reconocimiento día tras día.

Está claro del breve análisis anterior sobre el papel e importancia de la mantenibilidad, que ésta representa uno de los determinantes principales de la consecución de los objetivos de los usuarios en lo relativo a disponibilidad, fiabilidad, coste de propiedad, reputación, etc.

Por ello, el principal objetivo de esta monografía es el análisis de los conceptos, herramientas, técnicas y modelos a disposición de los ingenieros de mantenibilidad, para la predicción, evaluación y mejora de sus decisiones respecto a la facilidad, precisión, seguridad y economía de todas las tareas relativas al mantenimiento en estado de funcionalidad de los sistemas durante su uso, lo que directamente influye en el tiempo que el sistema pasará en *SoFa*.

2

El concepto de mantenibilidad



¿Cuánto durará la tarea de mantenimiento? Esta pregunta está directamente relacionada con la parte inferior del perfil de funcionabilidad mostrado en la Figura 4. En la mayoría de los casos, la respuesta a la pregunta anterior no se hallará en lujosos catálogos de propaganda, porque la principal preocupación de los diseñadores es el logro de la funcionabilidad. Históricamente se han ignorado los aspectos de la recuperación, a pesar de que la respuesta depende del diseño.

En la actualidad, la situación está cambiando gradualmente, gracias a los clientes aeroespaciales y militares, que reconocen la importancia de este tipo de información y que la han convertido en una característica tan deseable como las prestaciones y la fiabilidad.

Ya que no había ninguna disciplina científica que pudiera auxiliar a los diseñadores y fabricantes en la respuesta a la pregunta anterior, surgió la necesidad de crear una nueva.

Se creó la ingeniería de mantenibilidad: *una disciplina científica que estudia la complejidad, los factores y los recursos relacionados con las actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionabilidad de un producto, y que elabora métodos para su cuantificación, evaluación, predicción y mejora* [1].

La importancia de la ingeniería de mantenibilidad está creciendo rápidamente, debido a su considerable contribución a la reducción de coste de mantenimiento de un producto durante su uso. Al mismo

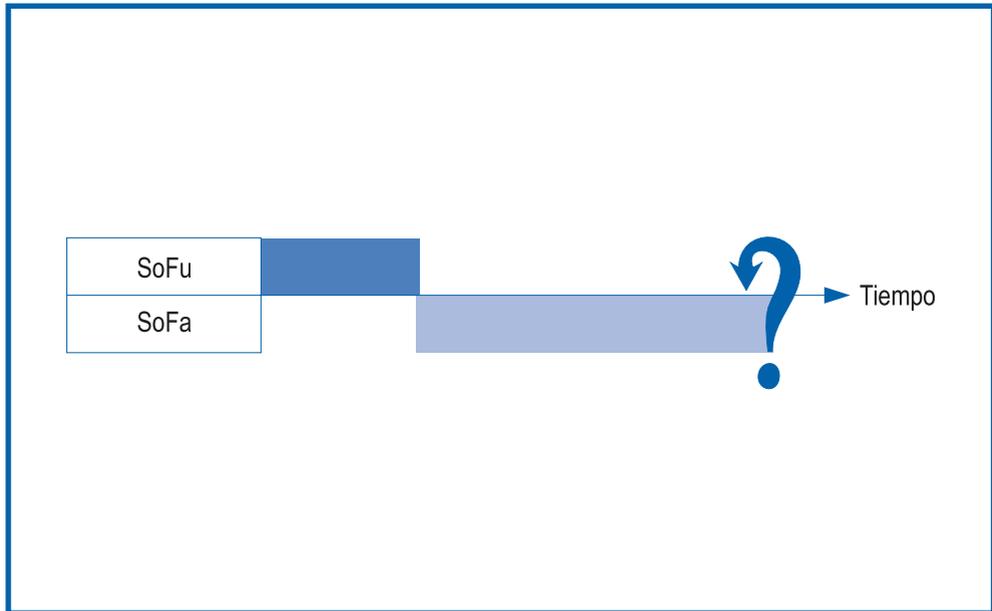


Figura 4 - DURACIÓN INCIERTA DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN -

tiempo, el análisis de mantenibilidad proporciona una potente herramienta a los ingenieros, para la descripción cuantitativa de la capacidad inherente de su producto de ser recuperado para el servicio, mediante la realización de tareas de mantenimiento.

2.1. La definición de la mantenibilidad

En la literatura técnica podemos encontrar varias definiciones de la mantenibilidad. En esta monografía se usa la siguiente:

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 [1].

Para poder usarla en la práctica de ingeniería, la definición anterior de mantenibilidad debe ser expresada numéricamente. De esta

forma, las características cualitativas deben ser «traducidas» en medidas cuantitativas. De acuerdo con Blanchard [2] se puede expresar en términos de factores de frecuencia de mantenimiento, tiempo empleado en mantenimiento y coste de mantenimiento. Estos términos pueden ser presentados como características diferentes; por tanto, la mantenibilidad puede definirse según una combinación de factores como:

- 1) Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada, a lo largo de un período dado del tiempo empleado en el mantenimiento, cuando éste se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos [MIL-STD-721B, DoD, 1966 USA].
- 2) Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que no se necesitará mantenimiento más de x veces en un período dado, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.
- 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.

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. Consecuentemente, será el analizado detalladamente en esta monografía.

2.2. Enfoque de la mantenibilidad basado en el tiempo empleado

Para explicar el significado físico de la mantenibilidad, vamos a establecer el enlace entre una tarea especificada de mantenimiento y el tiempo empleado en su realización. Así, la mantenibilidad puede

representarse gráficamente como muestra la Figura 5, donde T representa el tiempo necesario para la acertada finalización de una tarea especificada de mantenimiento.

La recuperabilidad, aun siendo un valor desconocido, es idéntica para todos los elementos en consideración; por tanto, no hay necesidad de asignarle un valor numérico.

A pesar del hecho de que la Figura 5 representa sólo un intento ilustrativo de definir el significado de mantenibilidad, también sugiere que la capacidad de recuperar la funcionalidad mediante la realización de una tarea especificada de mantenimiento, puede expresarse numéricamente por el área indicada. Esto significa que la mantenibilidad es inversamente proporcional al área considerada, es decir, el elemento con mantenibilidad más deseable cubrirá un área más pequeña, y viceversa. Es necesario hacer hincapié en que el tamaño del área considerada, depende principalmente de las decisiones tomadas

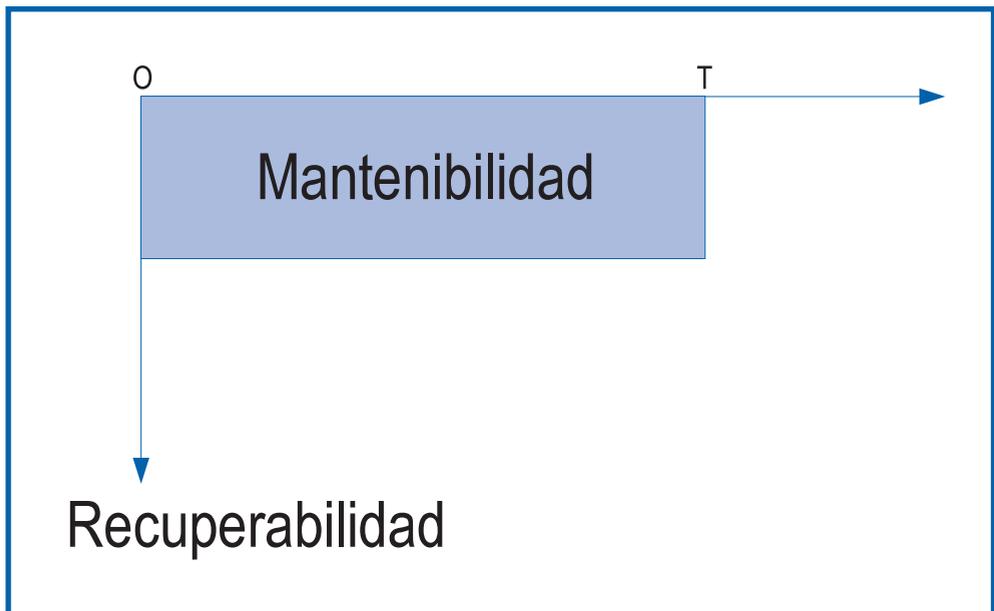


Figura 5 - EL ENFOQUE DE LA MANTENIBILIDAD BASADO EN EL TIEMPO EMPLEADO -

durante la fase de diseño. En cierto modo, el orden de magnitud del tiempo empleado exigido para la recuperación de la funcionabilidad (5 minutos, 5 horas o 2 días), sólo se puede tomar en una etapa muy al inicio del proceso de diseño, por medio de decisiones relacionadas con la complejidad de la tarea de mantenimiento, accesibilidad de los elementos, seguridad de recuperación, facilidad de prueba, localización física del elemento, así como con las relacionadas con los requisitos de los recursos de apoyo del mantenimiento (instalaciones, repuestos, herramientas, personal cualificado, etc.).

Así, la mantenibilidad podría ser expresada cuantitativamente, mediante el tiempo T empleado en realizar la tarea de mantenimiento especificada en el elemento que se considera, con los recursos de apoyo especificados. La pregunta que surge inmediatamente aquí es: *¿cuál es la naturaleza de T ?* En otras palabras, ¿es T constante para cada ejecución de la tarea de mantenimiento considerada, o difiere de un ensayo a otro?

Como lo que físicamente existen son copias del elemento en consideración, la tarea de mantenimiento existe sólo mediante la ejecución física de las actividades que la componen. Por ello, la respuesta dependerá del tiempo empleado en cada ensayo para la recuperación. A pesar del hecho de que cada tarea de mantenimiento se compone de las actividades especificadas, que se realizan en una secuencia especificada, el tiempo empleado en la ejecución de todos ellos puede diferir de un ensayo a otro.

Para ilustrar este punto, en la Tabla 5 se muestra el tiempo empleado en el cambio de una rueda por un grupo de alumnos de segundo año de la Escuela de Ingenieros de la Universidad de Exeter, siguiendo el procedimiento mostrado en la Tabla 1. Diez alumnos realizaron esta tarea individualmente en el mismo coche, siguiendo una lista de actividades especificadas que debían ser realizadas en secuencia. Las herramientas necesarias para la ejecución de esta tarea fueron dispuestas al lado de la rueda a cambiar.

Alumno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo empleado (seg)	230	259	442	286	397	365	332	279	321	351

Tabla 5 - TIEMPOS EMPLEADOS EN LA SUBSTITUCIÓN DE UNA RUEDA -

Al plantear la tarea, se intentó minimizar el efecto de varios factores externos: la tarea fue realizada en un garaje, para alcanzar condiciones ambientales estables; y todos los participantes eran estudiantes de ingeniería; se intentó seleccionar un grupo con una disposición mental similar, minimizando así factores personales.

Sin embargo, las diferencias en el tiempo empleado indican distintos niveles de habilidad, motivación, experiencia y capacidad física.

Hablando en general, si se analiza el tiempo empleado en la recuperación a lo largo de varios ensayos de una tarea de mantenimiento especificada, puede verse que uno de ellos puede ser completado en el instante indicado por b_1 , otro en el instante b_2 y, de la misma forma, el *enésimo* será ejecutado en el instante b_n (ver Figura 6).

La Figura 6 no hace más que confirmar lo que cualquier persona familiarizada con el mantenimiento de elementos de ingeniería ya sabe:

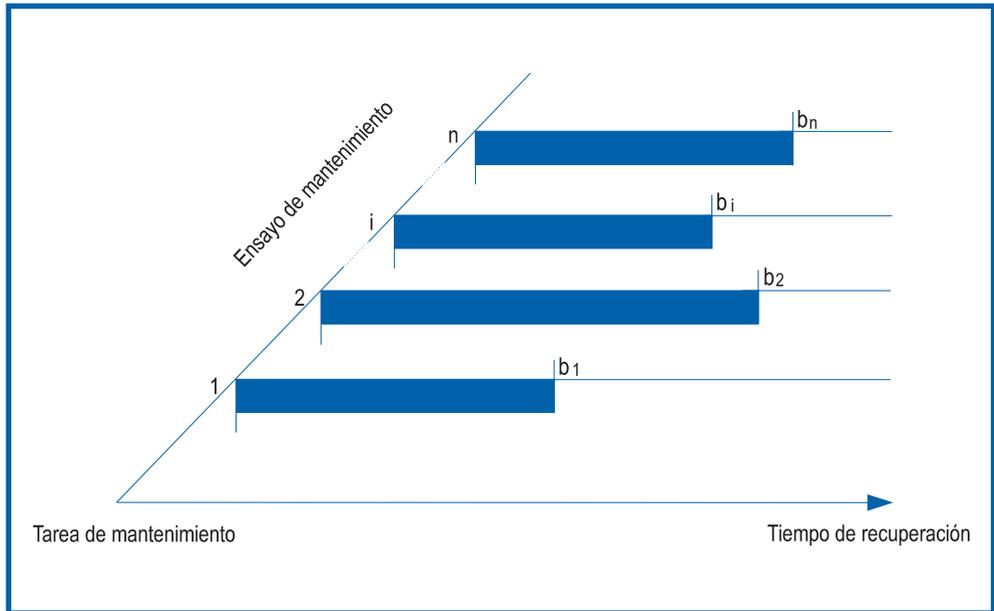


Figura 6 - CONFIGURACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN VARIOS ENSAYOS DE UNA TAREA DE MANTENIMIENTO ESPECÍFICA -

la ejecución de cada ensayo de una tarea de mantenimiento específica se completará tras un diferente intervalo de tiempo empleado. Así, el tiempo empleado en completar cada tarea de mantenimiento es una característica específica de cada ensayo.

La pregunta que, por supuesto, surge es: *¿por qué son necesarios diferentes tiempos para la ejecución de tareas de mantenimiento idénticas?*

Para proporcionar la respuesta a esta pregunta es necesario analizar todos los factores que intervienen. Los tres grupos que se dan a continuación son los más influyentes:

- 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;

- factores *condicionales*, que representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, geometría y forma del elemento en recuperación; y
- *entorno*, que representa la influencia de factores como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, ruido, etc. en el personal de mantenimiento durante la operación de recuperación.

Así, los diferentes tiempos empleados en la ejecución de cada ensayo individual de la tarea de mantenimiento, son el resultado de la influencia de los factores mencionados anteriormente.

Consecuentemente, la naturaleza del parámetro T para la tarea de mantenimiento también depende de la variabilidad de esos parámetros. Por tanto, la relación entre los factores influyentes y el parámetro T podría expresarse por la siguiente ecuación:

$$T = f(\text{factores personales, condicionales y ambientales}) \quad (2.1)$$

Analizando la expresión anterior puede decirse que, como resultado del elevado número de parámetros en cada grupo, por un lado, y de su variabilidad, por otro, es imposible encontrar la regla que describiría de forma determinista esta compleja relación representada por «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 instante de tiempo operativo en que se produce la transición del *SoFa* al *SoFu*, para cualquier ensayo individual de la tarea de mantenimiento en consideración. Sólo 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.

2.2.1. Medidas de la mantenibilidad

Es extremadamente importante para el usuario tener información sobre la funcionabilidad, coste, seguridad y otras características del producto en consideración, al principio de su vida operativa. Sin embargo, es igualmente importante, o incluso más, tener información sobre las características que definen el tiempo de mantenimiento.

Como la principal preocupación del usuario es la forma del perfil de funcionabilidad, se asigna un especial interés a la porción de tiempo durante la que el producto considerado está disponible para la realización de la función.

Por esto, el tiempo durante el que el producto considerado está disponible para su operación, depende de las características inherentes del diseño y de las características relacionadas con la realización de las funciones logísticas.

Las medidas de mantenibilidad están relacionadas con el tiempo que un elemento pasa en *SoFa*. De aquí que la característica que define cuantitativamente la relación entre ellas, debe basarse en el correspondiente tiempo empleado.

El objetivo principal del análisis es definir las medidas mediante las que puede ser descrita y definida la mantenibilidad, ya que la funcionabilidad se expresa numéricamente mediante parámetros conocidos generalmente como prestaciones.

Como ha sido claramente demostrado anteriormente que la tarea de mantenimiento considerada representa un proceso que sólo puede ser descrito en términos probabilísticos, establezcamos la relación entre el concepto de sistema de probabilidad y el concepto de mantenibilidad.

Así, la recuperación de la funcionabilidad de un elemento de ingeniería podría ser considerado como un experimento aleatorio, y la

transición del sistema al estado de funcionamiento 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 Recuperación, (Time To Restore, *TTR*), como muestra la Figura 7. 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 expresarse por diferentes indicadores. Así se establece la completa analogía entre el sistema de probabilidad definido en la teoría de probabilidad y la capacidad de un sistema de ser recuperado [1].

Debe señalarse a estas alturas que, aunque el tiempo es la variable real, frecuentemente puede ser más conveniente usar otras variables fácilmente disponibles que representen el tiempo de uso: días, horas, minutos, etc.

El objetivo de la discusión anterior era introducir el concepto de mantenibilidad y mostrar que tiene una estrecha relación con la probabilidad; en otras palabras, que utilizando el concepto de sistema de probabilidad, la mantenibilidad del sistema o de sus componentes como característica cualitativa, puede ser «traducida» en una medida cuantitativa.

2.2.2. *Características de mantenibilidad*

Puesto que se acepta fácilmente que una población de copias supuestamente idénticas del elemento en consideración, recuperadas bajo condiciones similares, vuelve al estado *SoFu* en diferentes instantes de tiempo, se deduce que un proceso de recuperación sólo puede describirse en términos probabilísticos.

De aquí que la mantenibilidad está completamente definida por la variable aleatoria *TTR* y su distribución de probabilidad, como

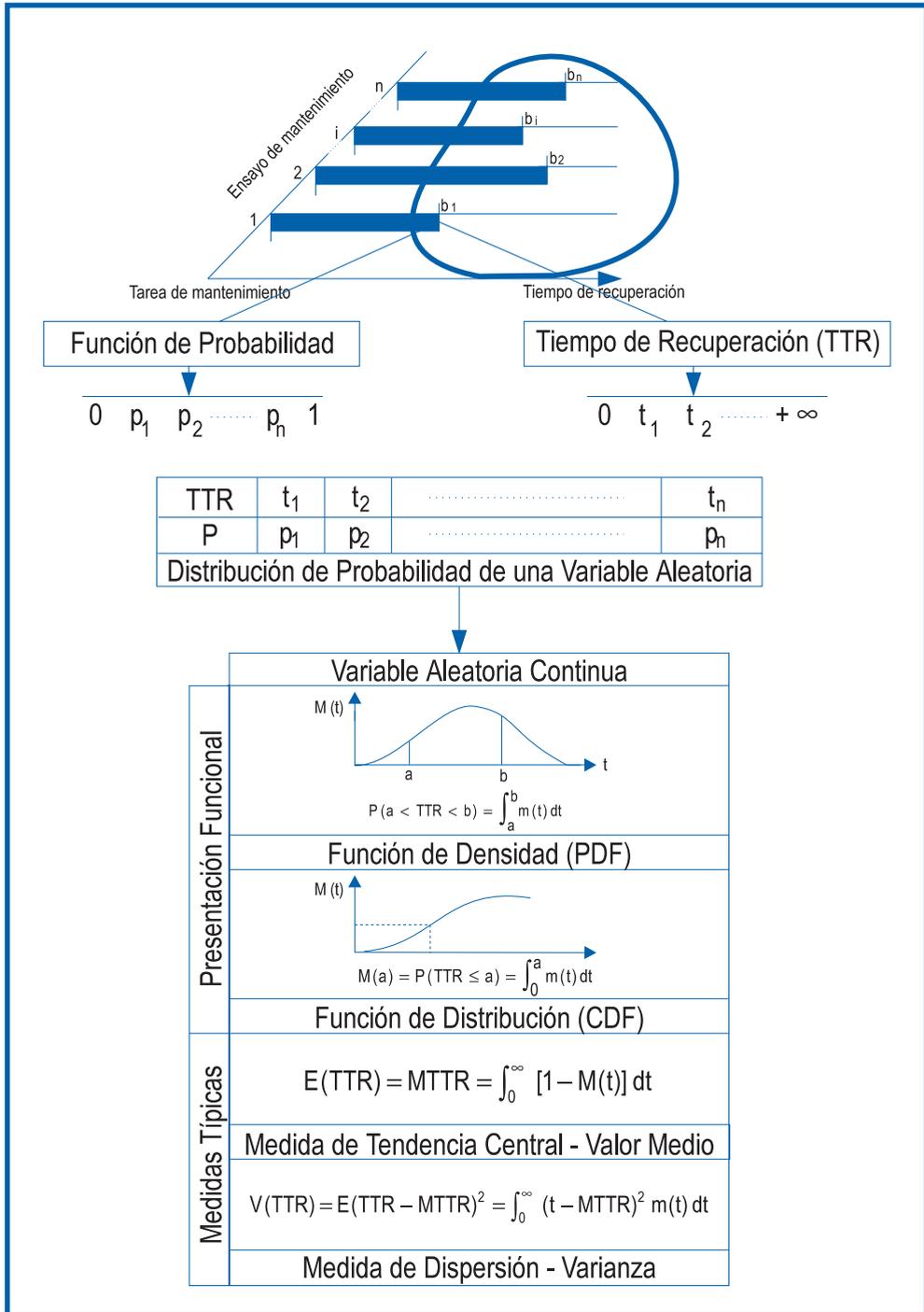


Figura 7 - EL CONCEPTO DE SISTEMA DE PROBABILIDAD APLICADO AL CONCEPTO DE MANTENIBILIDAD -

muestra la Figura 7. Las características de mantenibilidad más frecuentemente usadas son:

1. Función de mantenibilidad.
2. Tiempo porcentual de recuperación.
3. Tiempo medio de recuperación.
4. Realización de la recuperación.

A continuación se facilita una breve definición y descripción de estas características.

2.2.3. *La función de mantenibilidad*

La función de distribución de cualquier variable aleatoria representa la probabilidad de que tenga un valor igual o menor que algún valor particular, a por ejemplo, $F(a) = P(X \leq a)$. En el concepto de mantenibilidad, la función de distribución de la variable aleatoria TTR se llamará Función de Mantenibilidad y se representará por $M(t)$. Indica la probabilidad de que la funcionabilidad del sistema sea recuperada en el momento especificado de mantenimiento, o antes (tiempo empleado t):

$$\begin{aligned}
 M(t) &= P(\text{funcionabilidad sea recuperada en el tiempo } t \text{ o antes}) \\
 &= P(TTR \leq t) \\
 &= \int_0^t m(t) dt
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

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

La Tabla 6 muestra la función de mantenibilidad de varias distribuciones teóricas bien conocidas, donde: A_m , B_m , C_m son los parámetros de escala, forma y origen de la distribución de probabilidad, y Φ es la función normal de Laplace, cuyo valor puede encontrarse fácilmente en la literatura de fiabilidad/mantenibilidad [1].

DISTRIBUCIÓN	EXPRESIÓN	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	$1 - \exp - [(t - C_m)/(A_m - C_m)]^{B_m}$	$t \geq C_m, C_m \geq 0$

Tabla 6 - FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD $M(t)$
PARA DISTRIBUCIONES TEÓRICAS CONOCIDAS -

Hay que señalar que en el caso de distribución normal, la función de probabilidad existe desde $-\infty$, por lo que puede tener un valor significativo en $t=0$. Como en mantenibilidad no tiene sentido hablar de tiempo negativo, debe tenerse mucho cuidado al utilizar este modelo, a menos que $A_m > 3 B_m$, cuando su intersección en $t=0$ puede considerarse despreciable.

2.2.4. El tiempo TTR_p

Es el tiempo empleado en mantenimiento para el que se recuperará la funcionabilidad de un porcentaje dado de una población. Es la abscisa del punto cuya ordenada corresponde a un porcentaje dado de recuperación. Matemáticamente, el tiempo TTR_p puede representarse como:

$$TTR_p = t \rightarrow \text{para el que } M(t) = P(TTR \leq t) = \int_0^t m(t) dt = p \quad (2.3)$$

El más usado es el tiempo TTR_{90} , que representa el tiempo de recuperación en el se completarán el 90 por ciento de los ensayos de mantenimiento, como muestra la Figura 8.

$$TTR_{90} = t \rightarrow \text{para el que } M(t) = P(TTR \leq t) = \int_0^t m(t) dt = 0,9 \quad (2.4)$$

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} [2,3,4]. Así, $M_{max} = TTR_{95}$.

2.2.5. El tiempo esperado de recuperación

La esperanza de la variable aleatoria TTR puede usarse para el cálculo de esta característica de proceso de recuperación:

$$E(TTR) = \int_0^{\infty} t m(t) dt \quad (2.5)$$

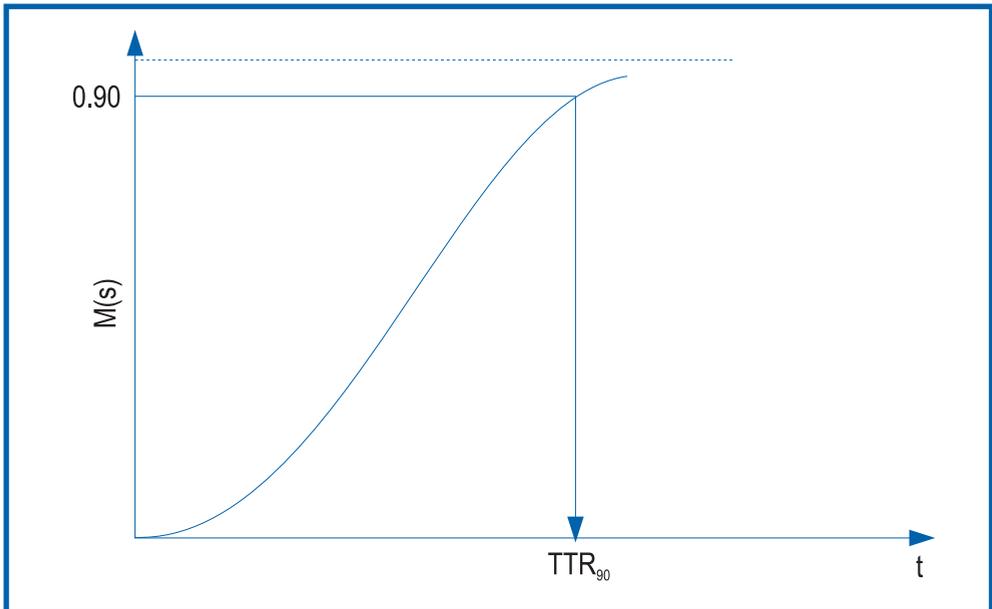


Figura 8 - TIEMPO TTRp -

La característica anterior se conoce también con el nombre de Tiempo Medio de Recuperación (Mean Time To Restore, *MTTR*). También puede escribirse como:

$$E(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (2.6)$$

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

La Tabla 7 muestra el MTTR para distribuciones conocidas, donde Γ es el símbolo de la función Gamma, cuyos valores numéricos pueden hallarse en la literatura de fiabilidad/mantenibilidad [1].

2.2.6. Realización de la recuperación

La función de mantenibilidad, definida por la ecuación (2.1), representa la probabilidad de que la funcionabilidad del elemento

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

Tabla 7 - TIEMPO MEDIO DE RECUPERACIÓN $MTTR = E(TTR)$, PARA DISTRIBUCIONES CONOCIDAS -

considerado sea recuperada en el instante t o antes. En muchos casos de la vida real, es importante conocer la probabilidad de que el elemento que no ha sido recuperado en un tiempo t_1 , sea devuelto al estado *SoFu* antes del tiempo t_2 . Desde el punto de vista de la probabilidad, este problema representa un ejemplo de probabilidad condicional, porque la recuperación puede ser obtenida en t_2 , o antes, no habiéndose producido en t_1 . Este tipo de medida de la mantenibilidad lo llamaremos *realización de la recuperación*, $RS(t_1, t_2)$. Esta medida de la mantenibilidad está completamente definida por la siguiente expresión:

$$RS(t_1, t_2) = P(TTR \leq t_2 \mid TTR > t_1) \quad (2.7)$$

Haciendo uso de la ecuación (2.1), que define la función de mantenibilidad $M(t)$, y aplicando los principios de la probabilidad condicional, la expresión anterior para la realización de la recuperación podría escribirse como:

$$RS(t_1, t_2) = P(TTR \leq t_2 \mid TTR > t_1) = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)} \quad (2.8)$$

Así, la realización de la recuperación es la probabilidad condicional definida completamente por el cociente anterior.

En el caso de que el comienzo del intervalo coincida con el comienzo del proceso de recuperación, $t_1 = 0$, la realización de la recuperación es igual a la función de mantenibilidad en el tiempo t_2 , así:

$$RS(0, t_2) = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)} = M(t_2) \quad (2.9)$$

porque $M(0) = 0$.

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

Por ejemplo, para la tarea de mantenimiento, cuyo tiempo de recuperación podría ser modelizado por la distribución de Weibull con parámetros: $A_m = 29$, $B_m = 2,9$ y $C_m = 0$, determinar: a) la probabilidad de que el sistema será recuperado en 20 minutos; b) el tiempo en el que el 20 % y el 95 % de las tareas serán completadas con éxito; c) el tiempo medio 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 6, la función de mantenibilidad para esta tarea particular está modelizada por la expresión:

$$M(20) = 1 - \exp \left[- \left[\frac{(20 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} \right] = 0,288 \quad (2.10)$$

¿Cuál es la probabilidad de que sea recuperada en 35 minutos?

$$M(35) = 1 - \exp \left[- \left[\frac{(35 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} \right] = 0,82 \quad (2.11)$$

b) El tiempo TTR_p representa el tiempo de recuperación en el cual se completará un porcentaje dado de una tarea de mantenimiento. Para la distribución de Weibull se puede calcular usando la siguiente ecuación:

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

$$TTR_{20} = 29[-\ln(1 - 0,2)]^{1/2,9} = 17,29 \text{ minutos} \quad (2.12)$$

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

c) Tiempo esperado de recuperación.

Esta medida es la esperanza de la variable aleatoria TTR ; también se denomina tiempo medio de recuperación ($MTTR$). Se calcula usando:

$$E(TTR) = MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (2.13)$$

Para la distribución de probabilidad de Weibull, el valor numérico de $E(TTR) = MTTR$, será:

$$E(TTR) = MTTR = 29 \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{2,9}\right) = 29 \times 0,892 = 25,87 \text{ minutos} \quad (2.14)$$

El valor numérico para $\Gamma(1+1/2,9) = 0,892$ se obtuvo de la Tabla T_2 [1].

d) Realización de la recuperación.

La realización de la recuperación viene representada por la probabilidad de que un elemento sea recuperado a su estado de funcionamiento en un tiempo t_2 , no habiéndolo sido en el tiempo t_1 . Esto es un ejemplo de probabilidad condicional que se puede definir usando:

$$RS(t_1, t_2) = P(TTR \leq t_2 \mid TTR > t_1) \quad (2.15)$$

que puede ser finalmente escrito como:

$$RS(t_1, t_2) = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)} \quad (2.16)$$

Un ejemplo lo aclara a continuación.

Dado que el proceso de recuperación no se ha completado en los primeros 29 minutos, ¿cuál es la probabilidad de que se alcance en los próximos 10 minutos?

$$RS(29, 39) = \left[\frac{M(39) - M(29)}{1 - M(29)} \right] \quad (2.17)$$

Así, para la distribución de probabilidad de Weibull:

$$\begin{aligned}
 M(29) &= 1 - \exp \left[- \left[\frac{(29 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} \right] = 1 - 0,3678 = 0,632 \\
 M(39) &= 1 - \exp \left[- \left[\frac{(39 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} \right] = 1 - 0,094 = 0,906
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Por tanto:

$$RS(29, 39) = \frac{0,906 - 0,632}{1 - 0,632} = 0,745 = 73,5\%
 \tag{2.19}$$

lo que significa prácticamente que hay una probabilidad de 0,77 de que la tarea de mantenimiento, que no ha sido completada en los primeros 29 minutos, lo sea durante los restantes 10 minutos.

2.3. Factores de horas de mano de obra de mantenimiento

Las medidas de mantenibilidad vistas hasta ahora, se refieren a los tiempos empleados en el mantenimiento. Aunque los tiempos empleados son extremadamente importantes en la realización del mantenimiento, se deben considerar también las horas de mano de obra invertidas en el proceso. Los tiempos pueden reducirse (en muchos casos) aplicando recursos humanos adicionales en el cumplimiento de tareas específicas. Sin embargo, esto puede resultar una alternativa cara, particularmente cuando se exigen altos niveles de aptitud para realizar tareas que se traduzcan en un menor tiempo global. En otras palabras, la mantenibilidad está relacionada con la *facilidad y economía* en la realización del mantenimiento. Como tal, un objetivo es obtener el equilibrio apropiado entre el tiempo empleado, horas de trabajo y aptitud del personal para un coste de mantenimiento mínimo. Así, deben emplearse algunas medidas adicionales. Según Blanchard [2] se pueden usar las siguientes medidas:

1. Horas de mano de obra de mantenimiento por hora operativa del sistema (MLH/OH).

2. Horas de mano de obra de mantenimiento por ciclo de operación del sistema ($MLH/ciclo$).
3. Horas de mano de obra de mantenimiento por mes (MLH/mes).
4. Horas de mano de obra de mantenimiento por tarea de mantenimiento (MLH/MT).

Cualquiera de estos factores puede especificarse en términos de valores medios. Por ejemplo, MLH_c es la media de horas de mano de obra de mantenimiento correctivo, expresado como [2]:

$$\overline{MLH}_c = \frac{\sum (\lambda_i) (MLH_i)}{\sum \lambda_i} \quad (2.20)$$

donde λ_i es la tasa de fallos del i -ésimo elemento (fallos/hora), y MLH_i la media de horas de mano de obra de mantenimiento necesarias para completar la reparación del i -ésimo elemento.

Adicionalmente, los valores para la media de horas de mano de obra de mantenimiento preventivo y la media total de horas de mano de obra de mantenimiento (incluyendo mantenimiento preventivo y correctivo) pueden ser calculados con una base similar. Estos valores pueden predecirse para cada escalón o nivel de mantenimiento y se emplean para determinar requisitos de apoyo específicos y su coste asociado.

2.4. Factores de frecuencia de mantenimiento

De acuerdo con la discusión anterior, es obvio que fiabilidad y mantenibilidad están estrechamente relacionadas. Los factores de fiabilidad, $MTBF$ y λ , son la base para la determinación de la frecuencia del mantenimiento correctivo. La mantenibilidad maneja las características de diseño del sistema, relativas a la minimización de los

requisitos de mantenimiento correctivo del sistema cuando asuma posteriormente la condición operativa. Así, en esta área, los requisitos de fiabilidad y mantenibilidad para un sistema dado deben ser compatibles y apoyarse recíprocamente.

Además del aspecto de mantenimiento correctivo del apoyo al sistema, la mantenibilidad también maneja las características de diseño que minimizan (si no eliminan) los requisitos de mantenimiento preventivo para ese sistema. A veces se añaden requisitos de mantenimiento preventivo con el objetivo de mejorar la fiabilidad del sistema, (por ejemplo, reducción de fallos mediante la sustitución de determinados componentes en determinados momentos). Sin embargo, la introducción de un mantenimiento preventivo puede resultar muy costoso, si no se controla con precaución. Más aún, el cumplimiento de un exceso de mantenimiento preventivo (particularmente para sistemas/productos complejos) tiene a menudo un efecto degradante en la fiabilidad del sistema, ya que con frecuencia se inducen fallos en el proceso. De ahí que un objetivo de la mantenibilidad sea suministrar el equilibrio adecuado entre mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo, con el menor coste global. Según Blanchard [2] las medidas de mantenibilidad de este tipo más frecuentemente usadas son:

A) **Tiempo medio entre acciones de mantenimiento (Mean Time Between Maintenance, *MTBM*)**. *MTBM* es el tiempo medio entre todas las acciones de mantenimiento (correctivo y preventivo) y se puede calcular como:

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_u} + \frac{1}{MTBM_s}} \quad (2.21)$$

donde $MTBM_u$ es el intervalo medio de mantenimiento no programado (correctivo) y $MTBM_s$ es el intervalo medio de mantenimiento programado (preventivo). Los recíprocos de $MTBM_u$ y $MTBM_s$ constituyen las tasas de mantenimiento, en términos de acciones de mantenimiento por hora de operación del sistema. $MTBM_u$ debería estar próximo a

MTBF, asumiendo que se usa una tasa de fallos que incluye la consideración de fallos inherentes primarios, fallos dependientes, defectos de fabricación, fallos inducidos por el personal de operación y el de mantenimiento, etc. 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 sustituciones (Mean Time Between Replacement, *MTBR*). *MTBR*, un factor de *MTBM*, se refiere al tiempo medio entre sustitución de un elemento y es un parámetro importante para determinar requisitos de repuestos. En muchas ocasiones, se cumplen las acciones de mantenimiento correctivo y preventivo sin establecer el requisito de sustitución de una pieza. En otros casos, se exige la sustitución de elementos, lo que a su vez precisa la disponibilidad de un repuesto y la existencia de un inventario. Adicionalmente, se pueden necesitar niveles superiores de apoyo de mantenimiento (es decir, niveles de mantenimiento de 2º y 3º escalón).

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.

2.5. Factores de coste de mantenimiento

Para muchos sistemas/productos, el coste de mantenimiento constituye un segmento importante del coste total del ciclo de vida. Más aún, la experiencia indica que las decisiones de diseño tomadas durante las etapas iniciales de desarrollo del sistema, afectan significativamente a los costes de mantenimiento. Así, es esencial que el coste total del ciclo de vida sea considerado como un parámetro de diseño importante, empezando desde la definición de los requisitos del sistema.

Es de particular interés en este Capítulo el aspecto de *economía* en la realización de acciones de mantenimiento. En otras palabras, la mantenibilidad está relacionada directamente con las características de diseño del sistema que tendrán como resultado final, la realización del mantenimiento con un coste global mínimo.

Al considerar el coste de mantenimiento, de acuerdo con Blanchard [2], pueden ser apropiados como criterios para el diseño del sistema, los siguientes índices relacionados con el coste:

1. Coste por acción de mantenimiento (\$/acción).
2. Coste de mantenimiento por hora de operación del sistema (\$/H).
3. Coste de mantenimiento por mes (\$/mes).
4. Coste de mantenimiento por misión o segmento de misión (\$/misión).
5. El cociente entre el coste de mantenimiento y el coste total del ciclo de vida.

2.6. Otros factores relacionados con el mantenimiento

Es evidente del análisis del proceso de mantenimiento llevado a cabo en el Capítulo 1, que hay varios factores adicionales que están estrechamente relacionados con las medidas de mantenimiento descritas, de las que dependen considerablemente. Según Blanchard [2] 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.
-

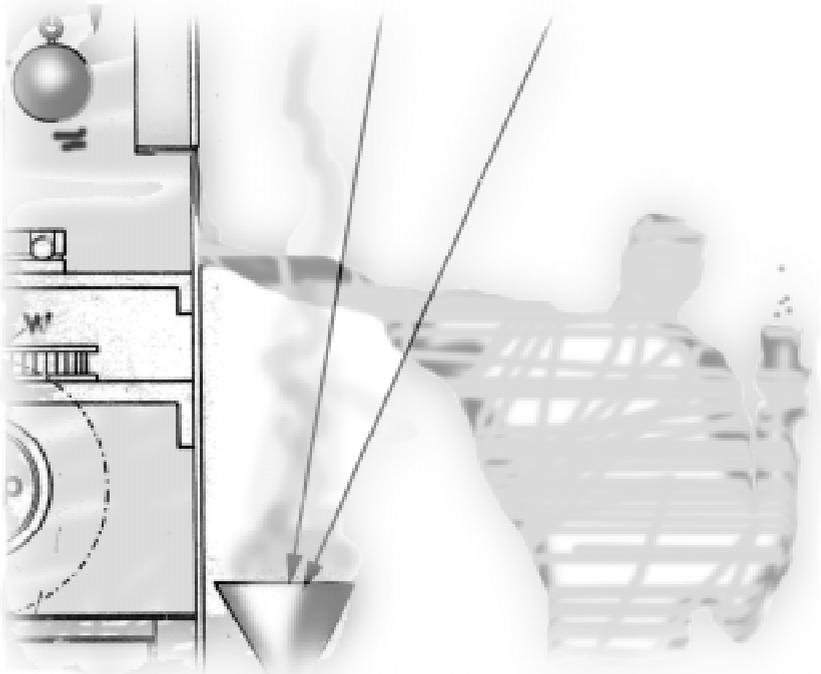
2. Efectividad de equipos de prueba y apoyo, fiabilidad y disponibilidad del equipo de prueba, uso del equipo de prueba, minuciosidad de la prueba del sistema, etc.
3. Disponibilidad y uso de las instalaciones de mantenimiento.
4. Tiempos de transporte entre las instalaciones de mantenimiento.
5. Eficacia 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. Por ejemplo, es muy cuestionable especificar un requisito de 15 minutos de M_{ct} (tiempo medio de mantenimiento correctivo activo) si hay una baja probabilidad de disponer de un repuesto cuando se necesite (resultando en la posibilidad de un largo retraso); podría no ser apropiado especificar requisitos específicos de horas de mano de obra de mantenimiento, si la organización de mantenimiento carece del personal adecuado, o no está disponible para realizar la(s) función(es) exigida(s); puede no ser apropiado especificar requisitos de tiempo de prueba del sistema si la fiabilidad prevista del equipo de pruebas es menor que la fiabilidad del elemento estudiado, etc.

Hay muchos ejemplos donde son críticas las interacciones entre el sistema primario y los elementos de apoyo; ambas áreas deben ser consideradas al establecer los requisitos del sistema durante el diseño conceptual. 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.

3

Datos empíricos y medidas de mantenibilidad



Durante las fases de diseño, adquisición y operación de muchos sistemas o productos, los ingenieros de mantenibilidad realizan un alto número de pruebas y predicciones de mantenibilidad para reunir datos relativos al tiempo necesario para completar la tarea de mantenimiento considerada. Así, el producto final de este esfuerzo es una serie de números, llamados ttr_i , donde $i = 1, \dots, n$, cada uno de los cuales representa el tiempo necesario para completar con éxito la tarea analizada, cuando se realiza según se especifica, como se muestra en la Tabla 5. Estos datos son el punto de partida para la inferencia estadística sobre una o más medidas de mantenibilidad, como la función de mantenibilidad $M(t)$, el tiempo de recuperación porcentual, TTR_p , $TTR_{95} = t = M_{max}$, el tiempo medio de recuperación, $MTTR$, o la realización de la recuperación, $RS(t_1, t_2)$.

Las medidas de mantenibilidad indicadas anteriormente suministran una información muy útil para los ingenieros de diseño, operación y mantenimiento relativa a la planificación de recursos de apoyo logístico (personal, herramientas, equipo, instalaciones, etc.), cuya provisión tiene un gran impacto en el tiempo logístico y consecuentemente en la disponibilidad operativa de un producto o sistema.

El objetivo principal de este Capítulo es presentar un método paramétrico y otro de ajuste de distribución para el análisis de los datos empíricos de mantenibilidad existentes, y comparar su eficacia en la extracción de información de los datos existentes.

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 [1]:

- 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 [2, 3, 5].
- 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.

Se examinarán aquí ambos métodos y se abordarán desde el punto de vista de la ingeniería de mantenibilidad [6].

3.2. Método paramétrico para los datos de mantenibilidad

Siguiendo los principios estadísticos principales de interés para el método paramétrico, basados en el teorema central del límite [2], 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 [2];

$$MTTR^* = \sum_{i=1}^n \frac{ttr_i}{n} \quad (3.1)$$

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 [2]:

$$MTTR^u = MTTR^* + z(\sigma/\sqrt{n}) \quad (3.2)$$

donde: σ representa la desviación típica de los datos empíricos obtenidos, σ/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 [2, 4]:

$$M_{max} = \text{antilog}(\log MTTR^* + 1,65 \times \sigma_{\log(ttr_i)}) \quad (3.3)$$

donde $\sigma_{\log(ttr_i)}$ es la desviación típica del logaritmo de los valores iniciales de ttr_i , para $i = 1, 2, \dots, n$. La expresión para el cálculo de $\sigma_{\log(ttr_i)}$ 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:

- a) la ecuación (3.3), 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; y
- b) 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 [2, 3, 4, 5]; y c) adoptado por muchos clientes/usuarios como principal requisito contractual relativo a temas de mantenibilidad en un gran número de proyectos.

3.3. Método del ajuste de distribución para los datos de mantenibilidad

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 [1, 6]. 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 [1].

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:

- a. Gráfico, donde se usan papeles especiales de probabilidad como herramienta para la inferencia estadística.
 - b. Grafo-analítico, donde se apoya el método gráfico con algunas técnicas analíticas para aumentar la precisión de la inferencia estadística.
-

- c. Analítico, donde se emplea el procedimiento matemático riguroso para suministrar un alto nivel de precisión del proceso de inferencia.

Pueden encontrarse más detalles sobre cada método en [1]. Independientemente del método usado, 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.

Se usará el ejemplo dado en el capítulo anterior (cambio de rueda) para demostrar el procedimiento de determinación de las medidas de mantenibilidad.

3.3.1. *Análisis de los resultados experimentales*

Los datos empíricos disponibles se dan en la segunda columna de la tabla adjunta, junto con los valores correspondientes de la función de mantenibilidad, $M'(t_i)$ (donde $i = 1, 10$), después de ordenar los datos en orden ascendente. Los valores numéricos de $M'(t_i)$ se han determinado de acuerdo con la expresión para el rango mediano (ya que el número total de datos es menor que 50):

$$M'(t_i) = \frac{(1 - 0,3)}{(n + 0,4)} \quad n = 10 \quad (3.4)$$

La Tabla 8 muestra datos empíricos de t_i y los correspondientes $M'(t_i)$. Para determinar las características de mantenibilidad se necesita determinar el parámetro de escala A_m y el parámetro de forma B_m , a partir de la distribución de probabilidad teórica que mejor se ajusta a los datos. Para lograrlo, se representaron gráficamente en el papel de probabilidad de Weibull los datos empíricos relacionados con el tiempo

Alumno i	Tiempo t_i	$M'(t_i)$
1	230	0.0673
2	259	0.1635
3	279	0.2596
4	286	0.3558
5	321	0.4519
6	332	0.5481
7	351	0.6442
8	365	0.7404
9	397	0.8365
10	442	0.9327

Tabla 8 - DATOS EMPÍRICOS PARA t_i Y LOS CORRESPONDIENTES $M'(t_i)$ -

empleado en cambiar la rueda, t_i , y la función de distribución acumulativa, $M'(t_i)$, como muestra la Figura 9.

Como los datos empíricos representados forman una línea recta, se concluye que se puede usar la distribución de Weibull para modelizar los datos obtenidos. Se define el miembro particular de la familia por los siguientes parámetros:

$$A_m = 350, B_m = 3,4$$

Una vez que se han identificado los parámetros de la distribución de Weibull, es posible determinar todas las medidas de mantenibilidad para la tarea de mantenimiento observada.

1. Función de mantenibilidad ($M(t)$) (ver Tabla 6).

$$M(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{A} \right)^B \right] \quad t > 0 \quad (3.5)$$

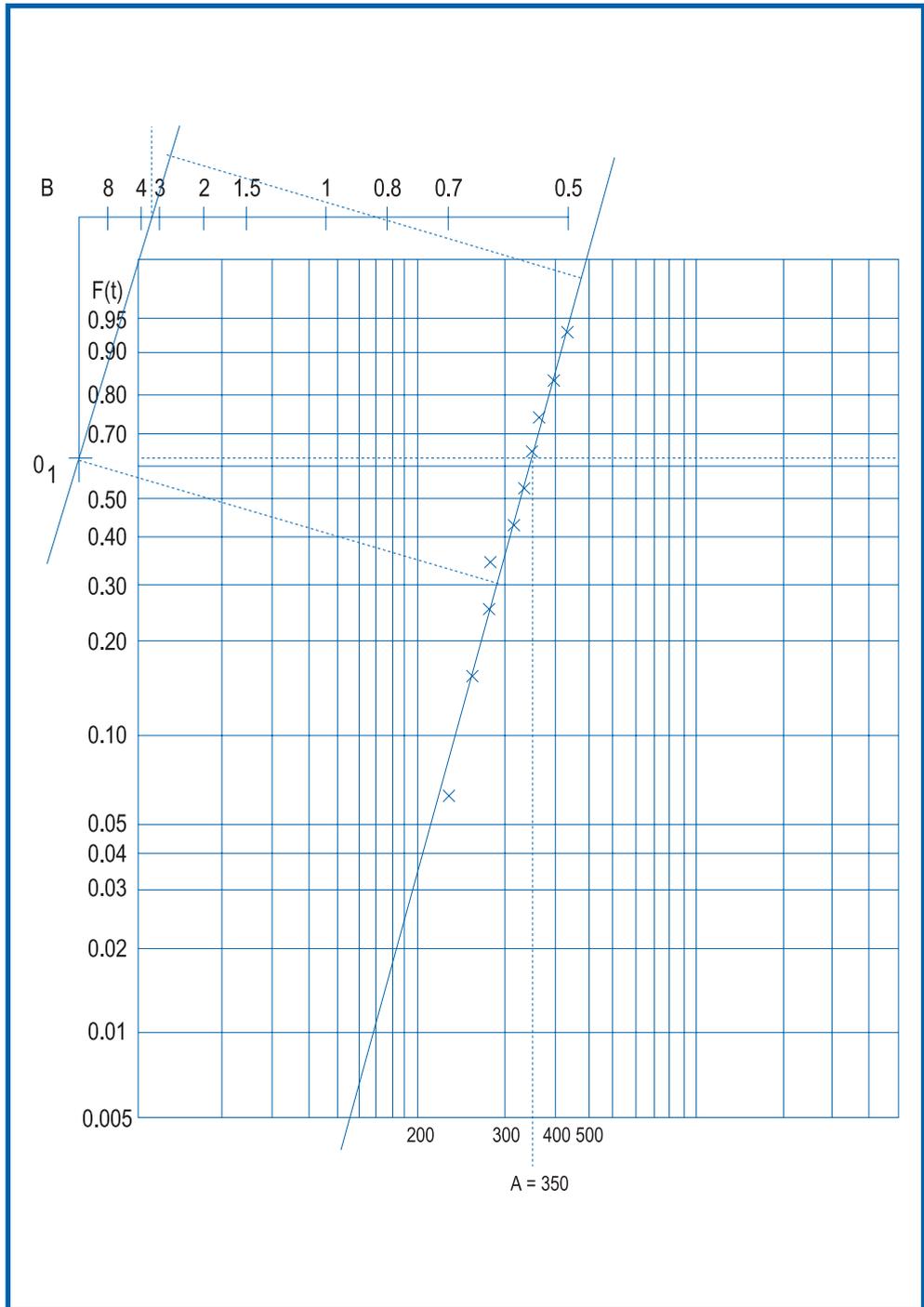


Figura 9 - PAPEL DE PROBABILIDAD DE WEIBULL Y DATOS EMPÍRICOS -

La Figura 10 muestra la representación de $M(t)$. La Tabla 9 muestra diferentes valores de $M(t)$.

2. Porcentaje de Tiempo de Recuperación (TTR_p).

$$t = A[-\ln(1 - M(t))]^{1/B} \quad (3.6)$$

El tiempo de recuperación en el que se ha completado el 10% de las tareas de mantenimiento es:

$$\begin{aligned} TTR_{10} = t & \text{ para } M(t) = 0,1 \\ t & = 350[-\ln(0,9)]^{1/3,4} = 180,56 \text{ seg} \end{aligned} \quad (3.7)$$

El tiempo de recuperación en el que se ha completado el 90% de las tareas de mantenimiento es:

$$\begin{aligned} TTR_{90} = t & \text{ para } M(t) = 0,9 \\ t & = 350[-\ln(0,1)]^{1/3,4} = 447,30 \text{ seg.} \end{aligned} \quad (3.8)$$

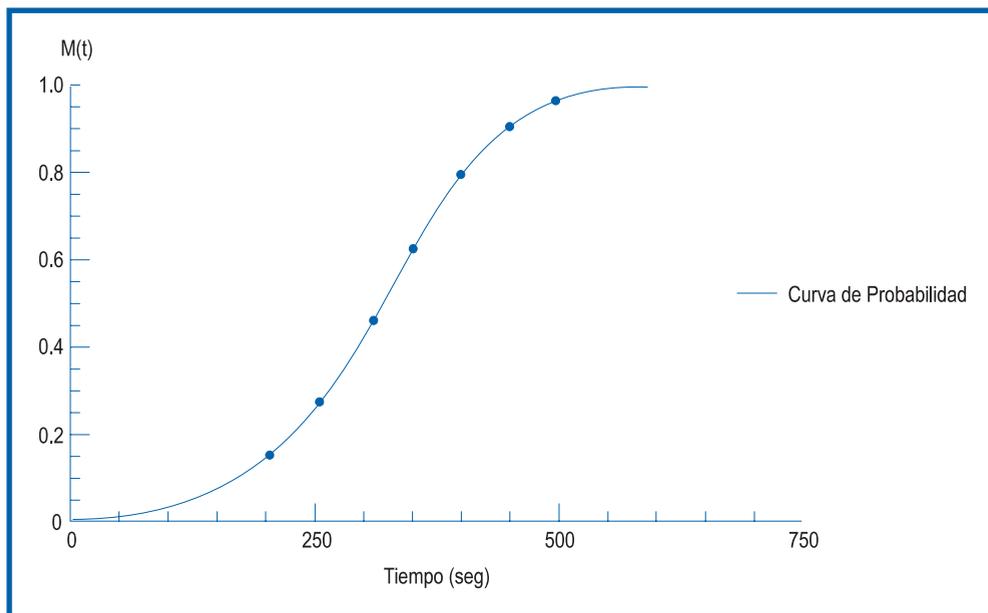


Figura 10 - FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD, $M(t)$ -

Tiempo t (seg)	M (t)
0	0
100	0.01403
200	0.13857
250	0.27279
300	0.44682
350	0.63212
400	0.79291
450	0.90464
500	0.96535
600	0.99807

Tabla 9 - FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD M(t) PARA DIFERENTES VALORES DE t -

3. Tiempo medio de recuperación (MTTR).

$$MTTR = E(TTR) = A \times \Gamma\left(1 + \left(\frac{1}{B}\right)\right) \quad (3.9)$$

donde Γ es la función Gamma. Por tanto, usando los valores tabulados:

$$\begin{aligned} \Gamma\left(1 + \left(\frac{1}{B}\right)\right) &= 0,898 \\ MTTR &= A \times 0,898 \\ &= 314,32 \text{ seg} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Consideremos como ejemplo los datos empíricos mostrados en la Tabla 10 que representan el tiempo necesario para la culminación de una tarea de mantenimiento específica, relacionada con dos alternativas de diseño A y B. El ensayo de demostración de mantenibilidad se efectuó cronometrando a 10 mecánicos suficientemente cualificados, elegidos al azar, mientras realizaban una tarea de mantenimiento específica según ambas alternativas, siguiendo el procedimiento dado

en el manual de mantenimiento, con pleno y libre acceso a todos los recursos de apoyo (herramientas, equipo, material, instalaciones, etc.).

La Figura 11 muestra TTR_{10} y TTR_{90} , la Tabla 10 recoge datos empíricos de mantenibilidad en minutos, y la Figura 12 muestra el MTTR del cambio de una rueda ($M(t)$ versus t).

3.3.2. Método paramétrico

Según este método, haciendo uso de las ecuaciones (3.1) y (3.2) se puede calcular el tiempo medio de recuperación, $MTTR^*$, y su límite superior, $MTTR^u$, con un nivel de confianza del 85% para ambas alternativas, como se muestra en la Tabla 11.

La información calculada a partir de los datos empíricos existentes es prácticamente todo lo que se puede extraer de estos datos.

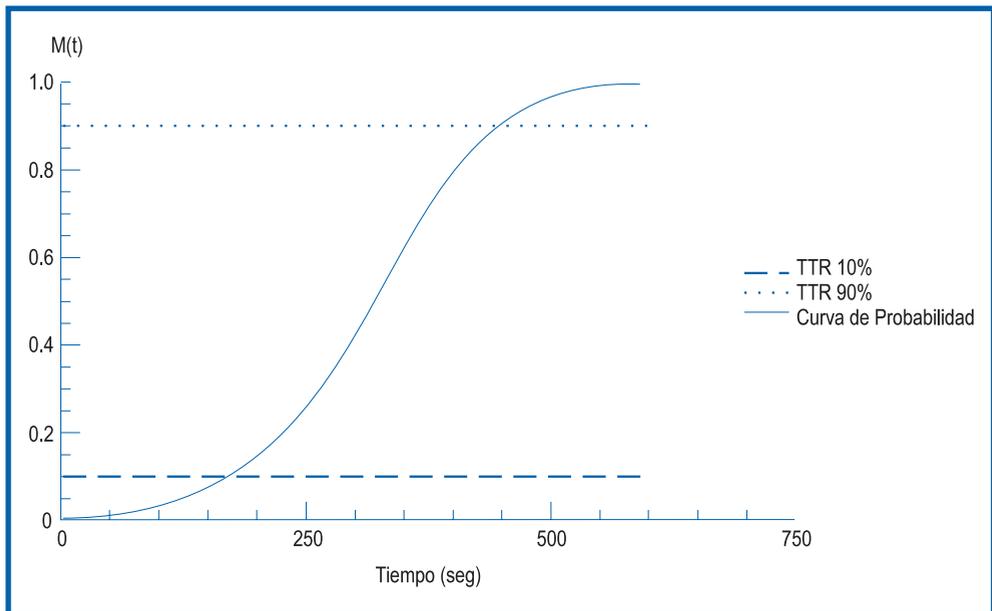


Figura 11 - TTR_p PARA 10% Y 90% -

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$ttr^A i$	206	167	232	193	128	181	218	249	151	275
$ttr^B i$	189	92	273	158	35	121	221	360	64	486

Tabla 10 - DATOS EMPÍRICOS DE MANTENIBILIDAD EN MINUTOS -

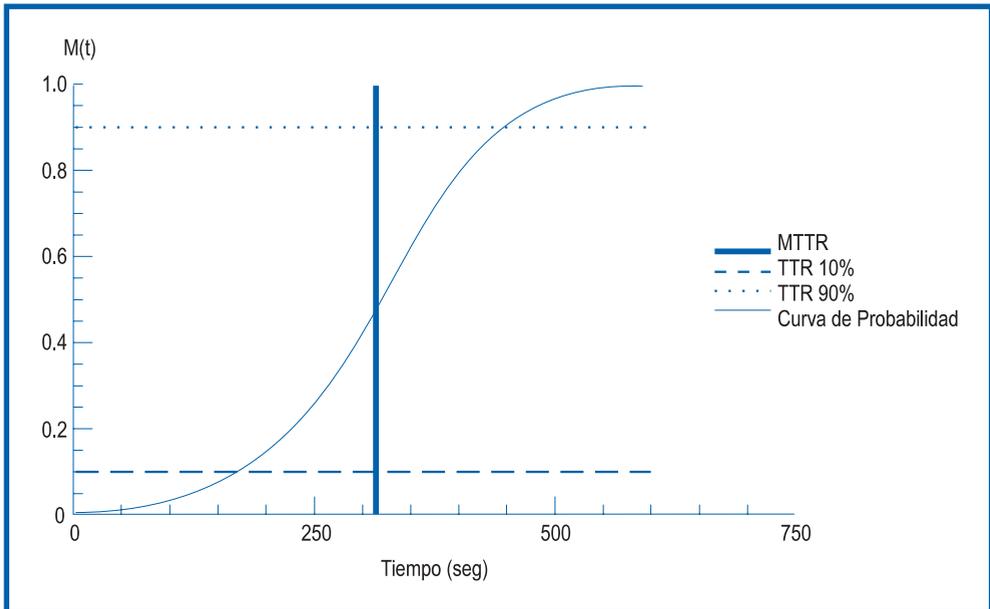


Figura 12 - MTTR PARA CAMBIO DE RUEDA EN GRÁFICO $M(t)$, t -

Alternativa	MTTR*	MTTR ^u
A	200	214.8
B	200	245.7

Tabla 11 - MEDIDAS DE MANTENIBILIDAD DEDUCIDAS DEL MÉTODO PARAMÉTRICO -

Haciendo uso de los resultados dados en la Tabla 11, se discuten a continuación algunas limitaciones de esta aproximación:

- a) Como ambas alternativas de diseño tienen un valor idéntico del $MTTR$, de acuerdo con esta medida de mantenibilidad puede recomendarse adoptar cualquiera de ellas.
- b) Asumiendo que el requisito contractual fuera que $MTTR \leq 250$ minutos, con un nivel de confianza del 85%, basándose en los valores calculados para el $MTTR_u$, no hay una ganadora clara entre ambas alternativas, lo que significa en la práctica que ambos diseños tienen el mismo derecho legal, al margen de que la alternativa A tenga algunas ventajas ($MTTR_A^u < MTTR_B^u$).
- c) La información obtenida no es suficiente para determinar y representar gráficamente la función de mantenibilidad para cada alternativa.

3.3.3. Método del ajuste de distribución

Según este método, los datos empíricos disponibles se usan en la determinación de la distribución de probabilidad teórica que mejor se ajusta (Weibull, normal, exponencial, logarítmico-normal) para representar la tarea de mantenimiento analizada. Haciendo uso del «software» «PROBCHAR» [1], los resultados obtenidos se listan en la Tabla 12.

Comparando los datos de las Tablas 11 y 12, se puede ver fácilmente que el método de ajuste de distribución puede extraer mucha más información de los datos empíricos que el método paramétrico. Una de sus muchas ventajas es que es posible determinar el tiempo de recuperación para el que se culminan el 10, 50, 90 o cualquier otro porcentaje de las tareas de mantenimiento intentadas, independientemente de la distribución teórica subyacente.

Estudiante i	Alternativa A	Alternativa B
Tipo de distribución	Normal	Weibull
Parámetro de escala	200	215
Parámetro de forma	50	1,25
MTRR	200	200
TTR ₁₀	135,9	35,5
TTR ₃₀	200	160,4
TTR ₉₀	264,1	419
Desviación típica	45,4	139,5

Tabla 12 - MEDIDAS DE MANTENIBILIDAD
DEDUCIDAS DEL MÉTODO DEL AJUSTE DE DISTRIBUCIÓN -

Se define la función de mantenibilidad para ambas alternativas de diseño, con base en la ecuación (3.1) y las distribuciones y parámetros específicos seleccionados (ver Tabla 10), como [1]:

$$M^A(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{50\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-200}{50}\right)^2\right] dt = \Phi\left(\frac{t-200}{50}\right) \quad (3.11)$$

para la alternativa A, donde Φ es una función de Laplace para la variable normal reducida, cuyos valores numéricos pueden obtenerse de las tablas estadísticas [1], y para la alternativa B como:

$$M^B(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{215}\right)^{1,25}\right) \quad (3.12)$$

La representación gráfica para ambas funciones de mantenibilidad se muestra en la Figura 13.

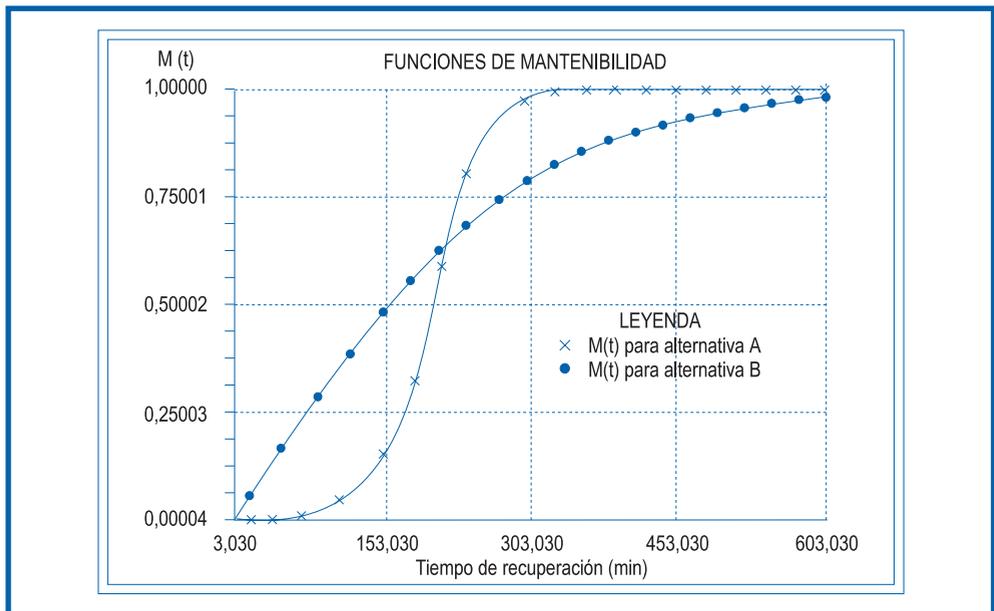


Figura 13 - FUNCIONES DE MANTENIBILIDAD PARA LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO CONSIDERADAS -

Claramente, la cantidad de información extraída en el último caso de los datos empíricos de mantenibilidad existentes, es mucho mayor y potencialmente más beneficiosa para el que decide, con respecto a los aspectos de gestión de mantenimiento y apoyo logístico. Asimismo, algunas de las medidas de mantenibilidad adicionales que pueden extraerse de los datos, la realización de la recuperación, suministran una nueva luz en los estudios de mantenibilidad.

3.4. Observaciones finales

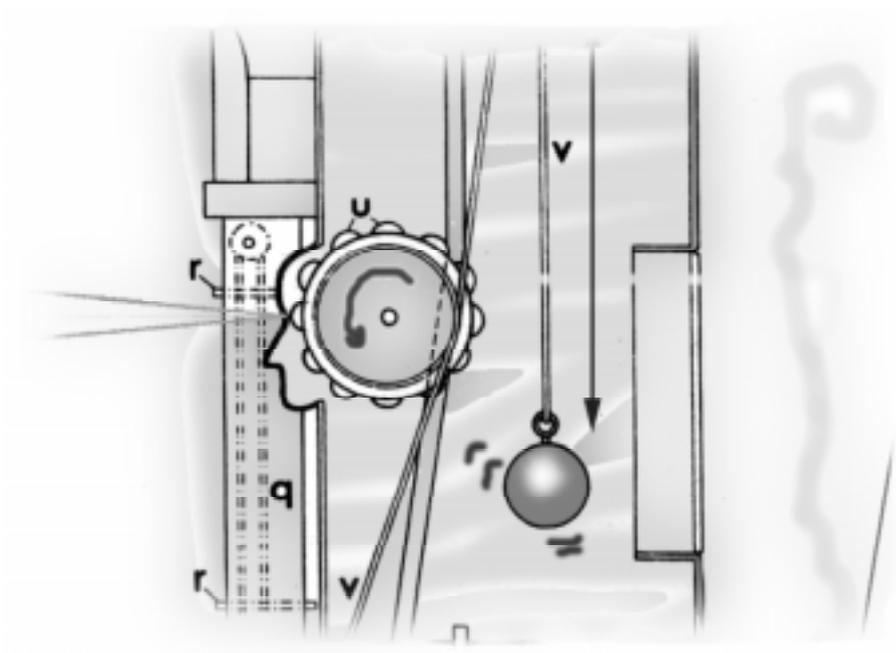
El objetivo principal de este capítulo era presentar y comparar la eficacia de los posibles métodos de inferencia estadística, respecto a las medidas de mantenibilidad, y su impacto en las decisiones de mantenibilidad tomadas durante las fases de diseño, adquisición y operación en el ciclo de vida de un elemento o producto. Se ha contrastado el método menos usado del ajuste de distribución con el bien conocido y ampliamente aceptado método paramétrico, donde se calcula principalmente el *MTTR*, con objeto de demostrar las diferencias entre ellos. Mediante el ejemplo numérico usado se vio con más claridad que, cuando se introducen en ambos métodos datos empíricos idénticos, es muy superior la eficacia del método del ajuste de distribución para extraer información de los datos existentes.

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.

4

La mantenibilidad como objetivo del diseño



En este Capítulo se considerará el papel primario de la organización de diseño en la creación y mejora de diseños con una mantenibilidad inherente requerida. Como a menudo suele pasarse por alto y olvidarse lo obvio, se relacionan a continuación las premisas básicas:

- i. Los diseñadores crean el diseño y son responsables de todas sus características, incluida la mantenibilidad.
 - ii. Cada diseño de «hardware» tiene un potencial inherente de mantenibilidad.
 - iii. Cuando el «hardware» se produce según los requisitos de diseño, los valores de mantenibilidad se aproximan al potencial inherente de mantenibilidad de diseño, pero la mantenibilidad inherente total se alcanza raramente, porque los procedimientos y entornos de uso del sistema tienden hacia la obtención de una mantenibilidad real menor.
 - iv. Cualquier sistema complejo debe comenzar con un diseño que contenga unas características de mantenibilidad inherente muy altas, para que exista una posibilidad razonable de que el «hardware» se entregue al usuario con la mantenibilidad real exigida o deseada.
 - v. El personal de mantenibilidad debe tener unas funciones de equilibrio y chequeo, independientes y objetivas, respecto
-

de los diseñadores, pero no se le debe permitir usurpar la responsabilidad del diseñador respecto a la mantenibilidad.

Claramente, una función de diseño competente y fuerte, en equipo con una función de mantenibilidad competente y fuerte, sirven a los mayores intereses de la mantenibilidad durante el proceso de diseño. Debe recalcar que, si una organización debe optar entre una función de diseño fuerte y competente y una función de mantenibilidad débil, o una función de diseño débil y una función de mantenibilidad fuerte y competente, la primera opción atenderá mejor los intereses de mantenibilidad del diseño.

4.1. El papel de la función de diseño

Con la aceleración de los avances tecnológicos, más y más compañías individuales e industrias enteras han sido, y están siendo, forzadas a abandonar la autocomplacencia y mirar hacia el futuro. La acción, en esos casos, comienza normalmente con un énfasis hacia la investigación, desarrollo y diseño.

La importancia de la función de mantenibilidad en el proceso de diseño en una compañía, es directamente proporcional a la importancia de la función de diseño. Una función de diseño fuerte y competente es esencial en las áreas de avances tecnológicos rápidos, como las áreas aeroespacial y de sistemas de armas. La función de diseño también es de gran importancia para los fabricantes de artículos duraderos (como vehículos a motor, equipo de oficina y electrodomésticos), productores de máquinas-herramientas y otras áreas similares. Las organizaciones de diseño de las compañías productoras de esos sistemas están normalmente bien dotadas de personal. A pesar de ser de menor importancia en las compañías productoras de sistemas simples o de diseño estable y probado, la función de diseño es una función importante en todas las industrias productoras.

La función de diseño en una compañía tiene ciertas responsabilidades hacia la gestión de la organización. Al trabajar en las áreas asignadas de los sistemas, la función de diseño debe crear diseños que sean: funcionales, fiables, mantenibles, productivos, oportunos y competitivos.

Cuando sea posible, se espera que los diseñadores utilicen técnicas de diseño probadas. Cuando los objetivos de diseño no se pueden cumplir mediante el uso de métodos de diseño probados y familiares, se espera que los diseñadores adapten sus métodos, recojan técnicas de diseño de otras industrias, o usen algunos de los materiales y procesos del nuevo estado del arte que estén disponibles. Como los diseñadores son normalmente creativos por naturaleza, les es a menudo difícil resistirse a probar algo nuevo, aunque dispongan de técnicas probadas. Es sabida la receptividad de los diseñadores a los esfuerzos de los ingenieros de ventas, que hacen ver los méritos sobresalientes de sus nuevos sistemas. Una importante responsabilidad de la gestión de diseño es el establecimiento de un sistema, que haga apreciablemente más fácil para los diseñadores el uso de diseños probados que de diseños no probados.

Como a menudo es imposible cumplir todos los objetivos de diseño en su máxima extensión, se exige frecuentemente al diseñador que establezca un compromiso entre los objetivos. Al requerir tolerancias inusualmente exigentes, o especificar un material exótico, pueden mejorar la mantenibilidad a expensas de la manufacturabilidad. Si con el fin de que la entrega del diseño se haga a tiempo, los diseñadores no comprueban completamente la capacidad del diseño para funcionar bajo las peores combinaciones de entorno y envejecimiento, pueden correr riesgos de empeorar la mantenibilidad. Es inevitable algún tipo de compromiso, y es la función de diseño la que tiene tanto la información como la responsabilidad para tomar las decisiones necesarias en estos casos. Sin embargo, la función de diseño debe hacer saber a la función de mantenibilidad y a la dirección general, tanto el hecho de que se han efectuado compromisos como las razones de las decisiones tomadas.

4.2. El papel de la función de mantenibilidad

Para que un diseño tenga una mantenibilidad inherente aceptable, se deben hacer provisiones para la mantenibilidad dentro del concepto de diseño, continuando durante su desarrollo hasta su finalización. Como a menudo es difícil detectar mejoras marginales en la mantenibilidad, antes de que el esfuerzo de diseño haya concluido (esto es especialmente cierto en diseños complejos y sofisticados), es necesario que la función de mantenibilidad trabaje durante la creación del diseño, en sus funciones de chequeo y equilibrio, independientes y objetivas, respecto al cumplimiento de la mantenibilidad en las metas del diseño.

Ha habido y hay alguna confusión entre viabilidad y mantenibilidad durante las etapas iniciales del diseño. El desarrollo de un diseño que funcione más de una vez, para establecer la viabilidad de un concepto de diseño, es principalmente una responsabilidad de diseño, con sólo una asistencia incidental por parte de la función de mantenibilidad. Mientras se realiza el análisis del diseño o la revisión de diseño, el personal de mantenibilidad puede descubrir y requerir la corrección de características de diseño, errores u omisiones que afecten a la viabilidad, pero la participación de mantenibilidad en la revisión de diseño no está ideada primariamente con este propósito. Mantenibilidad se encarga de los requisitos de diseño adicionales, precisos para asegurar que la funcionabilidad de un diseño viable pueda ser mantenida fácil, segura y económicamente, durante su funcionamiento en entornos especificados y otras condiciones operativas.

La función de mantenibilidad trabaja de varias formas con la función de diseño para alcanzar su objetivo. Mantenibilidad actúa en distintas ocasiones como auxiliar, conciencia e inspección. Como auxiliar, mantenibilidad realiza ciertos servicios analíticos y estadísticos para la organización de diseño. Estos servicios incluyen la recogida, análisis y realimentación de datos en el desarrollo de «hardware»/«software». En general, mantenibilidad ayuda a diseño mediante la predicción y medida de la mantenibilidad inherente, durante las distintas etapas de diseño.

Mantenibilidad sirve como conciencia de la función de diseño, vigilando estrechamente e informando de los progresos de diseño hacia las metas de mantenibilidad especificadas. Además, también se vigilan estrechamente todos los compromisos establecidos que afectan a la mantenibilidad.

La función de mantenibilidad actúa de lleno cuando inspecciona el resultado del diseño, que debe aprobar antes de que pueda progresar el esfuerzo de diseño. Algunos de los controles que ejerce para esa exigencia de los requisitos de mantenibilidad, son la aprobación de las soluciones propuestas por los diseñadores, la aprobación del uso real de los recursos de mantenimiento establecidos, la aprobación de las revisiones de diseño y, finalmente, el refrendo de documentos descriptivos del diseño (planos, especificaciones y procedimientos).

La función de mantenibilidad puede incluir también la coordinación de programas de prueba del diseño, la dirección de programas independientes de prueba de mantenibilidad, la conducción real de todas las pruebas, la identificación y establecimiento de sistemas de control para porciones del diseño que tengan limitaciones especiales, la preparación de especificaciones de mantenibilidad aplicables a los proveedores, y la imposición de requisitos de mantenibilidad a los proveedores mediante la revisión y aprobación de los documentos de adquisición.

4.3. Adecuación de la función de mantenibilidad

Generalmente, cuanto más complicado es el destino del diseño, mayor es el esfuerzo de mantenibilidad requerido. Los problemas de diseño encontrados en un satélite, un sistema de armas importante, o una red mundial de comunicaciones compleja, requieren esfuerzos importantes de diseño y mantenibilidad. Por otro lado, si el diseño se mueve dentro de la tecnología existente, es simple, y tiene amplias tolerancias de espacio, peso y tiempo de diseño, puede ser adecuado un pequeño esfuerzo de mantenibilidad.

Así, se requiere un esfuerzo de mantenibilidad importante (importante en el sentido de ser una fracción considerable del esfuerzo de diseño) bajo las circunstancias siguientes:

- a) En el diseño de cualquier sistema muy complejo.
- b) En el diseño de equipos con requisitos de mantenibilidad muy altos, particularmente cuando los diseñadores trabajan bajo limitaciones severas de espacio y presupuesto.
- c) Cuando los diseñadores trabajan bajo restricciones rigurosas de tiempo, particularmente en programas de tipo aeroespacial ajustados en los hitos, donde la producción debe comenzar antes de que se complete el diseño.

La regla general puede ser que, cuantas más restricciones se exijan a los diseñadores y cuanto más severas sean estas restricciones, mayor será el programa de mantenibilidad necesario. Una de las razones más importantes que explican esta relación es que, bajo la presión de estas restricciones, los diseñadores pueden, intencionalmente o no, ignorar los requisitos de mantenibilidad. Se necesita un gran esfuerzo de mantenibilidad, tanto para ayudar como para controlar a los diseñadores en los aspectos que afectan a la mantenibilidad.

Durante el desarrollo del diseño, los diseñadores deben establecer compromisos entre diversos requisitos. Las penalizaciones sobre los diseñadores que no cumplen enteramente prestaciones, calendario, coste, productividad u otros objetivos, son mucho más inmediatas y seguras que las consecuencias por no cumplir enteramente los objetivos de mantenibilidad, salvo si una función de mantenibilidad fuerte e independiente, llama la atención inmediatamente y con autoridad sobre cualquier deficiencia en las provisiones de diseño para la mantenibilidad. La presencia de tal función de mantenibilidad ayudará a asegurar que se le da una consideración completa a los requisitos de mantenibilidad. Puede ser todavía necesario, bajo ciertas condicio-

nes, buscar una solución de compromiso entre los requisitos de mantenibilidad y las prestaciones, o cualquier otra característica de diseño, pero tal compromiso debe realizarse con pleno conocimiento de todas las consecuencias posibles.

Muy pocos diseñadores escatiman deliberadamente las provisiones para alcanzar toda la mantenibilidad exigida en sus diseños. Sin embargo, se pueden presentar algunos de los siguientes peligros:

- **Descuido:** ocurre en los casos donde los diseñadores descuidan uno de esos innumerables detalles que culminan un diseño completo. Por ejemplo, los diseñadores saben perfectamente que se necesita un elemento de ensamble especial para un determinado componente, pero descuidan indicarlo en los planos. Como resultado de esta omisión, se hace aplicable una nota de especificación en los planos generales. Como consecuencia, si no se capta esta circunstancia, se puede producir un retraso sustancial en la finalización de una tarea de mantenimiento relacionada con ese elemento, en algún momento durante la vida operativa.
 - **Falta de conocimiento específico:** Debe reconocerse que los diseñadores no pueden poseer todos los conocimientos relacionados con cada diseño, y tampoco tienen tiempo para verificar cada detalle. Consecuentemente, todos los diseñadores hacen lo que pueden para comprobar lo que creen necesario, y recurren a expertos en ciertas áreas altamente especializadas, como el uso de recursos específicos de mantenimiento, ergonomía, asuntos de seguridad, etc. Por ejemplo, los diseñadores pueden especificar el uso de un equipo de prueba o una herramienta especiales, que eran los mejores disponibles para ese propósito la última vez que se necesitaron. Sin embargo, puede haber aparecido una nueva tecnología que funcione mejor y que cumpla también con creces los requisitos de diseño.
-

- **Racionalización:** Los diseñadores se ven normalmente apremiados, de aquí que en muchas ocasiones crean honradamente que su diseño cumple todos los requisitos de diseño, incluidos los de mantenibilidad, pero para estar absolutamente seguros de ello debería llevarse a cabo un conjunto de pruebas adicional. Esperar el resultado de estas pruebas retrasaría el diseño respecto al programa establecido. Es fácil que los diseñadores se autoconvenzan de que realmente no hacen falta estas pruebas. Esta misma práctica de racionalización incluye las explicaciones de fallos en las pruebas con comentarios como: «Fue un error experimental», o «Era un diseño inicial» o «De todas formas, el entorno real nunca será tan riguroso.»

Cuando las consecuencias de no alcanzar los requisitos de mantenibilidad son extremadamente peligrosas, costosas en términos económicos, o ponen en juego la reputación o seguridad nacional, las consideraciones de mantenibilidad se vuelven extremadamente importantes. Si las características de mantenibilidad tienen una alta prioridad, no se puede confiar el proceso a las buenas intenciones o a la suerte. Por esto, debe haber una comprobación y análisis independientes de cada tarea de mantenimiento (incluyendo aquellas operaciones que la función de mantenibilidad-calidad puede realizar por sí misma, como la escritura de procedimientos de prueba) y una continua atención a los detalles. De aquí que ninguna organización ni persona pueda considerarse tan capaz u omnipotente, que sus realizaciones no necesiten un análisis de revisión independiente.

4.4. Impacto de los requisitos de mantenibilidad en la ingeniería de diseño

Los requisitos, metas y objetivos de mantenibilidad son establecidos por el cliente o por las prácticas de los competidores. Las organizaciones públicas, como el Ministerio de Defensa y la Agencia Nacional

de Aeronáutica y Espacio, son muy estrictas sobre sus requisitos de mantenibilidad, particularmente en sistemas de armas, sistemas espaciales u otros equipos complejos. Los grandes compradores industriales, como las industrias de automóviles y las compañías aéreas, son muy precisos hacia sus proveedores en sus requisitos de mantenibilidad.

Los requisitos de mantenibilidad para bienes de consumo y sistemas industriales suministrados a un cierto número de pequeños usuarios, son determinados por el fabricante. Su determinación se basa, tanto en la reacción del cliente como en las prácticas de los competidores. Es ciertamente posible para una compañía salirse del mercado al establecer requisitos de mantenibilidad irrealmente altos. Sin embargo, muchas más compañías o usuarios se han encontrado en problemas, por haberse elegido bajos niveles de los requisitos de mantenibilidad.

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 (incluyendo la mantenibilidad) es el elemento básico de la función de ingeniería de costes. Así, la eliminación de requisitos de mantenibilidad innecesarios e irreales durante las etapas iniciales de un programa, puede ahorrar tiempo, esfuerzo y dinero 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. 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 diseño 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 ensamble, 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.

Los requisitos, metas u objetivos numéricos de mantenibilidad forman parte de los objetivos de diseño básico, impuestos a la organización de diseño. Además, las consideraciones de mantenibilidad pueden tener como resultado limitaciones de diseño específicas (cosas que deben y no deben hacerse) impuestas a los diseñadores. Ambos tipos de requisitos de mantenibilidad forman parte del entorno de diseño en el que deben operar los diseñadores.

4.5. Métodos de diseño para lograr la mantenibilidad

Se discuten en este apartado los procedimientos específicos que los diseñadores pueden seguir para lograr la mantenibilidad, pero que no es obligatorio seguir si el principal objetivo es sólo hacer funcionar el diseño para demostrar la viabilidad.

- **Accesibilidad, modularidad:** Todo equipo y subconjunto debe agruparse en módulos a los que se pueda acceder por separado y convenientemente, y estar compuesto de piezas que se puedan

conectar rápidamente para cualquiera de los tipos de conexiones: mecánicas, neumáticas, eléctricas y electrónicas. Por ejemplo, en el caso del tren TGV, los paneles del techo pueden desmontarse rápidamente; paneles de acceso laterales y numerosos puntos de inspección permiten todo tipo de inspecciones progresivas y sustitución de componentes en un corto espacio de tiempo. El equipo auxiliar de la locomotora y de los vagones de pasajeros está localizado de forma que las posturas de trabajo para el personal de mantenimiento sean ergonómicas, y en particular para que varios especialistas puedan desarrollar sus tareas de mantenimiento de forma simultánea, sin molestarte mutuamente.

- **Simplicidad y normalización**, son dos herramientas útiles para diseñadores que busquen una alta mantenibilidad. En general, cuanto más simple es el diseño, más favorable es la mantenibilidad. Por ejemplo, la reducción en la cantidad de piezas o en el número de piezas diferentes usadas es un recurso normal para tratar de mejorar la mantenibilidad. Asimismo lo es el uso de elementos de ensamble, conectores, herramientas, equipos de prueba normalizados, que han sido probados a fondo y tienen menos posibilidad de fallar. Como los diseñadores típicos son por naturaleza gente creativa, se requiere un gran control para mantener la simpleza en el diseño y el uso continuo de componentes, herramientas e instalaciones normalizados.

- **Ingeniería de factores humanos**, es un tema que debe inquietar a los diseñadores. Los diseñadores deben hacer tan difícil como sea posible, el montaje o uso incorrecto de su diseño. Cuando sea posible, las longitudes de los cables deben ser tales que sólo el cable correcto alcance el conector del equipo correspondiente. Cuando el diseño es tal que más de un cable puede alcanzar el conector del equipo correspondiente, los conectores de los cables deben ser de diferente tamaño para que sólo entre el del cable correcto. Cuando un conjunto funcional deba rellenar un espacio, se debe dar una consideración plena de mantenibilidad a los problemas de extracción y sustitución por personal de cualificación normal, trabajando en condiciones de pie de

obra. Si el diseño es tal que es extremadamente difícil sustituir una LRU/SRU¹, crece considerablemente la probabilidad de que la tarea de mantenimiento no se complete con éxito. Si el diseño es tal que existe la posibilidad de que una tuerca, arandela o tornillo caiga en una zona vital o inaccesible, es alta la probabilidad de que ello ocurra, dado el número de oportunidades. En cualquiera de estos casos, el diseño contiene características que influyen en la mantenibilidad del diseño.

- **Capacidad de prueba**, de un diseño; es de gran importancia para la mantenibilidad. Cuando sea posible la elección, los diseñadores del equipo funcional deben crear un diseño que se pueda someter a pruebas funcionales completas, no destructivas. Por ejemplo, el interruptor de un circuito puede ser verificado funcionalmente, mientras que tal verificación es destructiva para un fusible. Por ello debe sopesarse la ventaja de la prueba del interruptor frente a la mantenibilidad del fusible. Un actuador de solenoide puede ser probado funcionalmente repetidas veces; un actuador explosivo es un aparato de un sólo uso. También es una característica muy importante de un diseño mantenible la capacidad de inspeccionar dimensiones, juntas, retenes, acabados superficiales y otros atributos no funcionales, hasta, y más allá del punto en que es probable que sufran degradación. Debe señalarse que hay dos tendencias importantes respecto a las pruebas frecuentes en sistemas complejos. Una prefiere pruebas muy poco frecuentes o ninguna prueba en absoluto, mientras el sistema esté funcional. La otra prefiere pruebas de funcionalidad regulares y frecuentes, para asegurar que el sistema está todavía operativo.

- **Uso de recursos especiales de mantenimiento**, debe abordarse apropiadamente en planos y especificaciones. Además, diseño debe dar asimismo tanta información anticipada como sea posible para que el equipo, instalación y personal cualificado requeridos puedan estar disponibles con los mínimos inconvenientes. Un ejemplo

(1) N. del T. LRU = Line Replaceable Unit: Unidad Reemplazable en Línea (1^{er} escalón)
SRU = Shop Replaceable Unit: Unidad Reemplazable en Taller (2^o escalón)

es el diseño que exige una sala limpia para la realización de una tarea de mantenimiento específica, de un tipo que no disponen actualmente los lugares de reparación existentes.

Para resumir, hay varias técnicas de diseño que pueden usarse para mejorar el diseño en la obtención de una mantenibilidad. Estas técnicas deben ser evaluadas cuidadosamente en cada caso, frente a las restricciones de diseño que pueden afectar a ese diseño en particular.

4.6. Análisis y revisión de mantenibilidad del diseño

El análisis de mantenibilidad del diseño, (Design Maintenance Analysis, DMA) es un término general que se usa para englobar muchas funciones de mantenibilidad. Dos de las más importantes son el análisis de predicción de mantenibilidad y la revisión de diseño de mantenibilidad.

El análisis de predicción de mantenibilidad es una función para evaluar las características potenciales de mantenibilidad de un diseño. Se acomete tan pronto como aparecen los posibles conceptos de diseño. A medida que el diseño madura, se actualizan los informes del análisis. El análisis de predicción de mantenibilidad es la mayor aportación de mantenibilidad al diseño y a las reuniones de revisión de diseño. Un informe inicial típico de análisis de predicción de mantenibilidad para un sistema funcional, podría contener las siguientes secciones:

Introducción: que describe el sistema o elemento, física y funcionalmente. Se explica el uso del sistema o elemento y se incluye una fotografía o un dibujo.

Resumen de las conclusiones y recomendaciones más importantes: que representa una parte vital del informe y debe acentuarse imprimiéndose en papel que contraste con el resto. Debe recordarse que el objetivo del análisis de mantenibilidad es identificar

las áreas de diseño que necesitan mejoras, y proponer esas mejoras para que se tomen medidas correctivas.

Diagrama de bloques de mantenibilidad: que muestra el emplazamiento de los elementos significativos de mantenimiento en el sistema, así como las funciones más importantes del elemento mismo.

Estimación de la mantenibilidad del sistema: conduce a una estimación numérica de la mantenibilidad del sistema, realizada por el personal de diseño y de 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. El propio estudio detallado del análisis debe constituir un anexo.

Mantenibilidad de elementos: en esta sección deben incluirse los datos de origen de fallos del elemento, la aplicación de estos datos a los componentes del sistema o elemento, y las suposiciones efectuadas.

Análisis de modos de fallo, efectos y criticidad, (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, FMECA): donde se identifican y describen todos los modos de fallos primarios, junto con su efecto y la criticidad de cada uno en la funcionabilidad del sistema. Deben exponerse las provisiones del diseño incluidas para prevenir fallos progresivos, es decir, fallos que a su vez causan otros fallos.

Análisis de mantenibilidad: Contiene información sobre la detección y corrección de fallos, la accesibilidad de sistemas o elementos de vida especialmente limitada, requisitos de mantenimiento e instrucciones de servicio sugeridos, y recomendaciones logísticas.

Conclusiones y recomendaciones: que deben proporcionar un resumen de todas las recomendaciones contenidas en otras secciones del informe del análisis, con referencia a los párrafos de la

sección específica que contiene la información detallada. Se incluyen también recomendaciones específicas y detalladas para acciones correctivas.

A medida que el diseño madura, también lo hará la mantenibilidad en los informes del análisis de diseño. Las posteriores revisiones del informe de análisis contendrán las minutas de las reuniones de revisión del diseño e información sobre las acciones resultantes.

El análisis de diseño es algo menos que una ciencia exacta, pero las técnicas de análisis de mantenibilidad se han desarrollado bastante bien. Aunque no es una cifra exacta, la predicción del valor de mantenibilidad que resulta de tal análisis, suministra una guía aproximada de si el diseño está próximo a la mantenibilidad exigida.

La predicción del valor de mantenibilidad de un diseño en particular, como resultado del análisis de mantenibilidad, es de especial valor en la comparación de conceptos de diseño alternativos, cuando el objetivo principal del análisis es la mantenibilidad inherente relativa de los diseños comparados. El informe del análisis de mantenibilidad suele ser la única fuente de descripción completa del diseño inicial, con sus diagramas de flujo, esquemas, teoría operativa, descripciones funcionales, modos de fallos previstos, y demás información vital. Como tal, sirve como función auxiliar de comunicación y coordinación. El informe del análisis de predicción de mantenibilidad es, junto con la información de descripción del diseño (planos, especificaciones y procedimientos), una entrada importante para la revisión de diseño. Una tercera entrada básica es el conjunto de listas de comprobación de la revisión de diseño de mantenibilidad, completadas por los diseñadores.

Las revisiones de diseño de mantenibilidad consiguen mejores resultados cuando se conducen bajo la organización de diseño, con programación y planificación, iniciativa, y preparación de actas por los ingenieros de mantenibilidad. Se debe hacer una amplia preparación

previa a las reuniones, utilizando las listas de comprobación de la revisión de diseño de mantenibilidad, que se preparan y revisan periódicamente por los ingenieros de mantenibilidad. Cuando sea posible, esas listas de comprobación deben hacer preguntas que exijan respuestas informativas distintas de sí o no. En los sistemas complejos se exige un mínimo de tres revisiones de diseño (conceptual, provisional y final). Los proveedores que realizan su propio trabajo de diseño, deben también mantener sus propias revisiones de diseño conceptual, provisional y final. El personal de diseño y mantenibilidad del contratista debe participar en las revisiones de diseño conceptual y final.

El proceso de alcanzar la mantenibilidad requerida es más fácil en algunos diseños que en otros. Mientras que casi cualquier concepto de diseño puede convertirse en un diseño mantenible si se gastan suficiente dinero, tiempo y esfuerzo, la facilidad relativa (al comparar dos o más procedimientos de diseño) con que puede lograrse la mantenibilidad puede (y debe) reconocerse mediante revisiones del diseño. Las revisiones de diseño conceptual tienen, por supuesto, un impacto potencialmente mayor en el diseño, mientras que las posteriores revisiones provisionales y finales tienen un efecto relativamente menor, a medida que se va concretando el diseño y se dispone de menos tiempo para cambios importantes.

Las revisiones de diseño de mantenibilidad deben combinarse, cuando sea posible, con otras revisiones de diseño como las de productividad y fiabilidad, para minimizar el tiempo que debe dedicarle el diseñador y para resolver recomendaciones contradictorias.

El director del departamento de diseño debe normalmente presidir las reuniones de revisión de diseño. Como presidente, el director toma las decisiones finales sobre sugerencias y cambios propuestos. El presidente de la revisión de diseño es la única persona en la reunión que tiene responsabilidad y autoridad para admitir compromisos en el diseño cuando sea necesario. En realidad, las reuniones de revisión de diseño son algo que sirve para medir el rendimiento de los diseñadores.

dores; por otra parte, la información reunida proporciona al presidente una mejor base para admitir los compromisos necesarios.

En la práctica, lo mejor es que el ingeniero de mantenibilidad proporcione la lista de comprobación de la revisión de diseño a los diseñadores responsables, con bastante anticipación a la reunión del revisión de diseño. El ingeniero de mantenibilidad debe repasar la lista de comprobación con los diseñadores para identificar las áreas conflictivas. Idealmente, estas áreas problemáticas deben resolverse antes de la reunión. Si el personal de mantenibilidad hace una objeción a una decisión del director de diseño, en temas que afectan a la mantenibilidad, el recurso de mantenibilidad se conduce a través de la suspensión de la aprobación o de su resolución por una autoridad superior, dependiendo de la política de la organización implicada.

La preparación que se necesita para una reunión de revisión de diseño debe normalmente dar como resultado la eliminación de la mayoría de las deficiencias. Se realizarán las pruebas y análisis que puedan haber sido omitidos, y los diseñadores harán más uso de los distintos especialistas de diseño. En el análisis final, esta preparación puede ser, por sí misma, el mayor beneficio individual de la revisión del diseño.

Si se hace correctamente, la revisión de diseño puede tener una contribución importante para «terminar el trabajo a la primera». La revisión de diseño constituye una fuerza que se opone a las presiones de programación: se suelen subestimar los tiempos precisos para ejecución del diseño y a medida que se acerca la fecha límite, hay una presión considerable para usar soluciones de diseño rápidas e «intuitivas», sin el necesario análisis minucioso. Un programa formal de revisión de diseño es una barrera para las soluciones de diseño «rápidas y sucias», ya que los diseñadores saben que deben enfrentarse a sus superiores y al personal de mantenibilidad, con las respuestas correctas a una lista minuciosa de preguntas. Sabiendo que se acerca la revisión del diseño, es normalmente más fácil que los

diseñadores hagan el trabajo de diseño, minuciosa y correctamente, la primera vez.

Para resumir, el análisis de mantenibilidad del diseño es un método matemático y analítico para estimar o predecir la mantenibilidad inherente de un diseño. El análisis de mantenibilidad debe realizarse tan pronto como se disponga de un diseño y esquemas provisionales. El análisis debe revisarse cada vez que se realiza un cambio significativo en el diseño.

La petición de acciones correctivas por parte de mantenibilidad se realiza cuando aparecen discrepancias significativas de diseño. El informe del análisis de mantenibilidad constituye una aportación importante para las reuniones de revisión del diseño, que son una serie de reuniones formales y programadas para la revisión minuciosa y completa de todos los aspectos de cada diseño, con particular énfasis en los de mantenibilidad. Las reuniones de revisión de diseño son programadas y dirigidas por la organización de diseño, con los ingenieros de mantenibilidad actuando como instigadores, encargados del registro, abogados del diablo y voz de la conciencia. Cuando sea necesario, se llega en estas reuniones a soluciones de compromiso en el diseño. El personal de mantenibilidad puede rechazar la aprobación, o reaccionar contra revisiones de diseño inaceptables a través de los canales administrativos.

Los análisis y revisiones de mantenibilidad pueden considerarse como la «inspección y prueba» de los diseños individuales, con el objetivo de medir y registrar la conformidad con los requisitos de diseño básicos y con los principios y prácticas de diseño correctos. En este sentido, los análisis y revisiones de mantenibilidad son para la calidad del diseño (mantenibilidad inherente), lo que la inspección y las pruebas son para la calidad del producto (conformidad con los requisitos del diseño). Unas funciones de análisis y revisión de mantenibilidad minuciosas y competentes son esenciales para alcanzar una alta mantenibilidad inherente en diseños complejos. Una alta mantenibilidad

inherente es un requisito fundamental para la producción de «hardware» que demuestre una alta mantenibilidad, cuando esté sometido a condiciones de uso.

Desafortunadamente, es muy fácil que un diseño con una alta mantenibilidad inherente sufra una importante disminución en el potencial de mantenibilidad, a causa de un control inadecuado de la configuración de diseño, de un descuidado control de erratas, y de planos y especificaciones que contengan información ambigua y anotaciones y llamadas erróneas, o que omitan requisitos esenciales. La revisión del diseño que asegura que el propósito del diseñador se comunica clara y completamente al personal de producción y control de calidad que lo precise, se llama revisión de definición del diseño. Esta revisión, junto con una continua auditoría de los sistemas de control de aprobación, cambios, y configuración del diseño, es esencial para prevenir la degradación de la mantenibilidad en un diseño básicamente bueno.

4.7. Demostración, informe e investigación de mantenibilidad

Esta sección describirá ciertas funciones de mantenibilidad que se asocian sólo incidentalmente con la función del diseño. En algunos casos, el gobierno y algunos clientes industriales exigen en el contrato u orden de compra la demostración de la mantenibilidad. Los casos en que se han exigido demostraciones de mantenibilidad, han implicado con frecuencia piezas o conjuntos simples funcionales. Si el objeto proporcionado es muy caro o si lo son las pruebas necesarias para demostrar la mantenibilidad, la demostración de cualquier cifra significativa de mantenibilidad con un grado significativo de confianza se hace rápidamente prohibitiva. Cuando la demostración de mantenibilidad sea realmente un requisito de adquisición, la función de mantenibilidad constituye una clave para la negociación de los términos y condiciones exactos de ese requisito. Además, tanto el personal de mantenibilidad del comprador como del vendedor, deben participar

normalmente en las pruebas reales de demostración. Como puede estar en juego una parte importante del beneficio, las pruebas de demostración de la mantenibilidad reciben normalmente mucha atención por parte de las compañías.

Comenzando con la estimación de la mantenibilidad inherente deducida del análisis del diseño, la función de mantenibilidad puede desear, o serle exigido, el seguimiento del crecimiento de la mantenibilidad, a medida que madura el programa de desarrollo. Tal maduración de la mantenibilidad exige un enfoque tanto de ingeniería como estadístico. Se evalúan los resultados de pruebas de ambiente, entorno y operación (si es de aplicación) para determinar el nivel de mantenibilidad alcanzado.

La mantenibilidad es una función técnica con ciertas disciplinas y tecnología propias, que no permanecerán inalterables; cualquier función de mantenibilidad que se precie, debe dedicar tiempo y recursos a la investigación de mejoras en los métodos para conseguir, conservar y medir la mantenibilidad. Algunas áreas para tal investigación incluyen la búsqueda de técnicas estadísticas mejoradas, de nuevos y mejores métodos y aplicaciones de ensayos no destructivos, de dispositivos mejorados de pruebas funcionales y de inspección, de mejores precisiones de calibración e intervalos de calibración, así como del potencial e impacto en la mantenibilidad de nuevas técnicas de diseño, como la microminiaturización y la electrónica molecular. Hay muchas más áreas donde la investigación de mantenibilidad puede ser de gran valor.

4.8. Comentarios finales

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.

En este capítulo se ha tratado el tema de las responsabilidades del diseño, con un énfasis particular en los requisitos de mantenibilidad. Se han presentado las razones por las que la mantenibilidad inherente debe ser alta, y la necesidad de la mantenibilidad como una función independiente de comprobación y equilibrio del diseño, para asegurar que los requisitos y consideraciones de mantenibilidad consiguen una rápida y apropiada porción de atención del diseño. Más aún, se exploraron los métodos para diseñar un sistema mantenible y se revisaron los métodos, procedimientos y prácticas usadas para alcanzar y asegurar la mantenibilidad en el diseño.

En resumen, 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.

4.9. Estudio de un caso: mantenibilidad del tren TGV

Según Paul Monserie, Ingeniero General Adjunto al Director de Material Móvil de la SNCF: «Las previsiones técnicas permitirán la facilidad del mantenimiento, sólo si se planean desde el comienzo del diseño del material móvil.» En otras palabras, en vez de adoptar el diagrama secuencial (Figura 14), donde se descubren las condiciones y problemas de mantenimiento, solamente cuando el tren ha comenzado

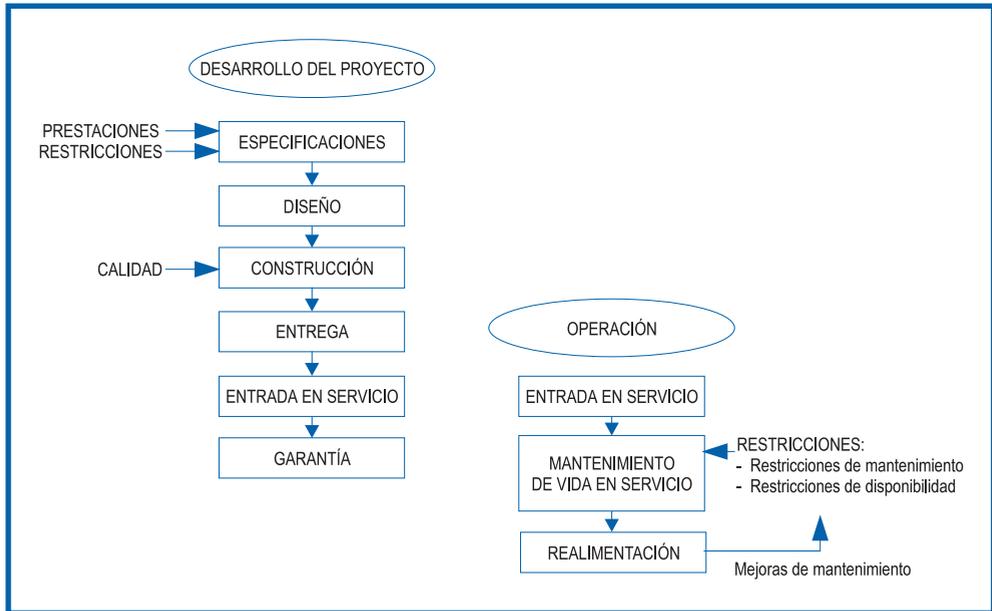


Figura 14 - DISEÑO Y OPERACIÓN COMO PROCESOS SEPARADOS -

ya su vida operativa, preferimos la estructura integrada mostrada en la Figura 15. De esta manera, las exigencias de mantenimiento se incorporan en las etapas iniciales, cuando se preparan las especificaciones y después, en todas las etapas siguientes de diseño y desarrollo. Este procedimiento no es nuevo en absoluto, pero las mejoras notables obtenidas en el TGV París-Sudeste se deben al hecho de que el método se aplicó como un principio esquemático.

En la práctica, los criterios aplicados a la mantenibilidad se seleccionan tras un exhaustivo análisis de los distintos tipos de fallos posibles, de todos los tipos de operaciones precisas de mantenimiento preventivo y correctivo, y de la forma en que se realizan. Estos criterios para la mantenibilidad se aplican a las composiciones de tren como unidad; este concepto se llama mantenibilidad «de a bordo del tren». Es necesario comentar que el concepto abarca el equipo auxiliar y las herramientas que ayudan al mantenimiento y completan los montajes necesarios para hacerlo mantenible.

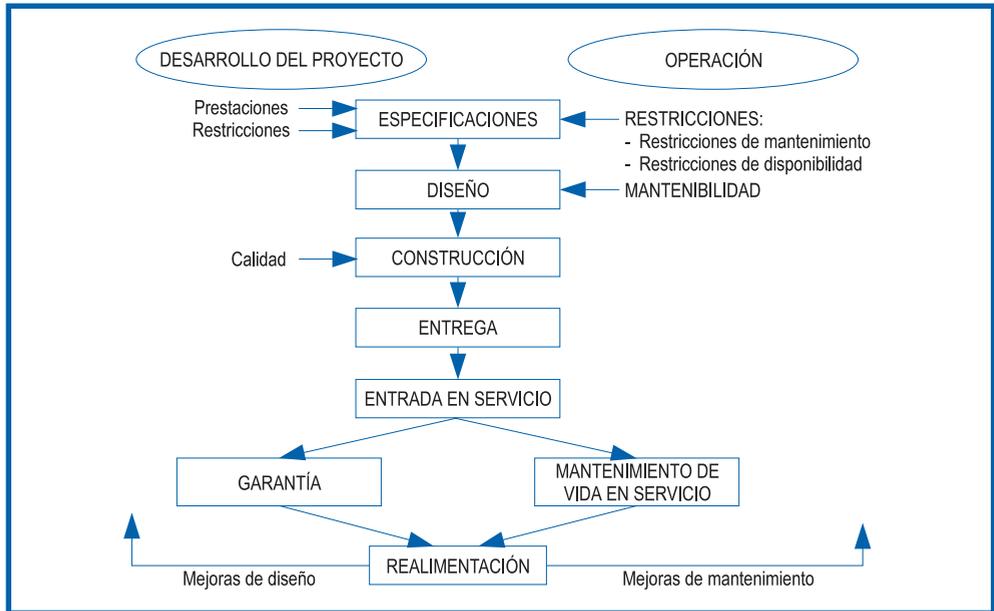


Figura 15 - DISEÑO Y OPERACIÓN INTEGRADOS CON MANTENIBILIDAD -

La sinergia existió desde el comienzo de cada proyecto del TGV, al asociar especialistas de mantenimiento con los equipos de diseño. Se adoptó una estructura de grupo de proyecto multidisciplinar, donde los ingenieros de mantenimiento jugaron un papel importante y oficialmente reconocido. Trabajaron directamente con ingenieros de diseño de material móvil y suministraron el beneficio de su experiencia, evitando así problemas y retrasos.

Como resultado, las provisiones y especificaciones de mantenibilidad se transformaron en documentos técnicos que definen el material móvil. Se basaban en análisis sistemáticos de experiencias pasadas, anotaciones de todas las provisiones técnicas que dificultaban los procedimientos de mantenimiento, y en soluciones ensayadas y probadas que deben incorporarse en el nuevo material móvil.

Sin embargo, el Departamento de Material Móvil de SNCF se encargó de integrar la mantenibilidad hasta un grado incluso mayor;

desde el comienzo de las investigaciones, y durante varios años, se destinó deliberadamente a los especialistas de mantenimiento a trabajar con los departamentos de investigación, desarrollo y diseño de material móvil.

Garantizaron que en la etapa de trazado o CAD, se incorporaban en las especificaciones de diseño soluciones que eran familiares para los ingenieros de mantenimiento. Al mismo tiempo recibieron y entregaron a los departamentos de mantenimiento el resultado de los trabajos y diagramas de la investigación inicial que serían útiles para desarrollar los procedimientos de mantenimiento y los programas de formación de personal, así como para definir y preparar instalaciones y equipos necesarios para el mantenimiento.

Los departamentos de investigación de la industria de ferrocarriles de Francia adoptaron el mismo procedimiento; sus innovaciones y las excelentes relaciones privilegiadas de los proveedores de equipos y subconjuntos con su principal cliente nacional, han dado resultados que han simplificado considerablemente el mantenimiento y han contribuido directamente a la reconocida relación coste-eficacia del sistema del TGV.

Tras más de cinco años de operación del TGV es posible evaluar en la realidad la mantenibilidad de los trenes TGV París-Sudeste. A continuación se muestran unos ejemplos.

A) Medidas para prevenir el desgaste y otros deterioros mecánicos eléctricos.

Las ruedas no sufren un alto grado de desgaste porque los materiales, geometría, lubricación y las fuerzas limitadas a que se someten las ruedas, especialmente con el dispositivo moderno de frenado, son tales que el rectificado se ha retardado hasta más allá de los 450.000 km (aproximadamente 280.000 millas). E incluso

entonces, las ruedas se rectifican de forma sencilla y de bajo coste, con tornos de control numérico montados en foso.

Al margen de otros avances en el rendimiento, se necesita menos vigilancia e intervención para la puesta a punto de las ruedas.

Los motores eléctricos de conmutación que necesitaban vigilancia, mantenimiento y sustitución cuando alcanzaban su período de revisión general, han sido reemplazados ahora por motores síncronos autoconmutados más potentes para el TGV del Atlántico, y motores asíncronos para todos los auxiliares.

Se ha eliminado la vigilancia visual e instrumental de los conmutadores, la mecanización de escobillas de repuesto, la sustitución de conmutadores desgastados o dañados, y especialmente el rebobinado de secciones. Se espera que la vigilancia de las piezas mecánicas de los nuevos motores sea muy simple y que la fiabilidad de los convertidores estáticos asociados esté completamente bajo control.

Los paneles indicadores de destino en el tren TGV del Sudeste son sistemas mecánicos controlados manualmente; se han reemplazado en el TGV del Atlántico por pantallas estáticas de cristal líquido basadas en microprocesadores, mediante control remoto por radio.

Esta característica es uno de los ejemplos de ahorros en organización y personal, que se esperan con el sistema TGV del Atlántico.

B) Medidas para facilitar la limpieza del tren.

Para el TGV, la limpieza mecanizada de la carrocería podría haber sido dificultosa por el contorno de cabecera y cola de los trenes. La mantenibilidad se alcanzó mediante la cinemática especial incorporada en las máquinas automáticas de lavado, y mediante un mecanismo automático que controla el ritmo de avance de los trenes al pasar a baja velocidad por los cepillos de limpieza.

La innovación de los lavabos no ha sido un obstáculo, ni para operaciones ni para mantenimiento: las instalaciones de evacuación automática subterránea no ha causado ningún problema.

Para proteger los componentes de la acumulación de suciedad, el equipo electrónico y los circuitos de potencia en el TGV del Atlántico se refrigeran en unidades selladas, llenas de un líquido refrigerante, que por tanto están protegidos del contacto directo con el aire de ventilación, para eliminar la polución y la difícil tarea de limpiar componentes.

C) Medidas de protección contra fallos.

- *Redundancia incorporada*: La mayoría del equipo de los trenes París-Sudeste presenta redundancia incorporada, como por ejemplo, en el sistema de energía, en los circuitos de mando y control, y en los equipos técnicos y auxiliares de bienestar de los pasajeros. Los componentes de reserva se conectan automáticamente si ocurre un fallo, sin causar interrupción alguna en la operación del tren. Este aspecto de la mantenibilidad está reforzado en el TGV del Atlántico por una instalación que guarda registro de los saltos producidos a componentes de reserva, y para algunas funciones se transmiten los datos al centro de mantenimiento.

- *Vigilancia automática*: En todos los trenes TGV, las funciones principales de seguridad (detección de incendios, daños mecánicos, inestabilidad) se vigilan automáticamente por el sistema de a bordo, para evitar fallos catastróficos y prevenir comprobaciones frecuentes y costosas que raramente detectan defectos. Este equipo, que afortunadamente es muy poco probable que se necesite, es de alta fiabilidad y tiene su propia instalación integrada de prueba automática. Para vigilar la temperatura de las cajas de cojinetes de los ejes en la línea de alta velocidad, se ha mostrado muy adecuada la solución de vigilancia automática a intervalos de 40 km (25 millas) a lo largo de la línea, que será usada de nuevo en la línea TGV del Atlántico. A pesar

de que se usa el término «detector de caja caliente», de hecho el sistema es una red automática termométrica de infrarrojos, cuyos datos se procesan en un ordenador central. Adicionalmente a su papel como detector de caja caliente de emergencia, el sistema puede suministrar al departamento de mantenimiento, en tiempo real, datos preventivos muy útiles de cualquier cambio anormal en la temperatura de las cajas de los ejes. Para limitar el impacto de un fallo del pantógrafo en el sistema de catenaria, una instalación de vigilancia automática, que se está probando actualmente y se desarrollará a corto plazo, detectará cualquier desgaste inusual localizado en la banda de contacto.

D) Medidas para incrementar la mantenibilidad.

- *Accesibilidad, modularidad:* Todo equipo y subconjunto debe agruparse en módulos a los que se pueda acceder por separado y convenientemente, y estar compuesto de piezas que se puedan conectar rápidamente para cualquiera de los tipos de conexiones: mecánicas, neumáticas, eléctricas y electrónicas. Por ejemplo, en el caso del tren TGV, los paneles del techo pueden desmontarse rápidamente; paneles de acceso laterales y numerosos puntos de inspección permiten todo tipo de inspecciones progresivas y sustitución de componentes en un corto espacio de tiempo. El equipo auxiliar de la locomotora y de los vagones de pasajeros está localizado de forma que las posturas de trabajo para el personal de mantenimiento sean ergonómicas, y en particular para que varios especialistas puedan desarrollar sus tareas de mantenimiento de forma simultánea, sin molestarte mutuamente.

- *Mantenibilidad de trenes articulados:* La estructura articulada de formación fija de los trenes TGV está particularmente bien adecuada a las altas velocidades, pero originalmente, en los primeros diseños, había quien temía que no fueran suficientemente flexibles durante la operación, si algún vehículo tenía que ser retirado para reparación. Cinco años de intensa operación y bajo coste de mantenimiento, han aclarado esta controversia. En muy pocas ocasiones se ha tenido que

retirar un vagón de pasajeros, y todas ellas han sido detectadas antes de la salida para realizar el servicio.

Sin embargo, cuando una instalación terminal, estación o taller de mantenimiento decide realizar esta experiencia, la práctica ha demostrado que, a causa de la saturación de las listas de material móvil y a la elevada ocupación de vías, la mejor solución desde el punto de vista operativo ha sido siempre asignar un tren de repuesto para reemplazar a otro.

La situación no sería diferente con un tren no articulado; más aún, en esta situación las múltiples conexiones entre vagones, y la complejidad de los pasillos entre vagones diseñados para altas velocidades, harían imposible retirar fácilmente un vagón y preparar otro, sin crear retrasos mayores en el servicio del tren.

Por contra, la mantenibilidad del material móvil del TGV francés y la buena adaptación de las instalaciones terminales, hacen posible poner el tren entero de nuevo en servicio en un razonable espacio de tiempo, mediante la sustitución de un componente que ha fallado en vez del vagón entero, incluso si lo que ha fallado es un eje o un «bogie». Generalmente este principio se aplica incluso al vagón de cola que es, sin embargo, un vehículo diferente dentro del tren articulado.

En los talleres del París-Sudeste se tarda aproximadamente una hora en cambiar un eje y no más de 1 hora y 30 minutos en cambiar un «bogie» remolque de un tren, incluyendo todas las operaciones asociadas.

Por tanto, sustitución de ejes y «bogies», lo que de hecho es la mejor solución tanto para trenes articulados como para vehículos convencionales.

- *Localización de averías rápida y precisa:* La primera generación de trenes TGV estaba ya equipada con equipos de prueba integrados

con diagramas de lógica de circuitos, lo que proporcionaba un buen rendimiento en la localización de averías. En los trenes TGV del Atlántico, las funciones de memoria asignadas a los distintos microprocesadores de circuitos de mando y de control, almacenan los valores de parámetros de operación cuando se produce un fallo. Esta instalación suministra un gráfico de fallos, garantiza un correcto diagnóstico de fallos y previene contra la reaparición de fallos intermitentes. El ordenador de a bordo del tren y los distintos equipos de pruebas forman un sistema exhaustivo de diagnóstico de fallos asistido por ordenador, aunque hay que señalar que el número de fallos debe ser mínimo.

E) Medidas preliminares de organización.

- *Documentación*: Sería erróneo pasar por alto un aspecto importante de la mantenibilidad: la documentación, que constituye un prerequisite esencial para la organización del mantenimiento. Si no se hicieran circular antes de la entrega del material móvil documentos, planos, descripciones técnicas, diagramas y manuales funcionales de apoyo, el equipo no sería mantenible y no podría ponerse en servicio sin crear un riesgo. En la SNCF en general, y especialmente para los trenes TGV, se dispuso una gran cantidad de esta información mucho antes de las fechas límites.

- *Reglas de mantenimiento*: Estos documentos se usan para hacer un examen preliminar de los servicios iniciales de mantenimiento y de los intervalos de mantenimiento esperados; los especialistas de mantenimiento los usan también para confeccionarse sus propios manuales de mantenimiento. Un material móvil moderno como el TGV se diseña mediante el uso de componentes que han sido probados y examinados extensamente, para garantizar la durabilidad, conociéndose los tipos de fallos que pueden ocurrir con más frecuencia. Por tanto, procede que los equipos de ingenieros y técnicos experimentados prevean dónde pueden presentarse los fallos y confeccionen reglas iniciales de mantenimiento. Por supuesto, en el período inicial que sigue a la entrada en servicio, estas reglas son voluntariamente más severas,

pero en la práctica se adaptan rápidamente a la situación y mejoran el coste-eficacia en un corto espacio de tiempo.

- *Instrucción y formación:* Esta preparación en dos etapas de la documentación técnica que especifica las prácticas de mantenimiento, es utilizada por los futuros equipos de gestión ya designados, para hacerse cargo de organizar una formación suplementaria del personal seleccionado para el taller central de los trenes. A esto le sigue un período en el que se simulan los servicios de mantenimiento y después, por un período de formación sistemática realizando estos servicios en subconjuntos y en los primeros conjuntos de trenes entregados.

F) Logros.

Aunque es bastante cierto que la fiabilidad del sistema y la durabilidad de los componentes desempeñan un papel clave en la calidad de servicio y la economía de la red TGV, es importante señalar que todas las medidas técnicas y organizativas para la mantenibilidad de los trenes han ayudado a garantizar un mantenimiento simple y de bajo coste, así como un grado razonable de indisponibilidad.

Las instalaciones planeadas para el mantenimiento del TGV París-Sudeste han demostrado ser altamente satisfactorias y su capacidad ha sido suficiente para ampliar la flota de 87 a 109 trenes, como consecuencia de los excelentes resultados comerciales.

La formación en los nuevos tipos de tecnología usados se organizó con antelación y el personal de mantenimiento se adaptó, poco a poco, a los problemas encontrados y a los cambios de cualificación.

La mantenibilidad de las herramientas de mantenimiento ha contribuido a la facilidad del trabajo de mantenimiento, un aspecto de bienestar que es vital para el esmero y profesionalismo precisos en este trabajo.

En los períodos de punta semanales, que de hecho dimensionan el tamaño de la flota, es preciso señalar que el número de trenes fuera de servicio no pasa del 6% de la flota. Esta cifra se corresponde con las expectativas, pero se tiene la intención de mejorar en este campo.

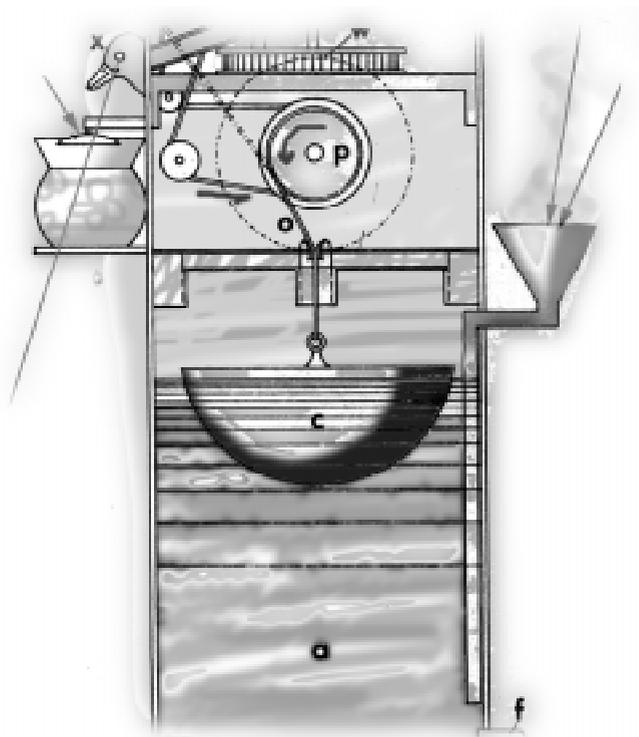
El gasto total de mantenimiento para un tren de 10 vagones, incluida su limpieza, es en la actualidad de menos de 8 francos por kilómetro.

El mantenimiento de componentes elimina revisiones generales periódicas de los trenes, que entrarán en los talleres después de 8 años de servicio, principalmente para restaurar los interiores y reacondicionar los exteriores. Estas operaciones empezarán pronto e incrementarán el coste medio estimado en 3 francos por kilómetro. Los resultados son ya satisfactorios, pero serán mejorados en el TGV Atlántico.

La mantenibilidad y todas las medidas relacionadas con ella, forman un nuevo enfoque que exige relaciones abiertas y activas entre las partes implicadas y representa un desafío en términos de cualificaciones, organización, y programación, que la industria de ferrocarriles franceses y el Departamento de Material Móvil de la SNCF han sostenido con éxito para el material móvil del TGV.

5

La asignación de mantenibilidad



La asignación 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.

La asignación de requisitos debe realizarse como uno de los primeros pasos en el proceso de diseño; se aplica a muchos requisitos de diseño, como son peso, volumen, coste, fiabilidad, mantenibilidad, factores de apoyo logístico, consumo de energía, etc.

Mediante la asignación de estos requisitos del sistema a niveles inferiores de descomposición, se consigue la selección de objetivos apropiados para el trabajo de los diseñadores de subsistemas, minimizando o previniendo esfuerzos de diseño inapropiados. En la práctica, algunos objetivos asignados pueden no ser alcanzables, debiendo revisarse entonces su(s) asignación(es), con los efectos consecuentes en la de otros. Por ello, la asignación es un proceso iterativo. A continuación se indican algunas de las razones para llevar a cabo la asignación de mantenibilidad:

- Permite distribuir a niveles inferiores los requisitos de mantenibilidad del sistema.
 - Permite que los diseñadores y subcontratistas trabajen en objetivos de mantenibilidad apropiados para sus subsistemas.
-

- 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 diseño 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.

Con el paso de los años, se han desarrollado varios métodos para la asignación de la mantenibilidad, intentando cada uno de ellos abordar los objetivos señalados anteriormente. El objetivo principal de este Capítulo es revisar los métodos existentes y presentar el método de asignación de mantenibilidad basado en la programación lineal, que elimina los puntos más débiles de los métodos usados habitualmente.

5.1. Las técnicas actuales de asignación de mantenibilidad

5.1.1. DEF-STAN 00-41 (ediciones 2 y 3)

La norma DEF-STAN 00-41 es un documento guía que establece las «Prácticas y Procedimientos del Ministerio de Defensa para la Fiabilidad y Mantenibilidad» para su uso en el diseño, desarrollo y producción de equipos para el Ministerio de Defensa del Reino Unido. El punto 2 de esta Norma de Defensa comprende 6 apartados, y el Apartado 6 establece las prácticas y procedimientos para el progreso de la mantenibilidad.

El método general de asignación de la mantenibilidad indica la anotación de las actividades de mantenibilidad derivadas de los diagramas de flujo del mantenimiento, con estimaciones de tiempos de realización de esas actividades. No se da un método específico de estimación de tiempos, aparte de declaraciones de que «el proceso de asignación de la mantenibilidad reconocerá que los elementos que son menos fiables deben ser los más mantenibles» y de que «puede haber datos de diseño insuficientes en esta etapa (inicial) para alcanzar estimaciones precisas (de tiempos para realizar actividades), y en estos casos los valores tendrán que ser asignados en base a experiencias previas y/o juicios de ingeniería. Se usan estas estimaciones junto con las cifras de fiabilidad asignadas, para deducir el tiempo medio de mantenimiento correctivo activo (Mean Active Corrective Maintenance Time, MACMT), de cada elemento componente, y de aquí la adecuación del sistema a los objetivos de mantenibilidad.

El Punto 3 de esta Norma de Defensa se publicó en Junio de 1993 y adopta el mismo método de asignación de requisitos de mantenibilidad descrito en el punto anterior.

5.1.2. MIL-STD 470B

La norma MIL-STD 470B es un documento de guía, que establece los requisitos del Departamento de Defensa para las actividades a considerar en los programas de mantenibilidad de sistemas y equipos suministrados bajo contratos del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América.

La tarea 202 trata de la asignación de la mantenibilidad; la única guía dada sobre métodos de estimación de valores de los parámetros de mantenibilidad asignados, es que estas estimaciones pueden deducirse de predicciones, datos de componentes similares, experiencia en componentes similares o estimaciones de ingeniería basadas en experiencias y juicios personales, así como una declaración de que

todos los valores de mantenibilidad asignados deben ser consistentes con el modelo de mantenibilidad matemática desarrollado en la tarea 201 de la MIL-STD 470B.

Para este modelo de mantenibilidad, la tarea 201 requiere considerar las características de diseño que impacten en la mantenibilidad (como frecuencia de fallos, tiempo de mantenimiento, probabilidad de detección de fallos, etc.), el nivel de mantenimiento considerado, y la relación entre los parámetros de mantenibilidad especificados y los parámetros operativos del sistema (como la soportabilidad logística, mano de obra de mantenimiento, plan de mantenimiento, etc.). La complejidad del modelo variará de acuerdo con la complejidad del equipo considerado.

5.1.3. *Literatura publicada*

Blanchard [2, 3] propone un método de asignación de mantenibilidad que incorpora la contribución de las tasas de fallo del elemento componente a la tasa de fallos del sistema global, y una estimación subjetiva de las características de mantenibilidad (como el MTTR) de los elementos componentes considerados. En esta etapa del ciclo de vida del sistema, no se conocen las características inherentes del diseño del sistema que contribuyen a las características de mantenibilidad, por lo que se 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. Este método general puede tener que ser modificado para satisfacer los objetivos asignados de mantenibilidad del elemento que sean irreales, debido, por ejemplo, a restricciones económicas o tecnológicas, empleándose un proceso iterativo de reasignación y evaluación para llegar a una solución aceptable.

$$\bar{M}_{ct} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i \times \bar{M}_{cti}}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i} \quad (5.1)$$

donde: M_{ct} es el tiempo medio de mantenimiento correctivo activo (o tiempo medio de reparación) para el sistema, M_{cti} es el MACTM (o MTTR) para el elemento i -ésimo, n_i es la cantidad de elementos i -ésimos en el sistema, λ_i es la tasa de fallos para el elemento i -ésimo, y k es el número de tipos diferentes de elementos considerados en el sistema.

5.1.4. *British Standard 6548*

La norma British Standard 6548 parte 2 (1992) es una «Guía para los estudios de Mantenibilidad durante la fase de diseño» e incorpora la IEC 706-2 parte 2, sección 5 publicada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

El Anexo A de la BS 6548 parte 2, sugiere 3 métodos de asignación de mantenibilidad para abordar las circunstancias siguientes:

- a. un diseño nuevo, donde no se dispone de conocimientos previos sobre las características de la mantenibilidad de los distintos elementos componentes.
- b. un diseño parcialmente nuevo, donde se dispone de conocimientos previos sobre las características de mantenibilidad de algunos de los distintos elementos componentes.
- c. un diseño donde se dispone de conocimientos previos sobre todos los elementos componentes, es decir, se espera que el elemento i muestre un MACMT (o MTTR) de M_i .

Como para métodos anteriores, la asignación se basa en la complejidad relativa de los elementos componentes, que, en ausencia de otras medidas, se representa mediante las tasas de fallo del elemento. Por lo tanto, el valor asignado del MACMT (o MTTR) es inversamente proporcional a la tasa de fallos, es decir, proporcional al MTBF.

5.1.5. Método 1 - diseño nuevo

Para k elementos componentes.

$$M_i = \frac{M \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}{k n_i \lambda_i} \quad (5.2)$$

donde: M es el objetivo de Tiempo Medio de Mantenimiento Correctivo Activo (o Tiempo Medio de Reparación) para el sistema, M_i es el MACMT (o MTTR) calculado para el i -ésimo elemento, n_i es la cantidad de elementos i -ésimos en el sistema, λ_i es la tasa de fallos para el elemento i -ésimo y k es el número de tipos diferentes de elementos en el sistema.

5.1.6. Método 2 - diseño parcialmente nuevo

Se dispone de conocimiento previo sobre $l < k$ elementos. Entonces para el elemento j :

$$M_j = \frac{\left(M \sum_{i=1}^k n_i \lambda_i - \sum_{i=1}^l n_i \lambda_i M_i \right)}{(k-l) n_j \lambda_j} \quad j=l+1, \dots, k \quad (5.3)$$

donde l es el número de tipos distintos de elementos en el sistema para los que no se dispone de conocimientos previos.

5.1.7. Método 3 - conocimientos previos disponibles

Se dispone de conocimientos previos para los k elementos, es decir, se espera que el elemento i muestre un $MTTR$ de M_i . Entonces se calcula,

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^k M_i n_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i} \quad (5.4)$$

Cuando M es menor o igual al valor objetivo del sistema (M), se cumple el requisito del sistema. Si el valor objetivo del sistema no se cumple, debe revisarse la asignación o tomarse otras acciones correctivas.

Téngase en cuenta que este método es idéntico al propuesto por Blanchard en la sección anterior, salvo que Blanchard [5,6] indica que se estime el valor de M_i subjetivamente y se refine de forma iterativa.

5.2. Desventajas de los métodos actuales

1. El método que se basa solamente en los únicos elementos componentes de un sistema, es decir, el método 1 de la

BS 6548 ($M_i = \frac{M \sum n_i \lambda_i}{k n_i \lambda_i}$), no funciona para valores elevados

de n y k . Se puede demostrar que según crece el sistema, disminuye el tiempo de mantenimiento asignado y los objetivos se vuelven menos reales y alcanzables.

2. Los métodos actuales no permiten el establecimiento de límites de valor mínimo.

Los valores mínimos podrían establecerse e introducirse como parte del cálculo del método 2 de la BS 6548, pero ello limita entonces el cálculo y produce resultados basados en la suposición de que los valores mínimos establecidos se alcanzarán y no se rebasarán. No permite ningún ajuste de este tiempo, aparte del incremento o decremento del (los) valor(es) mínimo(s), realizando los cálculos de nuevo y comparando los resultados. Este proceso es extremadamente laborioso, especialmente cuando los valores mínimos puedan diferir para cada elemento, y es improbable la

obtención de la mejor solución. Además, este proceso no permite su aplicación a modelos de tiempos complejos.

3. Los métodos actuales no permiten el establecimiento satisfactorio de límites de valor máximo.

Los valores máximos podrían establecerse e introducirse como parte del cálculo del método 2 de la BS 6548, pero de nuevo ello limita el cálculo y produce resultados basados en la suposición de que los valores máximos establecidos se alcanzarán y no se rebasarán. No permite ningún ajuste de este tiempo aparte del incremento o decremento del (los) valor(es) máximo(s), realizando los cálculos de nuevo y comparando los resultados. Este proceso es extremadamente laborioso, y alcanzar la mejor solución es improbable. Además, este proceso no permite su aplicación a modelos de tiempos complejos, especialmente cuando los valores máximos pueden diferir para cada elemento.

4. Confianza en el juicio subjetivo.

El otro método general es estimar el valor, usando conocimientos personales o previos como guía (es decir, hacer una estimación de experto), aplicar a esta estimación un factor de complejidad (tasa de fallos) y evaluar el resultado para observar el impacto en el sistema; si cumplen los requisitos del sistema con cifras razonables se acepta la estimación, en otro caso, se reitera hasta que se obtiene una solución aceptable. Este método depende mucho del juicio subjetivo de la persona que asigna los objetivos (es decir, no puede reproducirse) o de la disponibilidad de datos o conocimientos previos o de detalles de las características de diseño. Aunque este método tiene sus aplicaciones, no se debe prestar una confianza excesiva a los juicios subjetivos; además, puede que no se disponga de la información

necesaria para hacer esos juicios cuando se trata de realizar una asignación de mantenibilidad.

5.3. Nueva técnica propuesta - programación lineal (PL)

Teniendo en cuenta el análisis de los métodos actualmente usados, está claro que se necesita una mejora.

5.4. Aplicación de la PL a la asignación de mantenibilidad

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 [7], 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:

- a. los efectos de variables conocidas o impuestas,
 - b. los efectos de disminuir o aumentar los valores máximos permisibles de los tiempos de mantenimiento,
-

- c. el efecto de aumentar o disminuir los valores mínimos factibles de los tiempos de mantenimiento,
- d. los efectos de factores de complejidad alternativos,
- e. 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.

5.5. Ventajas de usar la PL

El uso de la Programación Lineal en esta aplicación satisface muchas de las características deseables para un método nuevo, mencionadas con anterioridad [7]. Las ventajas principales de un método de asignación de mantenibilidad basado en la programación lineal son las siguientes:

- a. 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.
 - b. Permite la variación independiente de los parámetros del elemento componente, y la evaluación de los efectos de estas variaciones.
 - c. Es flexible y puede adaptarse para diferentes escenarios, mediante la modificación del modelo de PL.
 - d. Permite el establecimiento de valores máximos y mínimos.
-

- e. Permite modelizar el sistema de forma que su tamaño no tenga un efecto perjudicial en los cálculos.
- f. Permite considerar factores de complejidad.
- g. 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.
- h. Permite insertar datos conocidos o el conocimiento previo de un elemento.
- i. Minimiza la excesiva fiabilidad inicial en estimaciones subjetivas, conservando suficiente flexibilidad para acomodar datos de esas fuentes si se quiere.
- j. Produce resultados que pueden repetirse.
- k. 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:

- a. 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 IBM (o compatible).
-

- b. La modificación del modelo de PL requiere conocimientos de esta disciplina, aunque generalmente se necesita solamente un nivel relativamente básico.
- c. 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.

5.6. Observaciones finales

La técnica y el algoritmo propuestos se han aplicado a varios problemas teóricos y prácticos (que, por razones de espacio, no se han detallado en este documento, aunque la referencia 9 contiene algunos ejemplos) y han producido resultados satisfactorios. Además, el método y algoritmo propuestos han producido resultados favorables cuando se comparan con los métodos actuales, como se demuestra en el ejemplo que sigue.

Claramente, el método propuesto ha mostrado ser válido y es posible profundizar el trabajo en el refinamiento y producción de un modelo más «general». Más aún, se estima que la técnica y algoritmo propuestos son también aplicables a sistemas grandes y complejos, con numerosas interacciones que afecten a la mantenibilidad, y que, a medida que las interacciones y los compromisos se vuelven más complejos (aunque siempre lineales), se hace más valioso un método de programación lineal, cuando los métodos actuales dejan de ser útiles.

5.7. Ejemplo ilustrativo

Usando como ejemplo un sistema que consta de 8 elementos componentes (unidades A - H), cuya contribución proporcional en tasa

de fallos se conoce, con un requisito de 30 minutos para el MACMT del sistema, preferiblemente sin acciones de mantenimiento que duren más de 120 minutos. Además hay un tiempo mínimo de mantenimiento factible de 5 minutos, debido a la necesidad de hacer una prueba del sistema previamente a cualquier acción de mantenimiento más profunda. Se calcularon los valores asignados para alcanzar un requisito de MACMT del sistema de 30 minutos, usando el método 1 de la BS 6548 y según el modelo de programación lineal, y se compararon los resultados, que se muestran en la Tabla 13.

Los resultados obtenidos de los cálculos para los elementos A, B, C, D y E según el método 1 eran menores que los correspondientes al modelo de programación lineal, mientras que los resultados del método 1 para los elementos F, G y H excedían ampliamente los resultados del modelo de PL. Estos valores excesivos eran el resultado de la imposibilidad de fijar los límites de valor máximo usando el método 1 actual, lo que también contribuyó a los pobres resultados para los elementos A, B, C, D y E. Además el método 1 actual no permite fijar los límites de los valores mínimos que, aunque no tuvieron un efecto en este ejemplo, podían tener un impacto significativo en los resultados calculados, dependiendo del equipo y del valor del límite mínimo.

En resumen, el uso del método 1 produjo resultados que no eran óptimos ni reales, mientras que el uso del método de programación lineal produjo resultados que maximizaban el tiempo que podía asignarse a cada elemento, cumpliendo los requisitos del sistema global.

Elemento	Nº de elementos por sistema (n)	Tasa de fallos $\lambda_i(10^{-3})$	Tasa total de fallos (n).(λ_i)	Resultados del método 1 BS 6548	Resultados del método 1 redondeados	Resultados de la programación lineal	Resultados de la programación lineal redondeados
Unidad A	1	0,3430	0,3430	10,93	10	17,63	20
Unidad B	1	0,2032	0,2032	18,45	20	29,76	30
Unidad C	1	0,1112	0,1112	33,72	30	54,38	50
Unidad D	1	0,2956	0,2956	12,69	10	20,46	20
Unidad E	1	0,0439	0,0439	85,42	85	123,96	120
Unidad F	1	0,0014	0,0014	2,678,57 (> 44 hrs.)	-----	120,00	120
Unidad G	1	0,0001	0,0001	37,500,00 (625 hrs.)	-----	120,00	120
Unidad H	1	0,0016	0,0016	2,343,75 (>39 hrs.)	-----	120,00	120
			1,0000				

Tabla 13 - ASIGNACIÓN DE OBJETIVO DE MANTENIBILIDAD -

6

La predicción de las medidas de mantenibilidad



El mayor reto al que deben enfrentarse los ingenieros de mantenibilidad es la predicción de las medidas de mantenibilidad relacionadas con tareas de mantenimiento en: futuros productos en la etapa inicial de diseño y modificaciones para mejora de un elemento/sistema existente.

Este Capítulo responde al reto, proponiendo una metodología nueva para la predicción rápida y precisa de las medidas de mantenimiento, y para la identificación de los recursos precisos en la consecución de las tareas de mantenimiento consideradas. El método propuesto se basa en las medidas de mantenibilidad relativas a las actividades de mantenimiento componentes, y en el diagrama de bloques de actividades de mantenimiento aplicable a la tarea de mantenimiento, cuyas actividades se realizan: simultáneamente, secuencialmente y de forma combinada. El método presentado podría ser usado con éxito en la etapa inicial del diseño, cuando la mayoría de la información disponible se basa en la experiencia previa, así como en la etapa en que se completa el diseño y se realizan pruebas, a fin de obtener datos de mantenibilidad para la configuración de sistema adoptada. Se demostrará la metodología propuesta mediante un ejemplo numérico «de la vida real».

Para ilustrar el concepto de tarea de mantenimiento presentado en el capítulo 1, se usará el mismo ejemplo aquí. Está relacionado con la sustitución de una rueda en un turismo pequeño, realizada por los estudiantes de ingeniería en la Universidad de Exeter [8].

El análisis estadístico de los datos observados muestra que la tarea de mantenimiento considerada podía modelizarse con la distribución de probabilidad de Weibull, con parámetro de escala $A_m=50$, y parámetro de forma, $B_m = 3,4$. La función de mantenibilidad, para esta tarea específica, tendrá la siguiente forma:

$$M(t) = P(TTR \leq t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{350}\right)^{3,4}\right) \quad (6.1)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (2.2) y (2.3), se obtuvieron los valores numéricos de otras medidas de mantenibilidad que se muestran en la Tabla 14, donde: TTR_5 , TTR_{50} , y TTR_{90} son los tiempos de inmovilización, causados por la sustitución de la rueda, durante los que el 5%, 50% y 90% de los usuarios completarán con éxito esta tarea.

Es necesario hacer hincapié en que las medidas de mantenibilidad anteriores se obtienen para una tarea de mantenimiento realizada

MTTR	TTR ₅	TTR ₅₀	TTR ₉₀
314.4	206	167	232

Tabla 14 - MEDIDAS EN SEGUNDOS
DE MANTENIBILIDAD PARA LA TAREA ANALIZADA -

en un sistema que ya existe, esto es, según pruebas reales. Durante esta etapa del ciclo de vida del sistema, solamente es posible cuantificar las características de mantenibilidad, pero las oportunidades para una mejora considerable se reducen prácticamente a cero.

La experiencia nos dice que las mejores oportunidades para lograr un impacto en las características de la mantenibilidad, se encuentran en la etapa de diseño. Por consiguiente, el reto más importante para los ingenieros de mantenibilidad es predecir rápida y precisamente las medidas de mantenibilidad de la futura tarea de mantenimiento, en la etapa inicial de diseño, cuando es posible hacer cambios y modificaciones sin un coste adicional significativo.

Esta es una tarea de predicción muy difícil, debido a la compleja interacción entre las secuencias de actividades en cada tarea y a las disposiciones para el reparto de recursos de mantenimiento. Así, el objetivo principal de este capítulo es presentar una metodología para la predicción rápida y precisa, en la etapa de diseño, de las medidas de mantenibilidad de las tareas de mantenimiento de futuros sistemas, basándose en las correspondientes medidas de las actividades de mantenimiento componentes.

6.1. Diagrama de bloques de la actividad de mantenimiento

De acuerdo con la metodología desarrollada en este capítulo, cada tarea de mantenimiento se considerará como el conjunto de las actividades de mantenimiento componentes. Para analizar las características de mantenibilidad de la tarea de mantenimiento en consideración, se introducirá el concepto de *diagrama de bloques de la actividad de mantenimiento*, (Maintenance Activity Block Diagram, MABD). Es una representación esquemática de la tarea de mantenimiento, donde se representa mediante un bloque cada una de las actividades de mantenimiento de las que consta. La relación entre bloques se determina por el orden en que cada uno de ellos debe ser

ejecutado. 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. El tiempo necesario para la finalización de cada actividad es irrelevante para el tamaño del bloque.

Basándose en la secuencia en que se realizan las actividades de mantenimiento, todas las tareas de mantenimiento podrían clasificarse y definirse, según Knezevic [8], como:

- 1) Tarea de mantenimiento simultáneo: representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente independientes, realizándose todas ellas concurrentemente.
- 2) Tarea de mantenimiento secuencial: representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente dependientes, realizándose todas ellas en un orden predeterminado.
- 3) Tarea de mantenimiento combinado: representa un conjunto de actividades de mantenimiento, algunas de las cuales se realizan en secuencia y algunas simultáneamente.

6.1.1. *Mantenimiento simultáneo*

El mantenimiento simultáneo representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente independientes, realizándose todas ellas concurrentemente.

La definición anterior describe completamente la relación entre las actividades componentes, y establece claramente que todas las actividades comienzan al mismo tiempo y se realizan simultánea pero independientemente las unas de las otras. La tarea de mantenimiento se completa cuando todas las actividades componentes han sido completadas, como se muestra en la Figura 16.

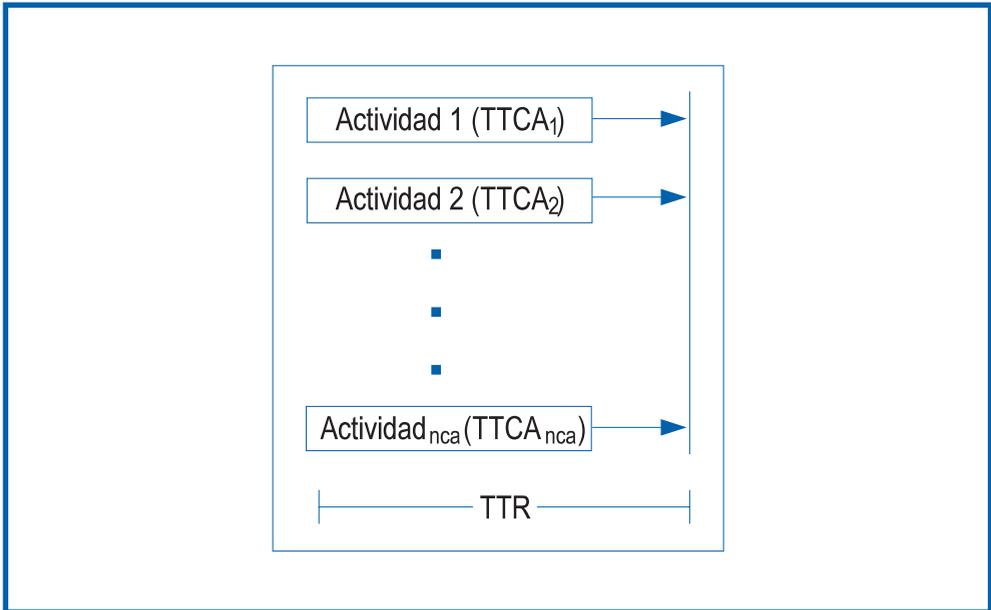


Figura 16 - MABD PARA TAREA DE MANTENIMIENTO SIMULTÁNEO -

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.

Para ilustrar la tarea de mantenimiento simultánea se analizará una típica parada en «boxes» de un coche de carreras de Fórmula 1. Durante el transcurso de una carrera, los coches harán una o más paradas en sus «boxes». Cada parada consta de la sustitución preventiva del conjunto de las cuatro ruedas, la limpieza del parabrisas, y el llenado del depósito de combustible. Como la carrera sólo se pelea en la pista y se pierde en «boxes», todas las actividades relacionadas con la parada en «boxes» se realizan simultáneamente. La rapidez de esta tarea puede, en ocasiones, significar la diferencia entre la primera y la segunda posición en la carrera. Quizás el ejemplo más conocido, en tiempos recientes, fue la pérdida de la rueda por Nigel Mansell en la calle de «boxes» en Estoril durante el Gran Premio de Portugal de 1991.

6.1.2. Mantenimiento secuencial

El mantenimiento secuencial representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente dependientes, realizándose todas ellas en un orden predeterminado.

La definición anterior describe completamente la relación entre las actividades componentes, y establece claramente que cada actividad subsiguiente comienza después de la realización de la actividad previa. Así, ninguna de las actividades subsiguientes puede realizarse antes de la realización de la actividad previa. La tarea de mantenimiento se culmina cuando la última actividad se ha completado, como se muestra en la Figura 17.

Un ejemplo típico de tarea de mantenimiento secuencial es la sustitución de la rueda de un coche, donde las actividades deben realizarse en una secuencia estrictamente determinada (ver ejemplo

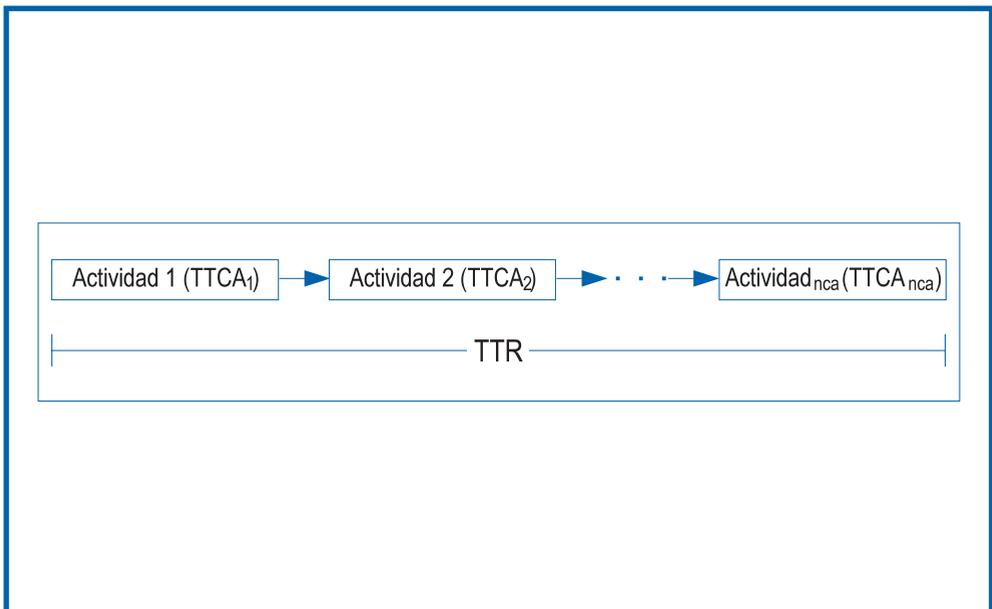


Figura 17 - MABD PARA TAREA DE MANTENIMIENTO SECUENCIAL -

en el Capítulo 1). Claramente, es imposible desmontar la rueda antes de retirar las tuercas/tornillos y elevar la rueda del suelo.

6.1.3. *Mantenimiento combinado*

El mantenimiento combinado representa un conjunto de actividades de mantenimiento, algunas de las cuales se realizan en secuencia y algunas simultáneamente.

La definición anterior describe totalmente la relación entre actividades componentes, y afirma claramente que las actividades se realizan en un orden combinado.

La mayoría de tareas de mantenimiento pertenecen a esta categoría, especialmente hoy en día, cuando los sistemas de ingeniería se vuelven más complejos y, por consiguiente, sus tareas de mantenimiento necesita niveles más altos de especialización, como se muestra en la Figura 18.

Un ejemplo típico de tarea de mantenimiento combinado es la revisión de 6.000 millas (10.000 km) requerida en los automóviles por sus fabricantes. Esta tarea consta de actividades que están relacionadas con: motor, transmisión, frenos, paneles de carrocería, elementos eléctricos, etc. Así, todas las actividades necesarias se realizan simultáneamente y se termina toda la tarea cuando los especialistas del equipo culminan todas las actividades correspondientes.

6.2. Análisis de la tarea de mantenimiento

Se usarán las siguientes designaciones para deducir las expresiones de predicción de las características de mantenibilidad, independientemente del tipo de tarea de mantenimiento:

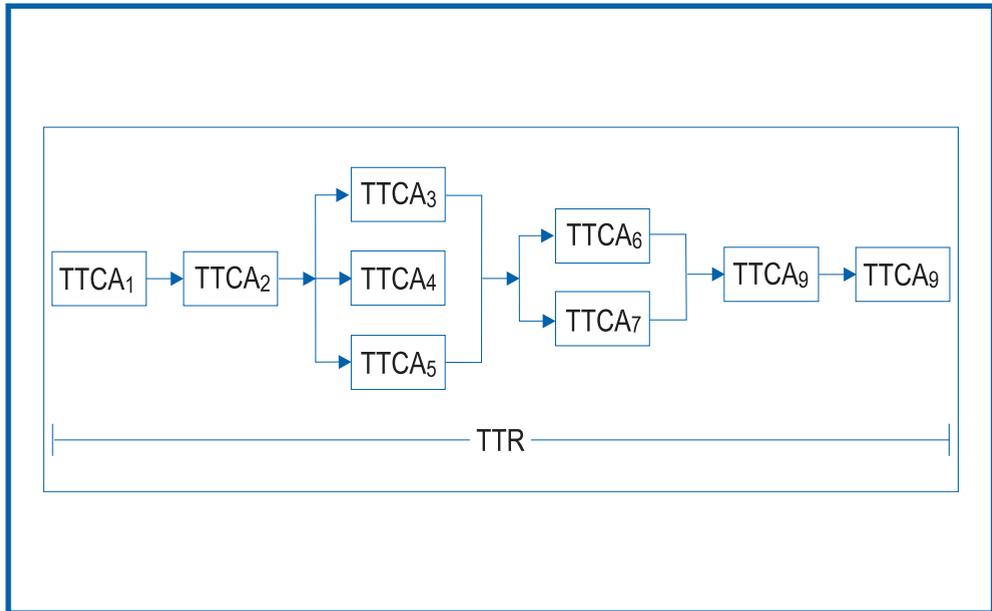


Figura 18 - MABD PARA TAREA DE MANTENIMIENTO COMBINADO -

$TTCA_i$, variable aleatoria que representa el tiempo para completar la actividad, i ;

$AC_i(t)$, función de finalización de la actividad i -ésima del mantenimiento;

nca , es el número de actividades de que consta.

En el Capítulo 3 se definieron varias características de mantenibilidad, pero todas ellas están relacionadas con una única variable aleatoria, TTR . La metodología presentada proporciona un medio para la predicción de estas características, basándose en las correspondientes características de las actividades de mantenimiento componentes. Así, el tiempo necesario para la realización de cada tarea de mantenimiento se define mediante la variable aleatoria TTR , y el tiempo correspondiente relacionado con cada actividad de mantenimiento se define mediante la variable aleatoria $TTCA$. Si analizamos las

ecuaciones (2.1), (2.2), (2.3) y (2.4), está claro que todas ellas están completamente definidas por la función de mantenibilidad. Por tanto, la parte restante del capítulo se concentrará solamente en la metodología para la deducción de las expresiones de la función de mantenibilidad.

6.3. Medidas de mantenibilidad para tareas de mantenimiento simultáneo

La definición de tarea simultánea afirma claramente que todas las actividades comienzan al mismo tiempo, y que se realizan simultánea pero independientemente las unas de las otras. La tarea de mantenimiento finaliza cuando se han completado todas las actividades de que consta.

Las medidas de mantenibilidad de la tarea cuyas actividades se realizan simultáneamente, pueden deducirse de las medidas correspondientes de las actividades componentes. Así, la función de mantenibilidad de la tarea de mantenimiento, $M(t)$, definida en la ecuación (6.1), representa la probabilidad de que la tarea considerada se finalice con éxito antes de un cierto instante de tiempo t . Al mismo tiempo, $M(t)$ podría representarse como la intersección de sucesos cuyas probabilidades de realización se definen mediante las probabilidades acumulativas, $AC_i(t) = P(TTCA_i \leq t)$. Ya que la tarea considerada se realizará si, y sólo si, todas las actividades componentes se completan en el instante de tiempo fijado t , o antes, en el caso en que las variables aleatorias $TTCA_i$, donde $i = 1, \dots, nca$, representan sucesos independientes, la función de mantenibilidad de la tarea también podría representarse como:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= P(TTR \leq t) \\
 &= P(TTCA_1 \leq t \cap TTCA_2 \leq t \cap TTCA_3 \leq t \cap \dots \cap TTCA_{nca} \leq t) \\
 &= P(TTCA_1 \leq t) \times P(TTCA_2 \leq t) \times \dots \times P(TTCA_{nca} \leq t) \\
 &= \prod_{i=1}^{nca} P(TTCA_i \leq t) \\
 &= \prod_{i=1}^{nca} AC_i(t)
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Es necesario subrayar que la expresión anterior puede ser muy compleja. La razón de ello es el hecho de que las funciones de finalización de la actividad, $AC_i(t)$, donde $i = 1, \dots, nca$, pueden definirse mediante cualquier distribución teórica de probabilidad, y en la mayoría de los casos su producto no puede expresarse mediante ninguna función de distribución conocida.

6.4. Medidas de mantenibilidad para tareas de mantenimiento secuencial

La definición de la tarea secuencial describe completamente la relación entre sus actividades y establece claramente que cada actividad comienza tras la finalización de la actividad previa. Así, ninguna de las actividades puede realizarse antes de la culminación de la actividad previa. La tarea de mantenimiento finaliza cuando se ha realizado la última actividad.

Las medidas de mantenibilidad de una tarea de mantenimiento, cuyas actividades componentes se realizan secuencialmente, pueden deducirse de las medidas de mantenibilidad de sus actividades. Así, la función de mantenibilidad de la tarea de mantenimiento, $M(t)$, cuyas actividades componentes se realizan en una secuencia determinada, que representa la probabilidad de que la funcionabilidad se recuperará en el instante de tiempo t , puede representarse también como una suma de sucesos de variables aleatorias independientes $TTCA_i$, donde $i = 1, \dots, nca$. Según los principios de la teoría de renovación, [12], la función de mantenibilidad de la tarea es igual a la nca -ésima convolución de las actividades componentes, y así

$$\begin{aligned} M(t) &= P(TTR \leq t) \\ &= P(TTCA_1 + TTCA_2 + TTCA_3 + \dots + TTCA_{nca} \leq t) \quad (6.3) \\ &= M^{nca}(t) \end{aligned}$$

La i -ésima convolución de las actividades de mantenimiento componentes, $M^i(t)$, puede determinarse según la siguiente expresión [12]:

$$M^i(t) = \int_0^t M^{i-1}(t-t_i) dAC_i(t_i) \quad (6.4)$$

donde: $i = 1, \dots, nca$ y $M^1(t) = AC_1(t)$.

Es necesario subrayar que la expresión anterior puede ser muy compleja. La razón de esto es el hecho de que las funciones de mantenibilidad de sus actividades, $AC_i(t)$ donde $i = 1, \dots, nca$, pueden definirse mediante cualquier distribución teórica de probabilidad, y en la mayoría de los casos su convolución no puede calcularse analíticamente con facilidad.

6.5. Medidas de mantenibilidad para tareas de mantenimiento combinado

Como la definición de la tarea de mantenimiento combinado sugiere, es una combinación de actividades de mantenimiento, algunas de las cuales se realizan simultáneamente y otras siguen una secuencia predeterminada. Así, la función de mantenibilidad para la tarea de mantenimiento combinado depende del diagrama de bloque de las actividades de mantenimiento y de las funciones de realización de las actividades consideradas.

La mayoría de las tareas de mantenimiento pertenecen a esta categoría, especialmente ahora en que los sistemas de ingeniería se vuelven más complejos y por consiguiente, sus tareas de mantenimiento requieren un nivel superior de especialización.

6.6. Ejemplo ilustrativo

Para demostrar la factibilidad de la metodología propuesta usaremos el ejemplo relacionado con la tarea de mantenimiento de la sustitución de una rueda en un turismo pequeño [8]. La lista de actividades específicas que deben ser realizadas y su secuencia, se muestran en la Tabla 1.

De acuerdo con la experiencia acumulada del modelo expuesto previamente, y la disposición del diseño, se pueden calcular los valores previstos del tiempo medio de realización de cada una de sus once actividades, $MTTCA_i$. Durante esta etapa del diseño, no se conoce el tipo exacto de la distribución de probabilidad que podría emplearse para representar cada actividad. Por ello, es razonable asumir que todas las actividades de mantenimiento podrían modelizarse mediante la distribución normal. Los valores numéricos de la desviación típica para cada tarea, $SDTTCA_i$, reflejan la dispersión de los datos entre todos los usuarios potenciales, sus diferencias físicas y mentales, así como la influencia del clima, radiación solar, lluvia, sol, y muchos otros factores que pueden tener algún impacto. En la Tabla 15 se muestran los valores basados en la experiencia, que toman en consideración la variabilidad de los factores que definían el entorno bajo el que se realiza la tarea tanto para el diseño base como para cuatro alternativas o posibilidades de diseño, que se detallan posteriormente. La Tabla 16 muestra valores medidos de la desviación típica para los mismos casos.

ACTIVIDAD	DISEÑO BASE	POSIBILIDAD 1	POSIBILIDAD 2	POSIBILIDAD 3	POSIBILIDAD 4
1	45	20	45	45	20
2	15	15	15	15	15
3	60	60	30	60	60
4	10	10	10	10	10
5	20	20	20	10	10
6	20	20	10	20	20
7	60	60	30	60	60
8	10	10	10	3	3
9	20	20	9	20	20
10	10	10	10	10	10
11	50	15	50	50	15
Tarea	320	260	270	303	243

Tabla 15 - VALORES MEDIOS ($MTTCA_i$)
EN SEGUNDOS, PREDICHOS PARA ACTIVIDADES COHERENTES -

ACTIVIDAD	DISEÑO BASE	POSIBILIDAD 1	POSIBILIDAD 2	POSIBILIDAD 3	POSIBILIDAD 4
1	15	6	15	15	6
2	3	3	3	3	3
3	20	20	10	20	20
4	3	3	3	3	3
5	7	7	7	3	3
6	7	7	3	7	7
7	20	20	10	20	20
8	3	3	3	1	1
9	7	7	3	7	7
10	3	3	3	3	3
11	20	5	20	20	5
Tarea	40	32,5	30,5	39,5	31,6

Tabla 16 - VALORES EN SEGUNDOS PREDICHOS (SDTTCA_i) PARA DESVIACIÓN TIPO DE ACTIVIDADES COHERENTES -

El objetivo principal de este ejercicio es deducir las expresiones de las medidas de mantenibilidad de la tarea analizada, basándose en las previsiones para las funciones de finalización de la actividad, $AC_i(t)$, donde $i = 1, \dots, 11$.

Con base en la descripción de la tarea y los tipos de tareas de mantenimiento expuestos con anterioridad, no es difícil concluir que la tarea considerada es una tarea de mantenimiento secuencial. Por consiguiente, su función de mantenibilidad podría obtenerse aplicando la ecuación (6.2). Así, en este particular ejemplo tendrá la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= AC^{11}(t) \\
 &= \int_0^t \frac{1}{B^{11} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - MTCA^{11}}{SDTTCA^{11}} \right)^2 \right] dt \\
 &= \int_0^t \frac{1}{42 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t - 330}{40} \right)^2 \right] dt \\
 &= \Phi \left(\frac{t - 330}{40} \right)
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

donde:

$$MTTCA^{11} = \sum_{i=1}^{11} MTTCA_i, \text{ y } SDTTCA^{11} = \sqrt{\sum_{i=1}^{11} SDTTCA_i^2} \quad (6.6)$$

Una vez que se ha obtenido la expresión de la función de mantenibilidad, todas las demás medidas de mantenibilidad podrían determinarse según las expresiones (2.2) y (2.3).

Para comparar los valores obtenidos en pruebas de la vida real y los valores predichos, obtenidos por la metodología propuesta, se dan en la Tabla 17 los valores numéricos para varias medidas de mantenibilidad.

La similitud de los resultados mostrados en las Tablas 14 y 17, ilustra claramente la precisión y utilidad de la metodología propuesta, para predecir en una etapa inicial del diseño las medidas

MTTR	TTR ₅	TTR ₅₀	TTR ₉₀
320	275.5	320	379.5

Tabla 17 - MEDIDAS DE MANTENIBILIDAD
EN SEGUNDOS PREDICHOS PARA LA TAREA ANALIZADA -

de mantenibilidad de las tareas de mantenimiento relativas a futuros sistemas. Es necesario hacer hincapié en que los valores previstos se obtienen tras varios segundos de cálculo, sin ningún coste adicional.

La segunda ventaja importante de la metodología propuesta es la posibilidad de una evaluación cuantitativa del efecto de las distintas opciones de diseño sobre las medidas de mantenibilidad.

En el ejemplo anterior, es posible examinar cuantitativamente los cambios en las características de mantenibilidad al hacer los siguientes cambios en el diseño:

- *Posibilidad 1:* colocar una rueda de recambio en el compartimento del motor. Esto influirá con seguridad en las actividades 1 y 11, porque no sería necesario vaciar el contenido del maletero y retirar el panel para acceder a la rueda de repuesto. Supongamos que la nueva configuración reducirá el $MTTCA_1$ a 20 segundos, y el $MTTCA_{11}$ a 15. Las consecuencias de este cambio de diseño sobre $M(t)$, se muestran en la Figura 19.
 - *Posibilidad 2:* sujetar la rueda al eje mediante una única tuerca central. Esto disminuiría la duración de las actividades 3, 6, 7 y 9, porque sólo habría una sola tuerca en vez de cuatro. Supongamos que la nueva configuración reducirá el $MTTCA_3$ a 30 segundos, el $MTTCA_6$ de 20 a 10 segundos, el $MTTCA_7$ a 30 segundos, y finalmente el $MTTCA_9$ a 9 segundos. Los valores previstos del $MTTR$ y del $SDTT$ para la nueva configuración, aparecen en la cuarta columna de la Tabla 18.
 - *Posibilidad 3:* conservar la configuración original, pero usando un gato hidráulico en vez de uno mecánico. Este cambio afectará a las actividades 5 y 8 de la siguiente forma:
-

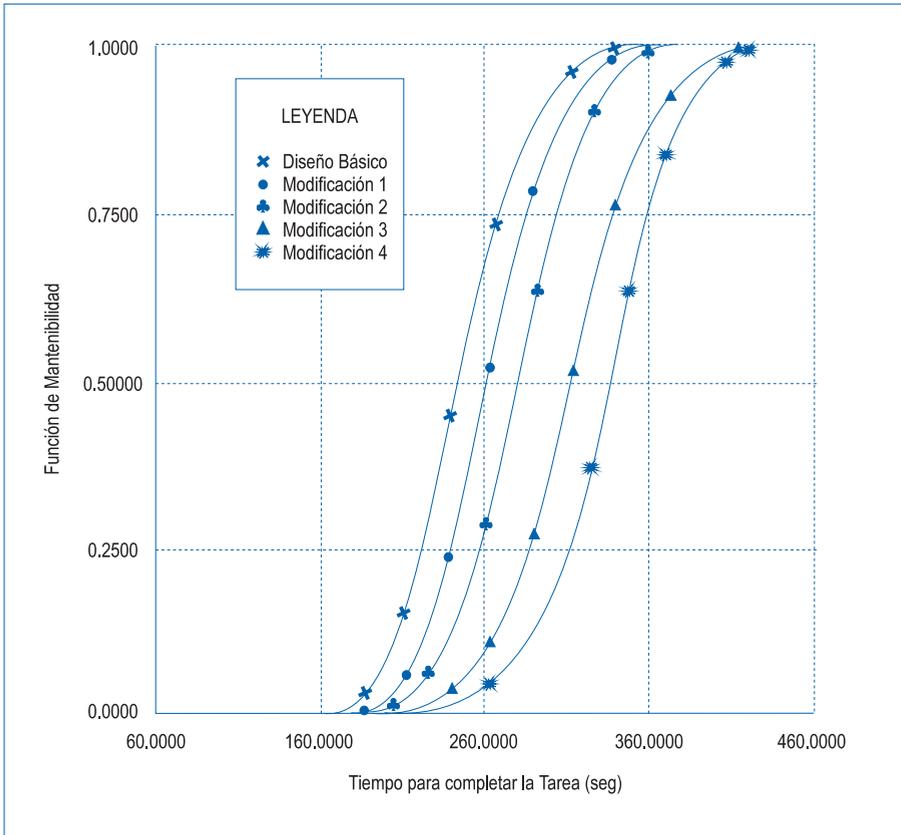


Figura 19 - FUNCIONES DE MANTENIBILIDAD PARA LAS POSIBILIDADES EXAMINADAS -

PARÁMETROS	0	1	2	3	4
MTTR = MTTCA	320	260	280	313	243
SDTTR = SDTTCA	40	32,5	30,5	39,5	31,6

Tabla 18 - PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DEDUCIDOS DE LAS POSIBILIDADES EXAMINADAS -

$MTTCA_5 = 10$, $MTTCA_8 = 3$. Los nuevos valores del tiempo medio para sustituir la rueda y la desviación típica se dan en la penúltima columna de la Tabla 18, donde: 0 representa el diseño básico, y 1, 2, 3 y 4 representan los cuatro posibles cambios de diseño. Las funciones de mantenibilidad para las cinco configuraciones se dan en la Figura 19.

- *Posibilidad 4*: combinar las posibilidades 1 y 3. El impacto de estos cambios en la función de mantenibilidad se muestra gráficamente en la Figura 19.

Claramente, la metodología propuesta permite que un equipo de diseño cuantifique de forma rápida las consecuencias de la solución de diseño elegida y de los posibles cambios de diseño, sobre las medidas de mantenibilidad de la tarea de mantenimiento considerada, y todo ello en una etapa inicial de diseño cuando los cambios pueden incorporarse sin casi coste adicional.

6.7. Observaciones finales

El objetivo principal de este capítulo es demostrar la metodología para una rápida y precisa predicción de las medidas de mantenibilidad de futuras tareas de mantenimiento y de los recursos necesarios para su finalización. El método propuesto se basa en el diagrama de bloque de la actividad de mantenimiento y en las medidas de mantenibilidad relacionadas con las actividades componentes.

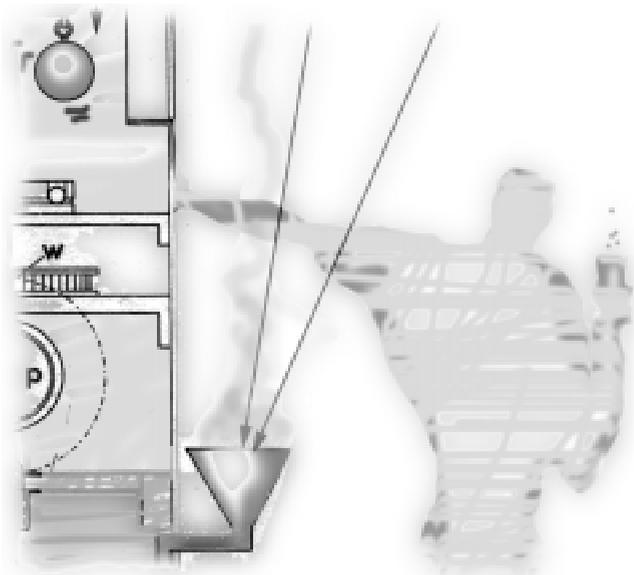
El método propuesto es aplicable a tareas de mantenimiento, cuyas actividades se realizan de forma simultánea, secuencial o combinada. Por tanto, es un modelo genérico para la predicción rápida de las medidas de mantenibilidad, que representa una de las precondiciones más importantes para la acertada finalización del análisis del apoyo logístico.

Es necesario hacer hincapié en que el método presentado podría usarse con éxito en una etapa muy inicial del diseño, cuando la mayoría de la información disponible se basa en experiencias previas, así como en las etapas de detalle y pruebas, cuando los datos relevantes se obtienen a partir de la solución de diseño adoptada.

El ejemplo numérico ilustra claramente las ventajas de la metodología propuesta, así como la oportunidad que aporta a la comunidad de diseño, durante la etapa en la que la asistencia es vital y los datos disponibles se reducen al mínimo.

7

La evaluación antropométrica de la mantenibilidad



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.

7.1. Descripción general

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 sistemas militares se llevan a cabo con cumplimiento parcial de la publicación Engineering Design Approach Document-Maintainer (DI-H-7057) [9]. En este caso, el contrato puede exigir la aplicación de normas antropométricas para la población de usuarios, como las contenidas en la norma MIL-STD-1472C [10]. A menudo, las evaluaciones de sistemas comerciales se guían por las normas militares, pero recurren a datos estadísticos antropométricos especializados, no militares [11]. 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. Por ejemplo, los usuarios de un sistema militar podrían especificarse como mecánicos de aviación varones y mujeres. 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 del usuario

Los datos antropométricos para usuarios militares pueden encontrarse en normas e informes técnicos militares y bases de datos informatizadas gubernamentales. 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 5º (pequeño, normalmente femenino) hasta el 95º (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 19 se indican algunos datos antropométricos relacionados con dimensiones del cuerpo humano en posición de pie, y en la Tabla 20 los datos correspondientes para dimensiones del cuerpo humano en posición de sentado.

FACTORES	VALORES DE PERCENTILES (cm)			
	5º PERCENTIL		95º 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 19 - 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 20 - 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. Se pueden encontrar maniqués en el MIL-HDBK-759A, representando los percentiles 5^o y 95^o de dimensiones corporales de pilotos varones de la USAF y el percentil 5^o de pilotos mujeres. Pueden adquirirse superponibles y otros dispositivos similares.

7.6. Herramientas del diseño asistido por ordenador

Las herramientas del Diseño Asistido por Ordenador, CAD, se usan extensamente para las evaluaciones antropométricas. La mayoría de las herramientas CAD se dirigen a poblaciones de usuarios militares, como aviadores o tripulaciones de sistemas de armas [12], y proporcionan datos antropométricos de personal de mantenimiento y la capacidad de simular tareas del personal de mantenimiento en superposición con diseños de ingeniería CAD. Algunas de las características disponibles son datos acerca de los técnicos de mantenimiento de la USAF, varones y mujeres, la

impedimenta de la ropa de trabajo y las herramientas a usar. Otras herramientas CAD para la evaluación antropométrica del espacio de trabajo para mantenimiento, pueden ser útiles para tareas especializadas. CARD [13] es una base de datos informatizada que contiene datos sobre un conjunto de estadísticas antropométricas. CADAM-ADAM [14] es otra herramienta CAD que puede aplicarse a evaluaciones antropométricas de mantenibilidad.

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 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 vistan 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 evaluación 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:

- a. Características antropométricas de la población de usuarios.
- b. Disposición, localización y peso de los sistemas.
- c. Procedimientos para las tareas de acceso, desmontaje, instalación y alineamiento.
- d. Área, altura, congestión, y limitaciones del espacio de trabajo.
- e. Características de ingeniería humana que facilitan el mantenimiento (esto es, empuñaduras, escalones, registros, carteles de instrucciones, etc.).
- f. Áreas barridas y ángulos de visión del personal de mantenimiento.
- g. Herramientas, equipos de apoyo y dispositivos especiales.
- h. 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:

- a. Concepto de mantenimiento para cada subsistema.
 - b. Escenarios de mantenimiento.
-

- c. Documentación del *Registro de Análisis de Apoyo Logístico* (Logistics Support Analysis Record, LSAR).
- d. 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:

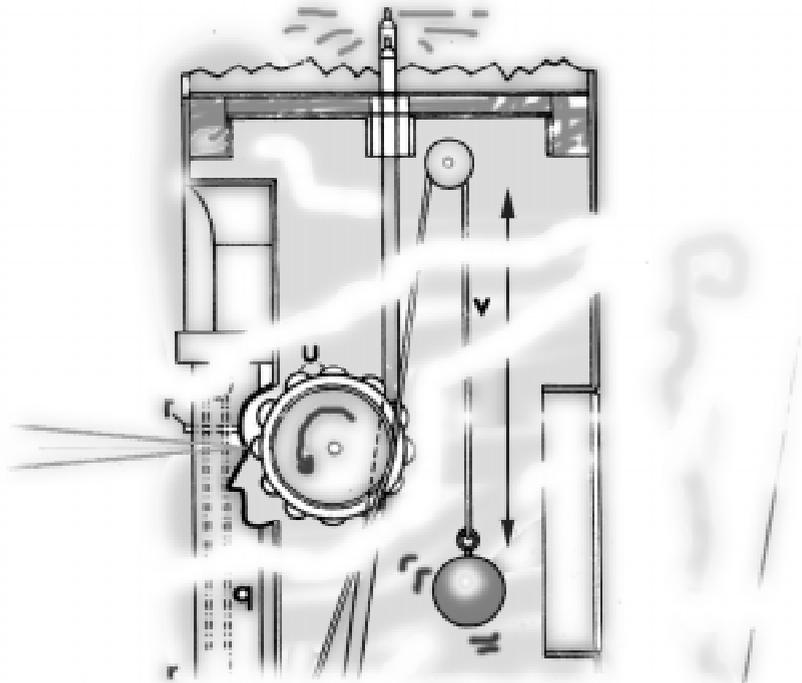
- a. Los datos antropométricos que representan poblaciones de usuarios de pequeña cuantía. A menudo deberán realizarse estudios antropométricos especializados. Se suelen sustituir por datos militares para aviadores y otras ocupaciones militares, aunque estos datos pueden no representar a otros tipos de usuarios.
 - b. 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.
 - c. 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.
-

- d. 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 proceso de mantenimiento



"Los gestores de mantenimiento quieren tener la puerta de embarque despejada; su programa de trabajos de la línea de mantenimiento debe basarse en una puerta de embarque despejada y en no dar lugar a que se posen los pájaros en los planos de los aviones."

Hessburg, Boeing, Mecánico Jefe de nuevos aviones

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:

- 1) 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.

- 2) 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.

El diagrama lógico de clasificación de elementos significativos para el mantenimiento se muestra en la Figura 20.

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

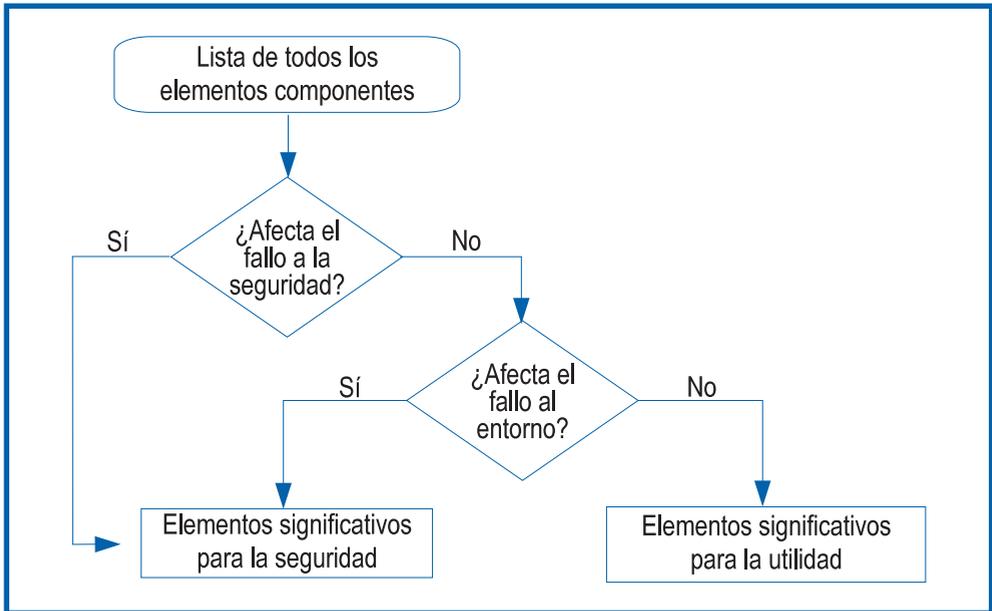


Figura 20 - DIAGRAMA LÓGICO PARA CLASIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS DE MANTENIMIENTO -

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.

8.1. Clasificación de las tareas de mantenimiento

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

- 1) Tareas de mantenimiento correctivo, que se realizan con la intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema;
- 2) Tareas de mantenimiento preventivo, que se realizan para reducir la probabilidad de fallo o maximizar el beneficio de operación;
- 3) Tareas de mantenimiento condicional, 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.

8.2. 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 demostraron 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 [15]. Los análisis RCM pueden dividirse en dos pasos principales [16]:

1. Realizar análisis FMEA para identificar los SSI del sistema;
2. 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.

En muchas industrias peligrosas como las de energía nuclear y las petroquímicas, hoy es una exigencia realizar *evaluaciones probabi-*

listas de riesgo (Probabilistic Risk Assessment, PRA), que cubran todos los peligros significativos en la totalidad del emplazamiento.

Estas plantas tendrán miles de aparatos protectores diseñados para prevenir fallos importantes –dispositivos como sistemas de detección de incendios, detectores de gases, interruptores de nivel límite, válvulas de escape de presión, protección de sobrecargas, y equipos de interconexión y de espera. La mayoría de estos dispositivos no están libres de fallos, y precisan inspecciones para confirmar que todo el sistema de protección sigue operativo. Como estos sistemas se vuelven más sofisticados, con múltiples dispositivos de protección, es muy difícil evaluar el riesgo de un fallo múltiple.

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.

La selección de la tarea de mantenimiento más apropiada se realiza mediante el uso de algoritmos de decisión, que tienen en cuenta tanto la viabilidad técnica de la tarea propuesta, como si merece la pena realizarla. El proceso de selección de la tarea considera siempre la selección de tareas de mantenimiento condicional antes que cualquier otra.

8.3. Niveles de mantenimiento

La principal preocupación del concepto de mantenimiento es la visión del fabricante, respecto a cómo se hará el apoyo del sistema durante su fase de utilización. Define los niveles de apoyo de mantenimiento, políticas de reparación, entorno de mantenimiento, etc. Los

niveles de mantenimiento se pueden clasificar genéricamente en estos tres tipos² [17]:

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

(2) N. del T. Los términos «organizativo», «intermedio» y «depósito» o «almacén» para los niveles de mantenimiento, responden a los comúnmente empleados en la literatura anglosajona: «organizational», «intermediate» y «depot», aunque en español no tengan demasiado significado y se utilicen preferentemente las designaciones clásicas de 1º, 2º y 3º escalón de mantenimiento.

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 21, con el propósito de:

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

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 21 - NIVELES DE REPARACIÓN A CONSIDERAR -

- 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.

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.

Por ejemplo, supongamos que se está en el proceso de definir el concepto de mantenimiento al comienzo del diseño conceptual del sistema «XX-25», y que se desea evaluar la viabilidad de un diseño para dos niveles de mantenimiento, o bien de otro para tres niveles.

En el diseño para dos niveles (mantenimiento organizativo y del proveedor), el esquema de empaquetamiento funcional del sistema incluye seis elementos, operando en serie, e integrados en la carcasa global del sistema. En caso de que se necesite mantenimiento correctivo, los fallos se aíslan hasta el elemento específico mediante un dispositivo de pruebas integrado; se retira el elemento correspondiente y se sustituye por uno de repuesto; el elemento defectuoso se devuelve para su reparación.

En el diseño para tres niveles (mantenimiento organizativo, intermedio y del proveedor), el esquema de empaquetamiento

funcional del sistema incluye tres elementos operando en serie en la Unidad «A», y tres elementos operando en serie en la Unidad «B». Las unidades están integradas en la carcasa global del sistema. En caso de que se necesite mantenimiento correctivo, los fallos se aíslan hasta el nivel de la unidad, mediante un dispositivo de pruebas integrado; se retira la unidad correspondiente y se sustituye por una de repuesto; la unidad defectuosa se devuelve al taller de mantenimiento intermedio para su reparación. La reparación de la unidad incluye la identificación del elemento defectuoso, mediante un equipo de pruebas externo; se elimina el elemento y se sustituye con un repuesto, devolviendo el elemento defectuoso al proveedor para su reparación.

Las dos configuraciones se muestran en las Figuras 21 y 22.

El objetivo de este ejercicio es determinar el nivel de mantenimiento (reparación) más apropiado, basado en la información

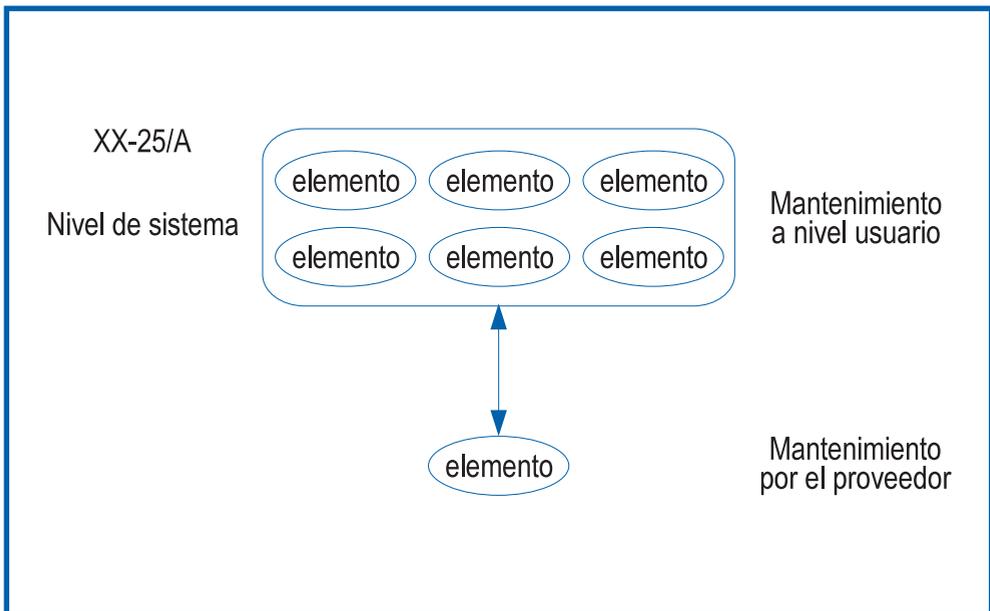


Figura 21 - CONFIGURACIÓN XX-25/A -

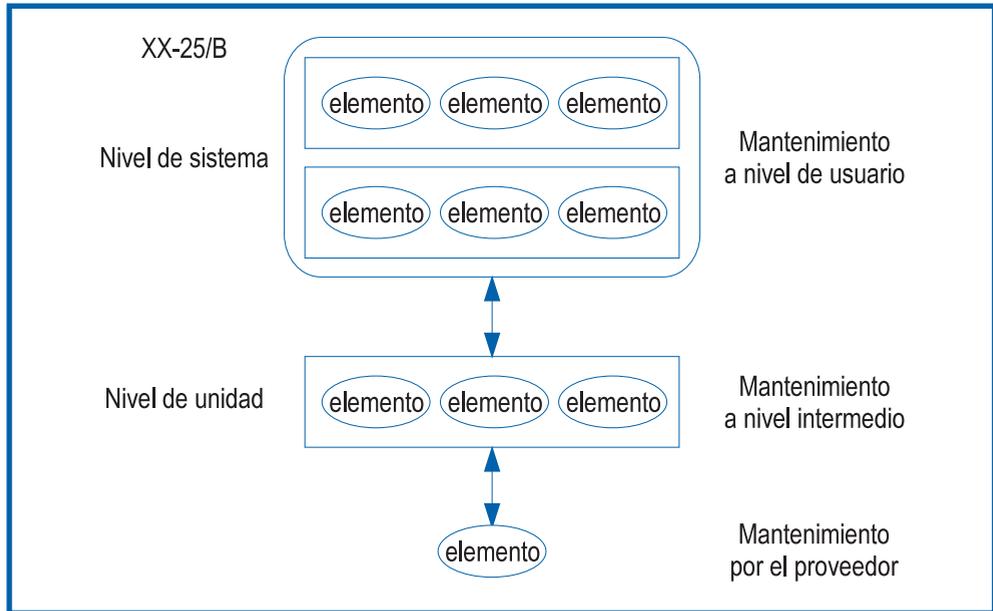


Figura 22 - CONFIGURACIÓN XX-25/B -

disponible. Así, con respecto a las dos opciones viables XX-25/A y XX-25/B, se han recogido los siguientes datos:

- a. Se espera que el sistema «XX-25» trabaje 2.000 horas por año con un sólo usuario; el coste estimado de adquisición del sistema (diseño y producción) para el XX-25/A es de 250.000 libras y para el XX-25/B de 175.000 libras. La diferencia en el coste se atribuye principalmente a la capacidad integrada de pruebas, más exigente para el XX-25/A.
- b. Se supone que todos los elementos son equivalentes en términos de fiabilidad y que la tasa media de fallos de cada elemento es de 0,001 fallos por hora. Se supone también que todos los tiempos de reparación son equivalentes.
- c. El coste medio del personal por tarea de mantenimiento (MT) es de 100 libras en el nivel organizativo, de 200

libras en el nivel intermedio y de 300 libras en el nivel del proveedor.

- d. Para el XX-25/A, se necesitan tres (3) elementos de repuesto para el apoyo de mantenimiento organizativo, con un coste por elemento de 20.000 libras. Para el XX-25/B, se necesitan dos (2) unidades de repuesto para el apoyo de mantenimiento organizativo y dos (2) elementos de repuesto para el nivel intermedio del apoyo de mantenimiento. El coste de una unidad de repuesto es de 50.000 libras y el coste de un elemento de repuesto es de 15.000 libras. Estas cifras incluyen los costes de aprovisionamiento y de mantenimiento de inventario.
- e. El coste del equipo de pruebas externo para apoyar la reparación a nivel de unidades es de 75.000 libras, y para la reparación a nivel de elementos es de 50.000 libras. Estas cifras incluyen los costes de operación y de mantenimiento del equipo de apoyo.
- f. El coste del uso de la instalación en el nivel de mantenimiento intermedio es de 75 libras/MT, y para el nivel de mantenimiento del proveedor es de 30 libras/MT.
- g. Los costes de transporte asociados al mantenimiento a nivel de unidad es de 100 libras/MT, y para el mantenimiento a nivel de elemento es de 75 libras/MT. Se supone que el coste de los datos de mantenimiento es de 25 libras/MT para el XX-25/A y de 40 libras/MT para el XX-25/B.

Solución:

Basado en los datos disponibles, el número esperado de tareas de mantenimiento durante un año de operación podría determinarse según la siguiente expresión:

$$\text{NMT (2000hrs)} = 1 \times 2000 = 2 \quad (8.1)$$

Como todos los elementos son idénticos y están conectados en serie desde el punto de vista de la fiabilidad, el número esperado de tareas de mantenimiento para ambas configuraciones será de 12.

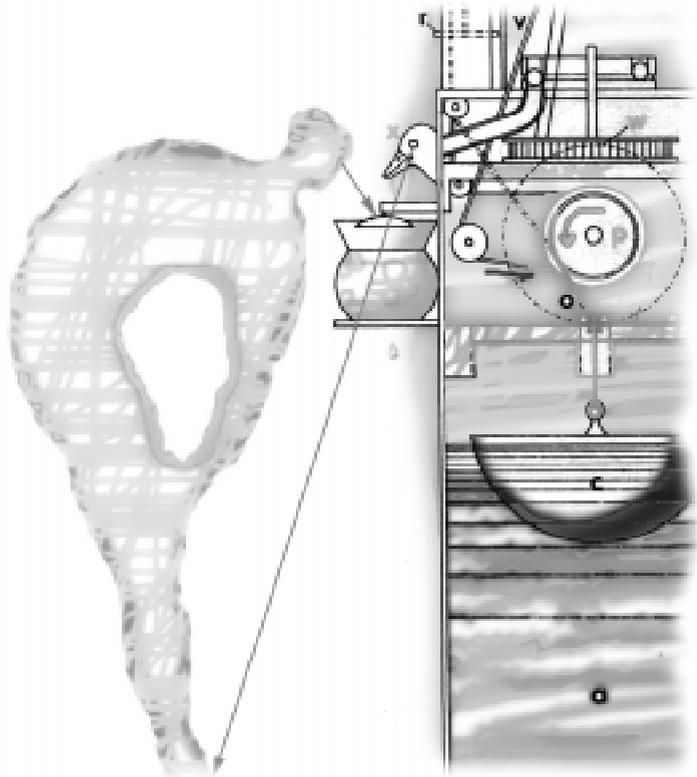
Haciendo uso de los datos disponibles, los resultados resumidos del LORA se muestran en la Tabla 22.

Basándonos en el coste total obtenido en ambas alternativas, se prefiere la configuración XX-25/A.

Elementos de coste	XX-25/A	XX-25/B
Adquisición	250000	175000
Personal	4800	7200
Repuestos	60000	7200
Equipos de prueba	50000	125000
Instalaciones	360	1260
Transporte	900	2100
Datos	300	480
Total	366360	441040

Tabla 22 - SOLUCIÓN PROPUESTA -

Referencias



[1] Knezevic, J., Reliability, Maintainability and Supportability Engineering- A Probabilistic Approach, pág. 292, plus software PROBCHAR, McGraw Hill, Londres (Inglaterra), 1993.

[2] Blanchard, B. S., Logistics Engineering and Management, 3ª edición, Prentice Hall, Inc., New Jersey (EE.UU.), 1986.

[3] Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J., Systems Engineering and Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey (EE.UU.), 1981.

[4] Patton, J. D., Preventive Maintenance, Instrument Society of America (EE.UU.), 1983.

[5] British Standard BS 3811: Glossary of Maintenance management terms in terotechnology, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).

[6] Knezevic, J., Effective Analysis of Existing Maintainability Data, Journal of Communications in Reliability, Maintainability and Supportability, Vol. 2, No. 1, pág. 18-22, SAE, enero, 1995.

[7] Hunt, S., Time Dependent Maintainability Analysis, Proc. International Symposium, Advances in Logistics edited by J. Knezevic, Research Centre MIRCE, Exeter, U.K., julio, 1993.

[8] Knezevic, J., Maintainability Prediction at the Design Stage, Journal of Communications in Reliability, Maintainability and Supportability, Vol. 1, No. 1, pág. 24-29, SAE, enero, 1994.

[9] MIL-H-46855B, Human Engineering Requirements for Military Systems, Data Item Description DI-H-7057 Human Engineering Design Approach Document-Maintainer.

[10] Lubelsky, B. L., Maintainability Techniques in production, paper presented at Seventh Military-Industry Missile and

Space maintainability Symposium, San Diego, California (EE.UU.), 1962.

[11] Sanders, M. S., Shaw, B. E., Female U.S. Truck Driver Anthropometric Truck Workspace Data Survey, 1984.

[12] CREW CHIEF, A Computer Graphics Model of a Maintenance Technician, Armstrong Aerospace Medical research Laboratory (AAMRL)/Human Engineering Group (HEG)), Wright-Patterson AFB, Ohio 45433-6573, (EE.UU.).

[13] CARD, Center for Anthropometric Research Data, Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory (AAMRL/Human Engineering Group (HEG)), Wright-Patterson AFB, Ohio, 45433-6573, (EE.UU.).

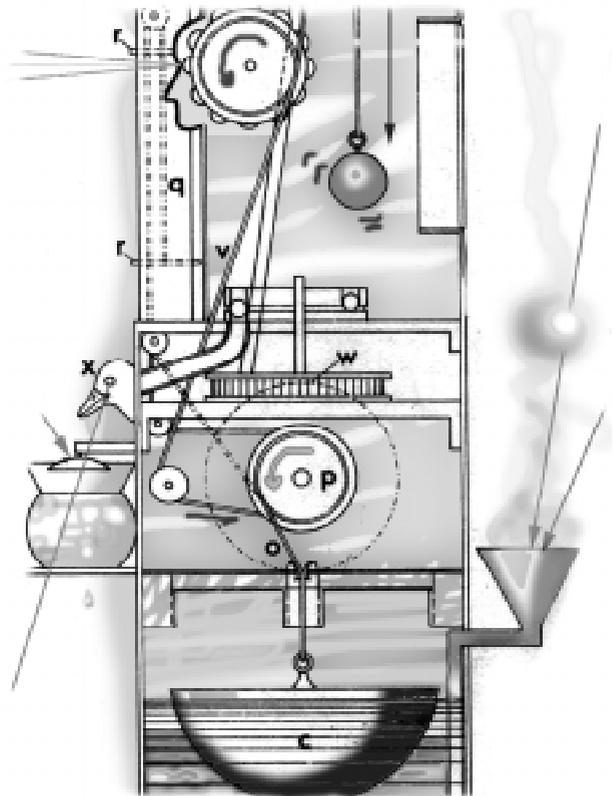
[14] CADAM-ADAM Computer Aided Design and Manufacturing-Anthropometric Design Aid Manikins, Cadam Inc., 1935 N. Buena Vista, Burbank, CA 91504, (EE.UU.).

[15] Moss, M. A., Designing for Minimal Maintenance Expense: The Practical Application of Reliability and Maintainability, Marcel Dekker, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1985.

[16] Anderson, R. T. & Neri, L., Reliability-Centred Maintenance: Management and Engineering Methods, Elsevier Science Publishers Ltd, Londres (Inglaterra), 1990.

[17] Blanchard, B. S., Systems Engineering Management, John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.), 1991.

Bibliografía



- Al-Najjar, B.:** *On the Selection of Condition Based Maintenance for Mechanical System*, págs. 153-173, K. Holmberg & A. Folkesson (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd., Inglaterra, 1991.
- Barlow, R. E. & F. Proschan:** *Statistical Theory of Reliability and Life Testing*, Holt, Rhinehart & Winston, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1975.
- Blanchard, B. S. & E. E. Lowery:** *Maintainability Principles and Practices*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York (EE.UU.), 1969.
- Blanchard, B. S., D. Verma & E. L. Peterson:** *Maintainability*, John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.), 1995.
- Billinton, A.:** *Reliability Evaluation of Engineering Systems Concept and Techniques*, Pitman Books Limited, Londres (Inglaterra), 1983.
- Bland, R. & J. Knezevic:** *A Practical Application of a New Method for Condition-based Maintenance*, Maintenance Management International, Elsevier, Vol. 7, No. 1, págs. 31-37, 1987.
- Bogdanoff, J. L. & F. Kozin:** *Probabilistic Models of Cumulative Damage*, John Wiley & Sons, 1985.
- Burwell, J. T.:** *Survey of Possible Wear Mechanisms*, Wear, 1, págs. 119-141, 1957.
- Carter, A. D. S.:** *Mechanical Reliability*, Macmillan, Londres (Inglaterra), 1972.
- Carter, G. M., J. L. Henshall & R. J. Wakeman:** *Influence of surfactants on the mechanical properties and comminution of wet-milled calcite*, Powder Technol., 65, págs. 403-410, 1991.
- Catuneanu, V. & A. Mihalache:** *Reliability Fundamentals*, Elsevier Science Publishing, Inc., 1989.
- 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.
- Collacott, R. A.:** *Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring*, Chapman and Hall Ltd., 1977.
- Cunningham, C. E. & W. Cox:** *Applied Maintainability Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1972.

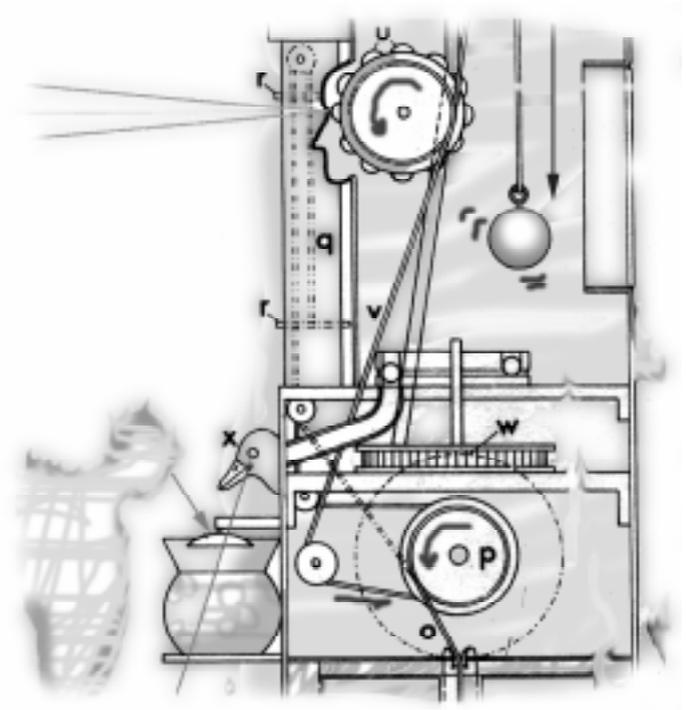
-
- Dekker P.:** *Applications of Maintenance Optimisation Models: A Review and Analysis*, Report 9228/A, Econometric Institute, Erasmus University, Rotterdam (Holanda).
- Dhillon, B. S. & Chanan Singh:** *Engineering Reliability New Techniques and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- Dreyfuss, H.:** *The Measure of Man*, Nueva York: Whitney Library of Design, 1967.
- El-Haram, M. & J. Knezevic:** - *The New Developments in Condition Based Approach to Reliability*, Proc. 10th International Logistics Congress, Exeter (Inglaterra), págs. 163-169, marzo 1994.
- *Practical Application of the Condition-Based Approach to Monitoring Particle Size Distribution*, Proc. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM'94, págs. 162-168, Nueva Delhi (India), septiembre 1994.
- Gertsbakh, I. B. & Kh. B. Kordonskiy:** *Models of Failure*, Springer-Verlag, Nueva York (EE.UU.), 1969.
- Goldman, A. & T. Slattery:** *Maintainability, A Major Element of System Effectiveness*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1967.
- Hahn, G. J. & S. Shapiro:** *Statistical Models in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1967.
- Jardine, A. K. S.:** *Maintenance, Replacement, and Reliability*, A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1973.
- Kapur, K. C. & L. R. Lamberson:** *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1977.
- Knezevic, J.:** - *Methodology 'EXETER' for Selecting an Optimal Part-Replacement Policy*, Maintenance Management Int., Vol. 5, págs. 209-218, Elsevier Science Publishers, 1985.
- *Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics*, Reliability Engineering, Vol. 19, No. 1, págs. 29-39, 1987a.
- *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 1987c.
- 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.
-

- Kolmogorov, A. N.:** *Foundation of the Theory of Probability*, Chelsea Publishing Company, Nueva York (EE.UU.), 1950.
- Lansdown, A. R. & A. L. Price:** *Materials to Resist Wear: A Guide to their Selection and Use*, Pergamon Press Ltd., 1986.
- Lydersen, S.:** *Reliability Testing Based on Deterioration Measurements*, Ph. D. Thesis, Trondheim (Noruega), 1988.
- Malik, M. A. K.:** *Reliable Preventive Maintenance Scheduling*, AIE Trans., Vol. 11, págs. 221-228, septiembre 1979.
- Mann, L.:** *Maintenance Management*, Lexington Books, D.C. Heath & Co., Lexington, Massachusetts (EE.UU.), 1976.
- Mobley, R. K.:** *An Introduction to Predictive Maintenance*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York (EE.UU.), 1990.
- 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.
- Neale, M. J.:** *Trends in Maintenance and Condition Monitoring*, Condition Monitoring'87, Proc. International Conference on Condition Monitoring, págs. 2-12, Swansea (Inglaterra), 1987.
- Newborouhg, E. T.:** *Effective Maintenance Management*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York (EE.UU.), 1967.
- Niczyporuk, Z. T.:** *Role of Technical Diagnostics in Improvements of Safety in Coal Mines*, Condition Monitoring'94, Proc. International Conference on Condition Monitoring, págs. 34-50, Swansea (Inglaterra), 1994.
- Niebel, B. W.:** *Engineering Maintenance Management*, Marcel Dekker, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1985.
- 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.
- Parzen, E.:** *Stochastic Processes*, Holden-day, Inc., 1962.
- 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.
- Paulsen, J. L. & K. Lauridsen:** *Information Flow in a Decision Support System for Maintenance Planning*, págs. 261-270, Holmberg K. & Folkeson A., (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd., Inglaterra., 1991.

-
- Petroski, H.:** - *Design Paradigms*, Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge (Inglaterra), 1994.
- *To Engineer is Human*, MacMillan, Londres (Inglaterra), 1985.
- Pludek, V. R.:** *Design and Corrosion Control*, MacMillan Press Ltd., Londres (Inglaterra), 1977
- Scully, J. C.:** *The Fundamentals of Corrosion*, Pergamon Press, Oxford (Inglaterra), 1990.
- Sherif, Y. S. & M. L. Smith:** *Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure - a Review*, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 28, págs. 47-74, 1981.
- Smiley, Cmdr. W. Robert:** *Design Review and Field Feedback Triger System Improvement*, Trans. Joint AIAA, SAE, ASME Aerospace Maintainability Conf., Washington, D.C. (EE.UU.), 1963.
- Standtorv, H. & M. Rausand:** *RCM-Closing the Loop between Design Reliability and Operational Reliability*, Maintenance Journal, Vol. 6, No. 1, págs. 13-21, marzo 1991.
- Sternstein, E. & T. Gold:** *From Takeoff to Landing*, Pocket Books, Siomm & Schuster Inc., Nueva York (EE.UU.), 1991.
- White, M. F.:** *Experiences from Condition Monitoring of Turbo-Compressors*, Condition Monitoring'87, Proc. International Conference on Condition Monitoring, pp. 641-660, Swansea (Inglaterra), 1987.
- Willmott, P.:** *Maintenance Engineering in Europe-the Scope for Collaborative Technology Transfer and Joint Venture*, Maintenance Journal, Vol. 4, No.4, págs. 10-13, diciembre 1989.
- Yan, X. P.:** *Oil Monitoring Based Condition Maintenance Management*, Porc. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM'94, pp. 154-161, Nueva Delhi (India), septiembre 1994.
- *British Standard BS 4778, Glossary of International terms*, Section 3.2, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).
 - *DOD Directive 5000.40, Reliability And Maintainability*, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
 - *IAEA Training Courses Series, Handbook on Safety Related Maintenance (draft)*, IAEA, Viena (Austria), 1993.
 - *MIL-HDBK-472, Military Handbook, Maintainability Prediction*, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
 - *MIL-STD-470B, Military Standard, Maintainability Program for Systems and Equipment*, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
 - *MIL-STD-471A, Military Standard, Maintainability Verification, Demonstration, Evaluation*, Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
-

- *MIL-STD-721C, Military Standard, Definitions of Effectiveness Terms for Reliability, Maintainability, Human Factors and Safety,* Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
 - *MIL-STD-2084, Military Standard, General Requirements for Maintainability,* Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
 - *MIL-STD-2165, Military Standard, Testability Program for Electronic Systems and Equipments,* Department of Defense, Washington, D.C. (EE.UU.).
-

Glosario



1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD. Cualquier expresión de función de probabilidad que tenga por dominio un conjunto exhaustivo de sucesos mutuamente excluyentes.

5. EXPERIMENTO. Un proceso o acción, bien definidos, que produce un resultado simple, bien definido.

6. FIABILIDAD. La característica inherente de un elemento relativa a su capacidad para mantener la funcionabilidad, cuando se usa como está especificado.

7. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN, $F(a)$. Probabilidad de que una variable aleatoria X tome un valor igual o inferior a una cantidad dada a .

8. FUNCIÓN DE FALLO, $F(t)$. Probabilidad de que se produzca un fallo en el tiempo t o antes.

9. FUNCIÓN DE FIABILIDAD, $R(t)$. Probabilidad de que el estado de funcionamiento se mantenga en el tiempo t .

10. FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD. Es la probabilidad de que se complete con éxito una tarea específica de mantenimiento dentro de un tiempo t .

11. FUNCIÓN DE PROBABILIDAD. Una función que asocia a cada suceso A un número real $P(A)$, la probabilidad del suceso A .

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. SISTEMA. Un conjunto de elementos relacionados mutuamente, con objetivos comunes.

17. SISTEMA DE INGENIERÍA. Un conjunto de componentes, dispuesto de tal forma que realice una función específica.

18. TAREA DE MANTENIMIENTO. Es el conjunto de las actividades que deben realizarse por el usuario para mantener la funcionalidad del elemento.

19. 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.

20. TAREA DE MANTENIMIENTO COMBINADO. Representa un conjunto de actividades de mantenimiento, algunas de las cuales se realizan en secuencia y algunas simultáneamente.

21. TAREA DE MANTENIMIENTO COMPLEJO. Un conjunto de actividades de mantenimiento realizadas simultánea y secuencialmente, todas las cuales deben completarse para finalizar la tarea.

22. TAREA DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO. Se realizan con la intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema.

23. TAREA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO. Se realiza para reducir la probabilidad de fallo o maximizar el beneficio operativo.

24. TAREA DE MANTENIMIENTO SECUENCIAL. Representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente dependientes, realizándose todas ellas en un orden predeterminado.

25. TAREA DE MANTENIMIENTO SIMULTÁNEO. Representa un conjunto de actividades de mantenimiento mutuamente independientes, realizándose todas ellas concurrentemente.

26. TASA DE FALLOS. La tasa con que se producen fallos en un cierto intervalo (t_1, t_2) .

27. 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.

28. TIEMPO MEDIO AL FALLO, *MTTF*. Esperanza matemática de la variable aleatoria *TTF* (Tiempo de Fallo), para componentes no reparables.

29. TIEMPO MEDIO DE RECUPERACIÓN. Valor medio de la variable aleatoria *TTR* (Tiempo de Recuperación).

30. TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS, *MTBF*. Esperanza matemática de la variable aleatoria *TTF* (Tiempo de Fallo), para componentes reparables.

31. TIEMPO MEDIO ENTRE SUSTITUCIONES NO PROGRAMADAS, *MTBUR*. Esperanza matemática de la variable aleatoria *TBUR*.

32. TIEMPO TTR_p . Duración del tiempo de mantenimiento para el que se recupera la funcionabilidad de un porcentaje dado de la población.

33. VARIABLE ALEATORIA. Una función que asigna un número (normalmente un número real) a cada punto del espacio muestral.

34. VARIABLE ALEATORIA CONTINUA. Variable que puede tomar cualquier valor de un conjunto infinito de valores.

35. VARIABLE ALEATORIA DISCRETA. Variable que puede tomar solamente valores en un conjunto finito o infinito numerable.

MANTENIBILIDAD

*Esta primera edición de
MANTENIBILIDAD
de la serie de
Monografías de Ingeniería de Sistemas
se terminó de imprimir el día
1 de febrero de 1996.*
