

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

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. *Ježdimir Knezevic.*



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)

10

MANTENIMIENTO. Ježdimir Knezevic

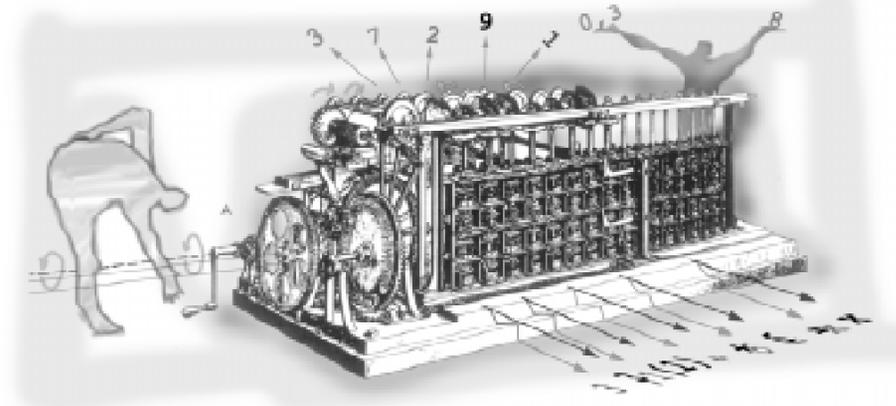


Publicaciones de Ingeniería de Sistemas

MANTENIMIENTO

por

Ježdimir Knezevic



10



Ježdimir 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. Es autor de la novena monografía de esta serie de Ingeniería de Sistemas.

ILUSTRACIÓN DE PORTADA
Máquina diferencial para calcular tablas de logaritmos de Georg y Edvard Scheutz de 1843.

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: Abril - 1996
1.250 ejemplares

© Isdefe

c/ Edison, 4
28006 Madrid.

Diseño y fotomecánica:
HB&h Dirección de Arte y Edición

Traducción:
Joaquín Teigeiro Tarancón

Infografía de portada:
Salvador Vivas

Impresión: Closas Orcoyen S.L.

ISBN: 84-89338-09-4
Depósito legal: M-1996
Printed in Spain - Impreso en España.

A Lynn Chambers

PRÓLOGO

Los principales objetivos de esta monografía son introducir:

- a) El concepto del proceso de mantenimiento.
- b) El análisis de las tareas de mantenimiento, sus tipos y sus características.
- c) Las principales características, ventajas y desventajas de las políticas existentes de mantenimiento.
- d) La metodología para la evaluación de la política óptima de mantenimiento para un elemento aislado y para un sistema complejo de acuerdo con diferentes criterios.
- e) Las nuevas tecnologías utilizadas para mejorar los procesos y tareas de mantenimiento.

Para hacer más fácil la presentación, en esta monografía se asignan significados específicos a determinadas palabras. De esta forma, *elemento* se usa como un término genérico para un producto, módulo, subsistema, componente, etc. cuando se analiza en calidad de 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.

Ya que el principal componente de un proceso de mantenimiento es la tarea de mantenimiento, en el Capítulo 2 se presentan sus principales características y clasificaciones.

Los Capítulos 3, 4, 5, 6 y 7 están dedicados al análisis de diversas políticas específicas de mantenimiento, resaltándose para cada una de ellas, sus principales características, beneficios y defectos.

En el Capítulo 8 se presentan análisis de las técnicas y métodos principales de vigilancia de la condición, con una breve consideración de BIT y BITE.

Finalmente, en el Capítulo 9 se analizan y presentan brevemente los principios fundamentales de la gestión de mantenimiento.

Para hacer este trabajo más útil para ingenieros y gestores en su práctica ordinaria, se han incluido en el texto gran número de «ejemplos de la vida real». Es necesario hacer hincapié en que los productos y fabricantes citados en la monografía han sido seleccionados por las razones exclusivas de la disponibilidad de la información en la literatura o simplemente debido a la familiaridad del autor con ese proyecto particular. Bajo ninguna circunstancia se ha intentado con el uso de esos ejemplos promover o desprestigiar ningún producto, fabricante o usuario.

Como ingeniero mecánico que ha pasado más de quince años dedicado al mantenimiento y a los temas con él relacionados (fiabilidad,

mantenibilidad y soportabilidad), de forma tanto teórica como práctica, me complacería que mi experiencia, resumida en esta monografía, pueda ser útil a todos los ingenieros y estudiosos.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Knezevic', with a stylized, cursive script.

J. Knezevic
Exeter, enero de 1996

AGRADECIMIENTOS

Es un verdadero honor poder escribir una segunda monografía en esta serie de prestigio internacional, reunida gracias a la gran visión del equipo ISDEFE. En particular, querría mostrar mi más sincero aprecio por la larga colaboración y el apoyo que me ha prestado Alberto Sols, quien hizo posible mi participación en este proyecto.

Quiero agradecer a todos los estudiantes no graduados y postgraduados, y a los participantes en cursillos de la industria, que han conformado a lo largo de los años mi línea de investigación, proporcionándome la necesaria «realimentación» para su continua mejora. Querría extender mi sincero agradecimiento a Mohamed El-Haram, Doctor en Ciencias, discípulo mío, por su contribución a la preparación final del manuscrito. También extendiendo mi aprecio a Thelma Filbee, secretaria del Centro de Investigación para la Gestión de Fiabilidad, Coste y Eficacia Industrial, MIRCE, por mecanografiar e imprimir muchas versiones de esta monografía, lo que ha incluido también unos cuantos sábados «laborables».

Jezdimir Knezevic

ÍNDICE GENERAL

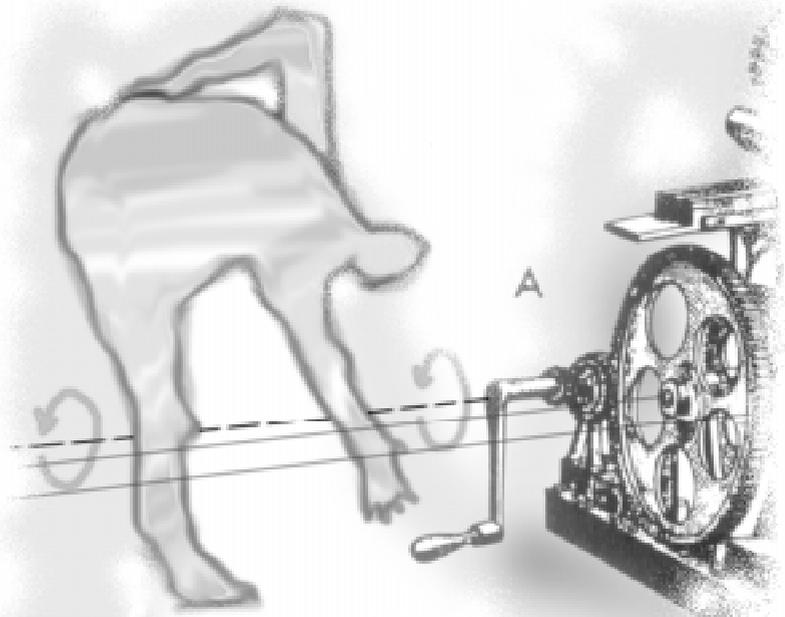
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. El proceso de mantenimiento	19
1.2. El mantenimiento y la disponibilidad	23
1.3. El mantenimiento y la seguridad	24
1.4. El mantenimiento y la economía	28
1.5. Análisis del coste del proceso de mantenimiento	29
1.6. Las políticas de mantenimiento	33
1.7. Observaciones finales	34
1.8. Estudio de un caso práctico: el proceso de mantenimiento en British Airways	35
2. ANÁLISIS DE LAS TAREAS DE MANTENIMIENTO	41
2.1. La tarea de mantenimiento	42
2.2. Duración de la tarea de mantenimiento	45
2.3. Clasificación de las tareas de mantenimiento	51
2.4. Tareas de mantenimiento correctivo	51
2.5. Tareas de mantenimiento preventivo	53
2.6. Tareas de mantenimiento condicional	55
2.6.1. <i>Parámetros de vigilancia de la condición</i>	57
2.6.2. <i>Indicador adecuado de la condición</i>	57
2.6.3. <i>Estimador adecuado de la condición</i>	58
2.6.4. <i>Tipos de tareas de mantenimiento condicional</i>	59
2.6.5. <i>La inspección como tarea condicional</i>	60
2.6.6. <i>El examen como tarea condicional</i>	60
2.7. El coste directo de la tarea de mantenimiento	61
2.7.1. <i>Coste directo de la tarea de mantenimiento correctivo</i>	63
2.7.2. <i>Coste directo de la tarea de mantenimiento preventivo</i>	64
2.7.3. <i>Coste directo de la tarea de mantenimiento condicional</i>	64

3.	POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL FALLO	67
3.1.	Ventajas del mantenimiento basado en el fallo	69
3.2.	Inconvenientes del mantenimiento basado en el fallo	69
3.3.	Coste total directo de la política de mantenimiento basada en el fallo	70
4.	POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN LA DURACIÓN DE VIDA DEL SISTEMA	77
4.1.	Ventajas de la política de mantenimiento LB	79
4.2.	Inconvenientes de la política de mantenimiento LB	80
4.2.1.	<i>Coste de la política de mantenimiento LB</i>	80
4.3.	El coste mínimo como criterio de optimización	82
4.4.	La máxima disponibilidad como criterio de optimización	84
4.5.	La fiabilidad exigida como criterio de optimización	86
5.	POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN LA INSPECCIÓN	91
5.1.	Ventajas de la política de mantenimiento IB	93
5.2.	Coeficiente de utilización	94
5.3.	Análisis de los modelos de vigilancia de la condición	94
5.3.1.	<i>El nivel de fiabilidad exigido como criterio de optimización</i>	95
5.3.2.	<i>El coste mínimo como criterio de optimización</i>	98
6.	POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL EXAMEN DE LA CONDICIÓN	101
6.1.	Puntos principales del método RCP para determinación de la fiabilidad	103
6.2.	Puntos principales del método RCP para el mantenimiento	106
6.3.	Ventajas de la política basada en el examen	107
6.4.	Observaciones finales	111
6.5.	Estudio de un caso práctico	112
6.5.1.	<i>Identificación del estimador de condición (RCP)</i>	113
6.5.2.	<i>Determinación del estimador de mantenimiento</i>	114
6.5.3.	<i>Determinación de las condiciones operativas en servicio</i>	115
6.5.4.	<i>Ensayo de la duración</i>	115
6.5.5.	<i>Determinación de la estrategia de mantenimiento</i>	116
7.	POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN LA OPORTUNIDAD	123
7.1.	Política de mantenimiento basada en la oportunidad para un grupo de elementos	128
7.2.	Política de mantenimiento preventiva para un grupo de elementos	129
7.3.	Estrategia óptima para una política de mantenimiento OB	130
7.4.	Metodología para determinar la estrategia de sustitución óptima	131
7.5.	Sustitución de elementos con el mismo nivel de acceso	132

8. TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL MANTENIMIENTO	139
8.1. Técnicas de vigilancia de la condición	140
8.1.1. <i>Vigilancia de las vibraciones</i>	142
8.1.2. <i>Vigilancia de la tribología</i>	144
8.2. Vigilancia de las prestaciones	145
8.3. Inspección visual	146
8.4. Técnicas de ensayo no destructivo	147
8.5. Comprobación integrada	150
8.6. Sistemas digitales de diagnóstico	150
8.7. Equipo integrado de comprobación (Built-In Test Equipment, BITE)	153
8.8. Uso de BITE para el seguimiento operativo de las prestaciones	156
8.9. El concepto de «bus» de datos	157
8.9.1. <i>ARINC 429</i>	158
8.9.2. <i>MIL-STD-1553</i>	158
8.9.3. <i>ARINC 629</i>	159
8.9.4. <i>Implicaciones del sistema</i>	159
9. PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO	163
9.1. La carga de trabajo	165
9.1.1. <i>Trabajos no programados</i>	165
9.1.2. <i>Trabajos programados</i>	165
9.2. Análisis de los recursos de mantenimiento	167
9.2.1. <i>Estructura de los recursos</i>	168
9.3. La administración del mantenimiento	169
9.4. Planificación del trabajo de mantenimiento	171
9.5. Mantenimiento en la propia empresa y mantenimiento en el exterior	173
9.6. Clasificación de los niveles de mantenimiento	176
9.7. Estudio de un caso práctico: el concepto de mantenimiento en la RAF	179
9.7.1. <i>Un tercer escalón de mantenimiento de la RAF</i>	180
9.7.2. <i>Política de reparación: vida fijada o según la condición</i>	185
9.7.3. <i>Decisiones de reparación</i>	187
9.7.4. <i>Seguimiento de artículos</i>	188
REFERENCIAS	191
BIBLIOGRAFÍA	195
GLOSARIO	203

1

Introducción



"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

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, de la tecnología de su producción o de los materiales usados en su fabricación, a lo largo de su operación se producirán ciertos cambios irreversibles. Estos cambios son resultado de procesos tales como 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, con lo cual cambiarán sus características de actuación. La desviación de esas características respecto a los valores especificados es lo que se considera como fallo del sistema. Los fallos también pueden ser causados por sobrecargas bruscas, errores de los operadores, reparaciones incorrectas, etc.

Por consiguiente, el fallo del sistema puede 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.

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 encontrarse en uno de los dos posibles estados:

- Estado de Funcionamiento, SoFu.
- Estado de Fallo, SoFa.

Existe una multitud de sistemas cuya funcionabilidad se puede recuperar, y se les denomina sistemas recuperables. Así, cuando alguien dice que un sistema específico es recuperable, se 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 para 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 funcionabilidad de un sistema. Además de las tareas de mantenimiento consecuentes al 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 funcionabilidad, siendo típicas actividades tales como limpieza, ajuste, comprobación e inspección.

Es extremadamente importante que el usuario del sistema en consideración, tenga al principio de su vida operativa información sobre

la funcionabilidad, 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 funcionabilidad, ya que la razón principal para la adquisición de cualquier sistema es la prestación satisfactoria de su función esperada. Simplemente, un sistema es útil cuando, y sólo cuando, realiza la función exigida. Un avión comercial produce ingresos sólo cuando está volando, transportando a los pasajeros que han pagado su billete hasta su destino. La situación es similar con coches, hervidores, ordenadores, autopistas, puentes, etc.

Por consiguiente, una de las mayores preocupaciones de los usuarios es la forma de su perfil de funcionabilidad, con un énfasis específico en la proporción del tiempo durante el que el sistema en consideración estará disponible para el cumplimiento de su funcionabilidad. Claramente, los principales responsables de esa forma específica son los dos siguientes factores:

- 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 a las tareas exigidas. [Nota: el tema de fiabilidad se ha cubierto completamente en la monografía número 8, así como el tema de mantenibilidad, en la monografía número 9 de la serie de ISDEFE].
- b) la logística y el mantenimiento, cuyo objetivo es gestionar el suministro de los recursos necesarios para la conclusión con éxito de todas las tareas operativas y de mantenimiento [2], y cuidar la ejecución de las tareas. [Nota: se presenta un estudio de la logística en la monografía número 7 de esta serie].

Por consiguiente, la cantidad de tiempo en que el sistema considerado está funcional, depende de la interacción entre las

características de un sistema que le son inherentes desde el diseño, como la fiabilidad, mantenibilidad y soportabilidad, y de la gestión y ejecución de las funciones logísticas y del mantenimiento.

1.1. El proceso de mantenimiento

Todos los usuarios desean, por razones obvias, que sus sistemas se mantengan en SoFu durante tanto tiempo como sea posible. Para lograrlo, es necesario «ayudar» al sistema a mantener su funcionalidad durante la operación, realizando las tareas apropiadas. Esta es una de las diferencias principales entre un elemento creado por la naturaleza y un elemento creado por el hombre, ya que el primero es capaz, en la mayoría de los casos, de «ayudarse» a sí mismo, mientras que el segundo necesita una ayuda «externa». Algunas de estas tareas son exigidas o sugeridas por los diseñadores o fabricantes. Sin embargo, a pesar de todas las tareas realizadas, no puede posponerse indefinidamente el momento en que el sistema deja de ser funcional. A partir de ahí, es necesario realizar otras tareas para que recupere su funcionalidad. Esto conduce al concepto de mantenimiento que incluye todas las tareas que realiza el usuario para conservar el elemento o sistema en el estado SoFu, o para recuperarlo a ese estado.

Hay multitud de sistemas creados por el hombre cuya funcionalidad debe ser conservada por el usuario a lo largo de su utilización. El proceso durante el que se mantiene la capacidad del sistema para realizar una función, es conocido 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 vida operativa [2].

Por tanto, la entrada para el proceso de mantenimiento está constituida por la funcionalidad de cualquier sistema humano, que

deba ser conservada por el usuario, mientras que la salida del proceso consiste en el sistema funcional, como se muestra en la Figura 1.

Cuando se analizan los objetivos de las tareas de mantenimiento realizadas durante un proceso de mantenimiento, es posible enumerarlos así:

- 1) Reducción del cambio de condición, con lo que se consigue un alargamiento de la vida operativa del sistema. Ejemplos típicos son: lavado, limpieza, pintura, filtrado, ajuste, lubricación, calibración, etc.
- 2) Garantía de la fiabilidad y seguridad exigidas, lo que reduce la probabilidad de presencia de fallos. Las actividades más comunes de este tipo son: inspección, detección, exámenes, pruebas.

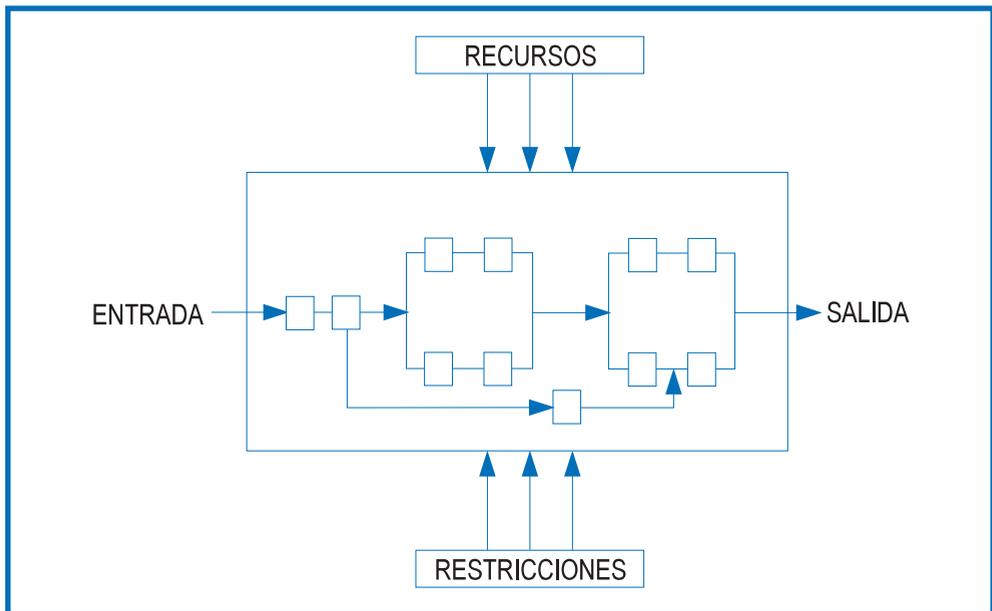


Figura 1 - EL PROCESO DE MANTENIMIENTO -

- 3) Consecución de una tasa óptima de consumo para elementos como combustible, lubricantes, neumáticos, etc., lo que contribuye al coste-eficacia del proceso de operación.
- 4) Recuperación de la funcionabilidad del sistema, una vez que se ha producido la transición al SoFa. Las actividades más frecuentemente realizadas para recuperar la funcionabilidad son: sustitución, reparación, restauración, renovación, etc.

Es necesario hacer hincapié en que se necesitan ciertos recursos para facilitar este proceso. 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). Los recursos necesarios para la realización con éxito de toda tarea de mantenimiento pueden agruparse en las siguientes categorías:

- A) Abastecimiento o aprovisionamiento: es un nombre genérico que incluye el suministro de todos los repuestos, elementos de reparación, consumibles, suministros especiales y artículos de inventario necesarios para apoyar a los procesos de mantenimiento.
 - B) Equipos de prueba y apoyo: incluye todas las herramientas, equipos especiales de vigilancia de la condición, equipos de comprobación, metrología y calibración, bancos de mantenimiento, y equipos auxiliares de servicio necesarios para apoyar a las tareas de mantenimiento asociadas al elemento o sistema.
 - C) Personal: se incluye el necesario para la instalación, comprobación, manejo y realización del mantenimiento del elemento o sistema y de los equipos necesarios de prueba y apoyo. Debe considerarse la formación específica del personal necesario para cada tarea de mantenimiento.
-

- D) Instalaciones: incluye las instalaciones especiales precisas para la ejecución de las tareas de mantenimiento. Deben considerarse las plantas industriales, edificios, edificaciones portátiles, fosos de inspección, diques secos, refugios, talleres de mantenimiento, laboratorios de calibración y otras instalaciones para reparaciones especiales y revisiones generales relacionadas con cada tarea de mantenimiento.
- E) Datos técnicos: procedimientos de comprobación, instrucciones de mantenimiento, procedimientos de inspección y calibración, procedimientos de revisiones generales, instrucciones de modificación, información sobre las instalaciones, planos y especificaciones que son necesarios para realizar las funciones de mantenimiento del sistema. Tales datos no sólo se refieren al sistema, sino también al equipo de prueba y apoyo, transporte y manejo del equipo, equipo de instrucción e instalaciones.
- F) Recursos informáticos: comprende los ordenadores y sus accesorios, «software», discos y cintas de programas, bases de datos, etc., necesarios para realizar las funciones de mantenimiento. Incluye tanto la vigilancia de la condición como el diagnóstico.

Los procesos de mantenimiento, como tantos otros, tienen sus propias restricciones. Las más frecuentes en los procesos de mantenimiento son:

- 1) Presupuesto.
- 2) Programación, tiempo disponible.
- 3) Reglamentaciones de seguridad.
- 4) Entorno, clima.
- 5) Lenguas extranjeras.
- 6) Cultura/costumbres tradicionales.

Cuando se analiza un proceso de mantenimiento es imperativo considerar tanto los recursos como las restricciones, a fin de conseguir

un óptimo control de unas operaciones tan complejas, que tienen un gran impacto en la seguridad, fiabilidad, coste, prestigio y otras características decisivas para la conducción competitiva de las operaciones.

1.2. El mantenimiento y la disponibilidad

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento [1].

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 para lograrlo. Uno es construir las cosas extremadamente fiables y, consecuentemente, costosas. El segundo es suministrar un sistema que, cuando falle, sea fácil de recuperar. De esta forma, si todo está construido muy fiable y todo es fácil de reparar, el fabricante obtiene un sistema muy eficaz, pero que nadie puede permitirse comprar. Por tanto, la pregunta es: ¿cuánto se necesita la utilidad del sistema, y cuánto está dispuesto uno a pagar por ello? Por ejemplo, ¿cuánto necesita el operador del tren ponerlo en marcha, cuando 1.000 pasajeros que han pagado desean partir a las 6:25 de la mañana? Obviamente, los pasajeros no están interesados en saber cuál es el problema, o si es un error de los diseñadores, fabricantes, personal de mantenimiento o maquinistas. Sólo les importa salir a las 6:25 de la mañana para llegar al destino elegido a las 7:30. Por ello, hay que resolver cualquier problema que surja.

Se debe poder realizar el mantenimiento durante los tiempos de inmovilización programados, bien durante paradas cortas entre ciclos de operación (vuelos, viajes, cargas o descargas, etc.) o bien durante una parada nocturna.

Una demostración de la importancia del proceso de mantenimiento en la explotación satisfactoria de una compañía aérea, es el

hecho de que el nuevo 777, que se puso en servicio en Junio de 1995, es el primer modelo de Boeing con un Mecánico Jefe, mientras que antes siempre había habido un Piloto Jefe en cada modelo de Boeing.

EJEMPLO 1. El periódico británico Daily Mail informaba el 13 de Diciembre de 1990, en el artículo titulado «Los años desperdiciados por nuestros buques de guerra, amarrados en los muelles», que una investigación realizada por miembros del Parlamento Británico reveló que: «una fragata o un destructor emplean en mantenimiento ocho años de los 22 de su «vida» media, y sólo la mitad de los restantes 14 años se emplean en la mar».

EJEMPLO 2. En la Tabla 1 se muestran determinadas características de varios vehículos de motor. Indican claramente el impacto de las decisiones de diseño sobre las tareas de mantenimiento.

Basándose en los datos anteriores para la consideración de un escenario operativo específico, donde se supone que durante un período de tres años, el recorrido total cubierto por cada tipo de vehículo de motor fue de 75.000 millas, en la Tabla 2 se detalla el número total de horas empleadas en revisiones y reparaciones, junto con la disponibilidad operativa alcanzada, donde: TTIS representa el tiempo total de revisiones, TTIR el tiempo total para la recuperación, y TTIM representa el tiempo total de mantenimiento ($TTIM = TTIS + TTIR$).

1.3. El mantenimiento y la seguridad

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

Modelos	Intervalos entre revisiones principales (millas)	Tiempos de Sustitución en Horas									
		Duración de la revisión (horas)	Embrague	Escape	Amortiguador trasero	Faros	Parabrisas	Parachoques delantero	Alternador		
Montego 1.6	12.000	2,6	3,9	1,2	1,5	0,4	2,5	1,0	0,6		
Peugeot 205	12.000	1,8	3,7	1,0	1,4	0,5	2,0	0,3	0,5		
Astra GTE	9.000	1,4	1,2	0,9	0,6	0,6	0,2	0,8	0,6		
Jetta 1.8	10.000	2,0	2,9	0,9	0,5	0,4	0,7	0,4	0,5		
Toyota Carina	10.000	2,0	3,9	1,3	0,8	0,4	2,9	0,8	0,7		
Lada 1500	6.000	3,6	3,2	1,8	0,9	0,2	0,5	0,5	0,7		
Cavallier	9.000	1,3	1,2	0,9	0,6	0,7	1,3	0,6	0,5		
Golf 1.6	10.000	2,0	3,3	0,9	0,6	0,7	1,3	0,6	0,5		
Sierra 1.6	12.000	2,4	2,0	0,6	0,4	0,4	2,1	0,4	0,4		
Nissan Micra GL	6.000	2,8	3,3	0,7	1,6	0,2	1,8	0,6	0,6		
Renault 5 TL	12.000	3,6	4,4	1,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4		
Alfa 33 1.5	12.000	3,0	4,4	0,5	0,4	0,2	1,8	0,4	0,3		

Tabla 1 - INTERVALOS ENTRE REVISIONES, DURACIÓN DE LAS MISMAS Y TIEMPOS DE SUSTITUCIÓN -

MODELO	N° DE SERVICIOS	TTIS	TTIR	TTIM	DISPONIBILIDAD
Montego 1.6	6	15,6	17,2	32,8	0,9927
Peugeot 205	6	10,8	14,1	24,9	0,9945
Astra GTE	8	11,2	14,1	20,2	0,9955
Jetta 1.8	7	14,0	11,1	25,1	0,9944
Toyota Carina	7	14,0	17,0	31,0	0,9931
Lada 1500	12	43,2	18,3	61,5	0,9863
Cavaller	8	9,1	8,9	18,0	0,9960
Golf 1.6	7	14,0	15,9	29,9	0,9934
Sierra 1.6	6	14,4	9,9	24,3	0,9946
Nissan Micra	12	33,6	13,8	47,4	0,9895
Renault 5 TL	6	21,6	17,0	38,6	0,9914
Alfa 33 1.5	6	18,0	15,7	33,7	0,9925

Tabla 2 - INTERVALOS, DURACIONES Y TIEMPOS DE SUSTITUCIÓN DE SERVICIOS -

En la monografía sobre mantenibilidad (número 9 de esta serie) se dan varios ejemplos del impacto de fallos inducidos por mantenimiento en varios accidentes aéreos, junto con las cifras de víctimas resultantes.

EJEMPLO 3. En el artículo titulado «Errores en el hangar» publicado en Enero de 1992 por Journal Aerospace, se exponen los siguientes tres accidentes relacionados con el mantenimiento:

- 1) En Chicago, un motor de un DC-10 se desprendió debido a fatiga en una fijación de motor agrietada, producida a causa de método incorrecto de izado. Tras el accidente, el DC-10 impactó sobre su cola después del despegue y se estrelló en un aparcamiento de caravanas, matando a los 272 ocupantes y a dos personas en tierra. Otros técnicos de mantenimiento de DC-10 dijeron que habían usado el mismo método. Uno de ellos escuchó incluso un ruido agudo de agrietamiento en la estructura, pero no se decidió a comunicarlo.
 - 2) La incorrecta inserción de unos detectores de partículas en el aceite, sin instalar las juntas tóricas necesarias, produjo el fallo completo de un motor en un TriStar. Se habían presentado previamente 12 fallos similares en la misma compañía aérea, siete de las cuales obligaron a efectuar aterrizajes no programados. Esto fue un típico caso de desidia y autosuficiencia del personal de mantenimiento.
 - 3) La lectura incorrecta de una varilla medidora, efectuada en galones en vez de litros, causó el fallo completo de un motor del 767. Se podrían añadir a esta lista de accidentes relacionados con el mantenimiento, aquellos casos que podrían haber estado a punto de producirse, pero de los que no se informó. ¿Quién admitiría ante su jefe que ha confundido galones con litros?
-

1.4. El mantenimiento y la economía

La realización de cualquier tarea de mantenimiento está asociada con unos costes, 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 lo tanto, los departamentos de mantenimiento son unos de los mayores centros de coste, que exigen a la industria miles de millones de pesetas cada año, habiéndose convertido así en un factor crítico en la ecuación de rentabilidad de muchas compañías. En consecuencia, puesto que las operaciones de mantenimiento se vuelven cada vez más costosas, cada vez se reconoce más la importancia de la ingeniería de mantenibilidad.

Está claro del breve análisis anterior acerca del papel e importancia de la mantenibilidad, que ésta representa uno de los determinantes principales en la consecución de los objetivos de los usuarios respecto a la disponibilidad, fiabilidad, coste de posesión, prestigio, etc.

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

Actualmente, la mayoría de los usuarios se preocupan por la ventaja competitiva que el proceso de mantenimiento puede proporcionar a una compañía. Para ilustrar la importancia económica del proceso de mantenimiento en el coste de «sacar adelante el negocio», un reciente estudio de prácticas de ingeniería de mantenimiento demostró que:

- A) Las compañías aéreas de los Estados Unidos gastaron en mantenimiento nueve mil millones de dólares, aproximadamente el 11 por ciento de su coste de operación.
- B) El sector militar muestra incluso mayor preocupación por el costo de mantenimiento, que se eleva hasta un 30 por ciento del coste del ciclo de vida de un sistema de armas. En 1987/88, la Royal Air Force (RAF) gastó alrededor de 1.900 millones de libras en mantenimiento de aviones y equipos.
- C) 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 directo del sistema de producción. Traduciendo este porcentaje a dinero gastado en mantenimiento por la industria del Reino Unido, la cuantía se elevó a 8.000 millones de libras en el año 1988.

1.5. Análisis del coste del proceso de mantenimiento

Para muchos sistemas o productos, el coste de mantenimiento constituye una parte importante del coste de posesión. Los recursos se expresan normalmente en términos monetarios, en forma de costes. Los costes pueden clasificarse en varias categorías, desde el punto de vista del análisis de los recursos de mantenimiento (Maintenance Resources Analysis, MRA), estudiándose brevemente a continuación las más corrientes:

- A) Costes fijos y variables: los costes fijos son aquellos que se producen sin tener en cuenta el número de tareas de mantenimiento realizadas (por ejemplo, costes de instalaciones). Aunque se supone que los costes fijos deben mantenerse constantes al producirse cambios en el nivel de actividad, pueden variar como respuesta a otros factores,
-

como los cambios en los precios, por ejemplo. Los costes variables son aquellos que dependen del volumen de las tareas de mantenimiento realizadas. Normalmente, estos costes se deben al material y a la mano de obra empleados. Conviene indicar que muchos costes contienen elementos tanto de costes fijos como de costes variables. Por ejemplo, un departamento de mantenimiento puede tener un cierto número de personal con salarios fijos, que realizan una amplia gama de tareas. Sin embargo, la cantidad de trabajo de mantenimiento comprometido y los repuestos necesarios pueden variar de acuerdo con la producción de la planta y de los equipos. Como consecuencia, los costes anuales de mantenimiento por planta y equipo, a lo largo de varios años, constarían de elementos fijos y elementos variables. Puede que no sea factible determinar con precisión qué parte es fija y qué parte es variable, o puede que se precisen técnicas de medida y registro, prolijas y caras. El coste de la pérdida de utilidad está relacionado con el coste de los salarios de los operarios o empleados, calefacción, seguros, impuestos, instalaciones, teléfono, etc., que se producen igualmente cuando el elemento está en SoFa. Estos costes no deben despreciarse, porque podrían ser incluso superiores a los de las otras categorías de costes.

- B) Costes directos, indirectos y generales: los costes directos son costes que pueden atribuirse claramente a cada tarea. Los costes directos de material y de mano de obra se conocen usualmente como costes de producción. Los costes indirectos, por otro lado, son difíciles de asignar a actividades particulares. Los costes generales son todos aquellos distintos de los costes directos de material y mano de obra. Tradicionalmente, la función de mantenimiento se ha incluido en los costes globales y, por tanto, ha sido difícil de identificar. Costes globales típicos son los materiales indirectos, la mano de obra indirecta, los impuestos, los seguros, los alquileres,
-

el mantenimiento y las reparaciones, las depreciaciones, el personal supervisor y el administrativo, la calefacción, la luz y el combustible. La contabilidad de costes asigna una cantidad proporcional de los costes globales a los productos fabricados o a los servicios realizados. Los costes globales no pueden asignarse como cargas directas a ninguna actividad en particular, y por tanto deben distribuirse de acuerdo con alguna regla arbitraria. Como métodos corrientes para la distribución se pueden citar:

- 1) La cantidad por hora de mano de obra directa.
 - 2) Un porcentaje del coste de mano de obra directa.
 - 3) Un porcentaje del coste de producción (coste de material directo más coste de mano de obra directa).
- C) Coste inicial de mantenimiento: el coste de inversión inicial es la inversión total necesaria para establecer un sistema de mantenimiento preparado para la operación. Generalmente esos costes son no recurrentes, a lo largo de la vida del elemento. Los costes de inversión inicial de una máquina-herramienta, por ejemplo, pueden incluir el coste de la máquina, la formación del personal, la instalación, el transporte, la dotación inicial de accesorios y el equipo de apoyo.
- D) Coste de oportunidad: el mantenimiento acarrea costes, pero las consecuencias que surgen de no efectuar el mantenimiento también acarrea otros costes, que a menudo pueden ser bastante mayores. Como el alcance del mantenimiento y su frecuencia de ejecución son necesariamente limitados, se debe controlar y optimizar el mantenimiento según ciertos criterios. En la Tabla 3 se muestra el coste de oportunidad estimado por British Airways
-

MANTENIMIENTO

Vertidos de combustible (50 toneladas por retorno)	\$ 15000
Retrasos	\$ 1000 / minuto
Avión fuera de servicio	\$ 90000/día
Acción correctiva en el conjunto de la flota (60 motores a \$ 3.000.000 cada uno)	\$ 18 M
Inmovilización de la flota	\$? M
Pérdida de pasajeros/ingresos (Por recuperar un viaje perdido de Club World Passenger)	\$ 105000

Tabla 3 - COSTES/PENALIZACIONES TÍPICAS-BOEING 747 -

para el Boeing 747, representando el valor monetario de las consecuencias de la pérdida de ingresos.

El coste de oportunidad o coste de ingresos perdidos (Cost of Lost Revenue, CLR) es directamente proporcional al producto del tiempo que el sistema pasa en SoFa y la tasa de ingresos por hora (Hourly Rate, HR) que percibe el usuario por la utilización del producto.

EJEMPLO 4. Dos tipos de aviones que se han utilizado ampliamente en la industria de las líneas aéreas son el Boeing 747 (entró en servicio en 1970) y el Boeing 757 (entró en servicio en 1982). El primero es el avión de transporte de larga distancia más usado en todo el mundo, mientras que el segundo es un sucesor del Boeing 707 como transporte de media distancia. En la Tabla 4 se dan los costes de ambos aviones para los cuatro explotadores más importantes de los Estados Unidos (Northwest, Pan American, Trans World y United Airlines) en el año 1986.

Categoría de Coste	B747	%	B767	%
Tripulación	787	17	504	23
Combustible	2030	44	720	32
Depreciación y alquileres	672	14	596	27
Total de mantenimiento	1117	24	377	17
Otros	36	1	31	1
Total	4642	100	2228	100

Tabla 4 - COSTES PARA BOEING 747 (121 AVIONES) Y 767 (62 AVIONES) -

1.6. Las políticas de mantenimiento

Con respecto a la relación entre el instante de producción del fallo, TTF (Time to Failure, tiempo hasta el fallo), y el instante de ejecución de la tarea de mantenimiento, TTM (Time to Maintenance, tiempo para el mantenimiento), existen las siguientes políticas de mantenimiento:

- 1) Política de mantenimiento basada en la producción del fallo (Failure-based Maintenance, FBM), en que las tareas de mantenimiento correctivo se inician tras la producción del fallo, es decir, tras la presentación de anomalías en la función o las prestaciones.
- 2) Política de mantenimiento basada en la vida del sistema (Life-based Maintenance, LBM), donde se realizan tareas de mantenimiento preventivo a intervalos fijos predeterminados durante la vida operativa del sistema.

- 3) Política de mantenimiento basada en la inspección (Inspection-based Maintenance, IBM), donde se realizan tareas de mantenimiento condicional en forma de inspecciones a intervalos fijos del tiempo de operación, hasta que se requiere la realización de una tarea de mantenimiento preventivo.
- 4) Política de mantenimiento basada en el examen (Examination-based Maintenance, EBM), donde se realizan tareas de mantenimiento condicional en forma de exámenes, según la condición observada en el elemento o sistema, hasta que se necesita la ejecución de una tarea de mantenimiento preventivo.
- 5) Política de mantenimiento basada en la oportunidad (Opportunity-based Maintenance, OBM), donde se lleva a cabo un mantenimiento correctivo sobre el elemento averiado, así como tareas de mantenimiento preventivo en los elementos restantes del grupo de elementos designado.

Dentro de cada política de mantenimiento, excepto la FBM, la programación de las tareas de mantenimiento condicional y preventivo se determina mediante una estrategia específica, determinada por el usuario del elemento o sistema.

1.7. Observaciones finales

El principal objetivo de la existencia de cualquier elemento o sistema realizado por el hombre es proporcionar utilidad, mediante la realización de una cierta 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 de mantenimiento está asociada con unos costes, 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 constituyen unos de los mayores centros de coste, exigiendo a la industria miles de millones de pesetas cada año, y habiéndose 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, el proceso de mantenimiento gana reconocimiento día tras día.

El breve análisis anterior del impacto del mantenimiento en la seguridad, economía, y disponibilidad, demuestra que representa uno de los determinantes principales de la consecución de los objetivos de los usuarios en lo relativo a capacidad operativa, disponibilidad, prestigio y otros objetivos similares.

Por ello, el principal objetivo de esta monografía es el análisis de las políticas, conceptos, técnicas y modelos a disposición de los ingenieros de mantenimiento y de los directivos, para la predicción, evaluación y mejora de sus decisiones respecto a la programación, 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 la disponibilidad y rentabilidad de cualquier sistema creado por el hombre.

1.8. Estudio de un caso práctico: el proceso de mantenimiento en British Airways

British Airways tiene una flota de más de 220 aviones, desde Concorde y Boeing 747 hasta Airbus y ATP. Para mantenerlos en vuelo, la compañía emplea cerca de 9.000 técnicos en todo el mundo. Cada semana gasta cerca de 10 millones de libras esterlinas en ingeniería y mantenimiento de los aviones. A lo largo de su vida operativa, un avión experimenta una serie de comprobaciones, cuidadosamente orga-

nizada, desde la inspección pre-vuelo simple pero profunda hasta la revisión general de mayor importancia. Antes de comenzar la operación, el avión pasa una inspección diaria, un examen cuidadoso por parte de un pequeño equipo de técnicos que revisan elementos como las ruedas, la hidráulica, los niveles de aceite y el sistema eléctrico. Cualquier fallo registrado por la tripulación entrante debe investigarse antes de que el avión despegue de nuevo. Incluso después de esto, ningún avión de British Airways despegue hasta que se somete a un cuidadoso examen final. Esto no es simplemente una buena costumbre; es un requisito legal.

Aparte de la inspección diaria, el programa de mantenimiento se basa en las horas voladas o en los aterrizajes completados, números que pueden variar mucho según el tipo de avión. Un Boeing 747, que realiza largos vuelos intercontinentales, puede acumular fácilmente más de 4.000 horas de vuelo por año o más de 12 horas al día, y aún así, efectuar pocos aterrizajes. Un Boeing 737, que lleva a cabo vuelos cortos en el continente europeo con períodos frecuentes en tierra, puede acumular por término medio sólo la mitad de horas cada día, pero esto puede incluir cuatro o cinco aterrizajes. Una comprobación de mantenimiento puede basarse en el número de horas de vuelo, mientras que otra –de componentes del tren de aterrizaje, por ejemplo– puede estar relacionada con el número de aterrizajes. Un conjunto de ruedas puede soportar hasta 200 aterrizajes, pero sin embargo será sustituido en el momento que alcanza el límite aceptable de desgaste. Otros componentes pueden tener simplemente una vida fija; se cambian después de un cierto tiempo, independientemente de cuánto tiempo ha estado el avión en el aire.

La inspección diaria es sólo el comienzo del ciclo de mantenimiento. Cada 150 horas de vuelo, lo que en el caso del Boeing 747 se traduce en dos semanas de vida operativa, el avión es sometido a una inspección más exhaustiva. Cada 1.000 horas de vuelo, equivalente a casi tres meses para un reactor grande, entra en hangar durante una jornada de trabajo de 24 horas.

El programa de mantenimiento tiene como objetivo asegurar el servicio comercial regular del avión durante unos 18 meses, interrumpido sólo por comprobaciones en hangar, frecuentes pero relativamente breves. Al cabo de ese tiempo, se retira del servicio al avión que le corresponde, para llevar a cabo una revisión de carácter intermedio. En todos los aspectos, es una verdadera revisión general que necesita un equipo de cerca de 120 técnicos y dura alrededor de 12 días. Todo ello se queda corto en comparación con el último nivel: el examen más exhaustivo a que haya sido nunca sometido un avión comercial. Es una revisión general de mayor importancia, y tiene lugar cada 24.000 horas de vuelo, o cada cuatro o cinco años.

Esta gran revisión general requiere un mes para completarse, durante cuyo tiempo prácticamente se desguaza el avión. Se levanta el suelo, se desmontan los motores, así como las superficies de control y el tren de aterrizaje, y se inspeccionan todas las juntas y remaches. Puede que se renueven paneles enteros del revestimiento y que se sustituyan kilómetros de cables. Este es también el momento en que se incorporan determinadas modificaciones como las cocinas o los aseos. La tecnología nunca se detiene; los especialistas de aviónica aprovecharán una revisión general de larga duración para instalar las últimas innovaciones de ayudas electrónicas de la cabina o para modificar los sistemas existentes. Los motores tienen un mantenimiento propio. Como el resto del avión, son sometidos a revisiones constantes, para lo que se usan sistemas muy ingeniosos que permiten a los técnicos realizar inspecciones microscópicas internas con el motor aún en su sitio. Sin embargo, los motores de aviación modernos son muy fiables; es bastante corriente que un motor de reacción moderno funcione a lo largo de un par de años sin ser desmontado del avión. Incluso cuando se necesita reemplazar un determinado componente, a menudo se puede hacer el cambio con el motor en su sitio. Si no, se retira el motor entero y se le sustituye por otro recién revisado, mientras que el motor sustituido se envía al taller para una revisión completa. Los aviones de British Airways tienden a seguir diferentes pautas de trabajos, lo que ayuda a suavizar los «picos» y «valles» del trabajo de

mantenimiento. Cerca de 150 aviones, o sea unos dos tercios de la flota, realizan viajes cortos, volando de día y haciendo el mantenimiento por la noche; entre ellos, unos 30 pasan todas las noches a los hangares de mantenimiento durante unas horas.

Los aviones intercontinentales vuelan tanto de noche como de día. En un día típico en Heathrow, una veintena de aviones intercontinentales –Concorde, Boeing 747 y Boeing 767– se someterán a un mantenimiento de rutina. Muchos aviones permanecen cierto tiempo en tierra en los aeropuertos de destino al otro lado del océano, incluyendo posiblemente una parada durante la noche. Allí completarán su mantenimiento rutinario menor, bajo la supervisión de uno de los 300 técnicos reconocidos por British Airways en 150 ciudades por todo el mundo. Junto al mantenimiento programado, se lleva a cabo la tarea diaria paralela de mantener el avión en servicio durante su ocupada vida operativa. Un comandante a su vuelta a Heathrow puede informar por radio de la existencia de un problema electrónico, o una inspección post-vuelo puede detectar un neumático desgastado. Cualquiera que sea el problema, se acercará una furgoneta de mantenimiento, casi antes de que los pasajeros hayan comenzado a desembarcar.

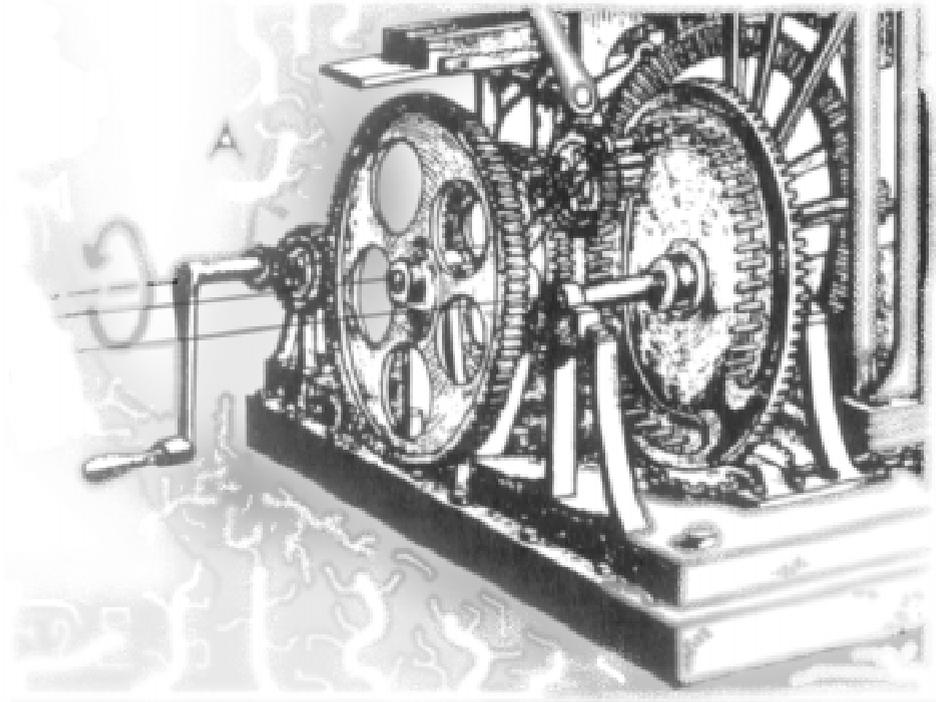
Los retrasos no sólo producen inconvenientes a los pasajeros; también cuestan dinero. Tanto en Heathrow como en Gatwick, la compañía tiene «patrullas volantes» de mantenimiento en cada terminal de pasajeros, dotadas con un conjunto de herramientas y repuestos, cuya tarea es arreglar problemas «sobre la marcha» y reponer en servicio el avión tan pronto como sea posible. Sólo si el problema está fuera de sus posibilidades llamarán a sus colegas de la base de mantenimiento apropiada. La conservación de la disponibilidad en vuelo de la flota requiere algo más que técnicos cualificados; también exige llevar minuciosamente los oportunos registros y realizar una gestión muy flexible. A todas horas, un equipo de técnicos cualificados está de servicio en el centro de control que la compañía tiene en Heathrow, vigilando la marcha de los aviones en todo el mundo. Si un avión sufre un retraso o una desviación, quizá al otro lado de la Tierra, los técnicos

deben estar preparados para ayudar a cambiar el avión, reprogramar otros vuelos o enviar repuestos urgentes, todo con el objetivo principal de transportar a los pasajeros a su destino lo antes posible.

El mantenimiento del avión es una de las partidas más costosas que tiene afrontar una compañía. Por ello puede que para una compañía con una flota de menos de una veintena de aviones grandes, sea más barato alquilar las instalaciones de mantenimiento de otra compañía aérea, que soportar el coste prohibitivo de establecer su propia organización. A medida que los costes aumentan, cada vez un mayor número de compañías aéreas busca que contratistas importantes, como British Airways, les haga el trabajo. Para el cliente, eso significa disfrutar de los mejores servicios de mantenimiento de avión en el mundo a un precio razonable; para British Airways, significa cada año millones de libras en ingresos adicionales. Tradicionalmente, las mayores bases de mantenimiento de la compañía han estado en Heathrow y Gatwick, pero los tiempos están cambiando. A medida que la flota de British Airways sigue creciendo, las instalaciones de revisiones generales soportan una presión creciente. En el verano de 1993, British Airways estableció la primera fase de una nueva base de mantenimiento en el aeropuerto de Cardiff, que la compañía está construyendo con un coste de 70 millones de libras esterlinas. Esta base, concebida específicamente para ello, realiza las revisiones generales mayores de la flota de Boeing 747 de la compañía, que cuenta ahora con más de 50 aviones, y casi otros 40 en proceso de adquisición. Deberá poder hacerse cargo de las revisiones generales mayores de tres aviones simultáneamente.

2

Análisis de las tareas de mantenimiento



Todos los usuarios desean por razones obvias que sus sistemas se mantengan en SoFu durante tanto tiempo como sea posible. Para lograrlo, es necesario «ayudar» al sistema a mantener su funcionalidad durante la operación, realizando las tareas apropiadas. Puesto que los principales componentes del proceso de mantenimiento son las tareas de mantenimiento, el objetivo de este Capítulo es analizar sus características, categorías y aspectos más importantes.

2.1. La tarea de mantenimiento

Una tarea de mantenimiento es el conjunto de actividades que debe realizar el usuario para mantener la funcionalidad del elemento o sistema [1].

De esta forma, la entrada para el proceso de mantenimiento está representada por la necesidad de ejecución de una tarea específica a fin de que el usuario conserve la funcionalidad del elemento o sistema, mientras que la salida es la propia realización de la tarea de mantenimiento, como se muestra en la Figura 2. Es necesario fijarse que cada tarea específica requiere recursos específicos para su finalización, llamados recursos para la tarea de mantenimiento. También es importante recordar que cada tarea se realiza en un entorno específico, por ejemplo a bordo de un barco, bajo lluvia o nieve, en condiciones de guerra, radiación solar, humedad, temperatura y situaciones similares,

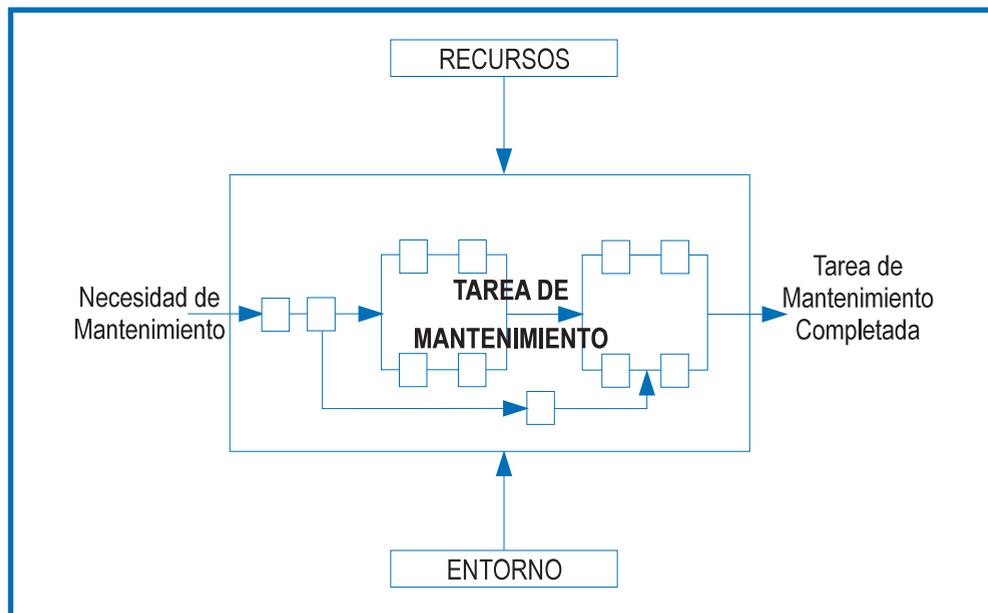


Figura 2 - TAREA DE MANTENIMIENTO -

que pueden tener un impacto significativo en la seguridad, precisión y facilidad de la finalización de la tarea.

Para ilustrar el anterior concepto se usará una tarea de mantenimiento muy simple. Está se relaciona con el cambio de una rueda de un turismo pequeño. El objetivo de esta tarea es recuperar la funcionalidad de un neumático defectuoso, reemplazando el conjunto de rueda y neumático por uno "funcionable". La lista de actividades especificadas que deben ser realizadas en secuencia aparece en la Tabla 5.

Las tareas de mantenimiento, como ésta por ejemplo, vienen especificadas en el manual del usuario que se entrega al adquirir el coche, al comienzo de la operación del sistema. Así mismo, todos los recursos de mantenimiento precisos para la adecuada realización de las tareas que se considera pueden ser llevadas a cabo el usuario, se los ha proporcionado el fabricante del coche, como parte del conjunto

Número de orden	Descripción de la actividad
1	Sacar la 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 5 - LISTA DE ACTIVIDADES COHERENTES DE UN MANTENIMIENTO -

entregado. La lista de los recursos necesarios para la tarea analizada se muestra en la Tabla 6.

Es necesario recalcar que el número de actividades componentes, su orden, así como el número, tipo y cantidad de recursos requeridos, dependen principalmente de las decisiones adoptadas durante la fase de diseño del elemento o sistema. En cierto modo, el orden de magnitud del tiempo requerido para la recuperación de la funcionabilidad (5 minutos, 5 horas ó 2 días) sólo se puede decidir al principio del proceso de diseño, mediante decisiones relacionadas con la complejidad de la tarea de mantenimiento, la accesibilidad de los elementos, la seguridad de la recuperación, la capacidad de prueba, la localización física del elemento; lo mismo ocurre con las decisiones relacionadas con los requisitos de los recursos de apoyo al mantenimiento (instalaciones, repuestos, herramientas, personal, etc.). Este tipo de análisis llevado a cabo por el equipo proyectista se conoce como análisis de mantenibilidad, mientras que las características del producto que son su consecuencia, se conoce como mantenibilidad [1].

Tipo de recursos	Recurso específico
Personal	el existente (el conductor, no precisa formación)
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	no aplicable

Tabla 6 - LISTA DE LOS RECURSOS DE MANTENIMIENTO REQUERIDOS -

2.2. Duración de la tarea de mantenimiento

Se acepta normalmente en la práctica de ingeniería que tareas de mantenimiento supuestamente idénticas, realizadas bajo similares condiciones, requieren diferentes lapsos de tiempo. Las razones principales para estas variaciones se pueden clasificar en tres grupos:

- 1) factores personales: que representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, vista, autodisciplina, formación, responsabilidad y otras características similares relacionadas con el personal implicado;
- 2) factores condicionales: que representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la condición física, forma, geometría y caracte-

rísticas similares del elemento o sistema sometido a mantenimiento;

- 3) factores de entorno: que reflejan la influencia de aspectos como temperatura, humedad, ruido, iluminación, vibración, momento del día, época del año, viento, etc. en el personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea de mantenimiento.

Consecuentemente, la única forma de evaluar el impacto de todos estos factores, y de muchos más, sobre la duración de las tareas de mantenimiento, es usar la teoría de probabilidades como base para la descripción cuantitativa de dicha duración.

Por tanto, se define la duración de la tarea de mantenimiento mediante la variable aleatoria DMT (Duration of Maintenance Task) y su distribución de probabilidad. Las características más usadas para su descripción cuantitativa son:

1. Función de mantenibilidad: $M(t)$, que es la función de distribución de la variable aleatoria DMT y representa la probabilidad de que la tarea de mantenimiento considerada se finalice satisfactoriamente en un tiempo especificado t , o antes:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= P(\text{tarea de mantenimiento se finalice en el tiempo } t, \text{ o antes}) \\
 &= P(DMT \leq t) \\
 &= \int_0^t m(t) dt
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

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

La Tabla 7 muestra la función de mantenibilidad para algunas distribuciones 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 y mantenibilidad [1].

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

Tabla 7 - FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD $M(t)$
PARA DISTRIBUCIONES TEÓRICAS CONOCIDAS -

2. Tiempo DMT_p : que representa el tiempo empleado en mantenimiento, para el que se finalizará un porcentaje dado de las tareas de mantenimiento consideradas. Es la abscisa del punto cuya ordenada presenta un porcentaje de recuperación dado. Matemáticamente, DMT_p puede representarse como:

$$DMT_p = t \rightarrow \text{para el que } M(t) = P(DMT \leq t) = \int_0^t m(t) dt = P \quad (2.2)$$

El utilizado con más frecuencia es el tiempo DMT_{90} que representa la duración del tiempo de recuperación para el que el 90 por ciento de los ensayos de mantenimiento han finalizado.

$$DMT_{90} = t \rightarrow \text{para el que } M(t) = P(DMT \leq t) = \int_0^t m(t) dt = 0,9 \quad (2.3)$$

En literatura orientada al entorno militar y en contratos que tratan de sistemas de armas, el valor numérico de DMT_{95} se adopta como tiempo máximo de reparación y se representa por M_{\max} [3]. Así, $M_{\max} = TTR_{95}$.

3. Duración esperada del tiempo de mantenimiento, MDMT, que representa la esperanza de la variable aleatoria DMT y que puede usarse para el cálculo de esta característica del proceso de mantenimiento:

$$E(DMT) = \int_0^{\infty} t \times m(t) dt \quad (2.4)$$

La característica anterior se conoce también como la duración media de la tarea de mantenimiento, representada por MDMT. Se puede también escribir:

$$E(DMT) = MDMT = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (2.5)$$

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

La Tabla 8 muestra la duración esperada del tiempo de mantenimiento para varias distribuciones conocidas, donde Γ es el símbolo de la función Gamma, cuyos valores numéricos pueden hallarse en la literatura de fiabilidad y mantenibilidad [1].

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

Tabla 8 - TIEMPO MEDIO
DE MANTENIMIENTO PARA DISTRIBUCIONES CONOCIDAS -

En la Figura 3 se muestra la representación gráfica de una hipotética función de mantenibilidad y los valores porcentuales más frecuentemente usados para DMT_p .

EJEMPLO 5. Para una tarea de mantenimiento cuya duración puede ser modelizada por la distribución Weibull con parámetros $A_m = 29$, $B_m = 2,9$ y $C_m = 0$, determínese: a) la probabilidad de que la tarea analizada se finalice satisfactoriamente en 20 minutos; b) el tiempo para que se realicen satisfactoriamente el 20% y el 95% de las tareas; c) la duración media de la tarea de mantenimiento, MDMT; y d) la probabilidad de que la tarea de mantenimiento que no ha sido completada en los primeros 29 minutos, se finalice dentro de los siguientes 10 minutos.

a) Haciendo uso de la Tabla 7, la función de mantenibilidad para esta tarea en particular se modeliza por la siguiente expresión:

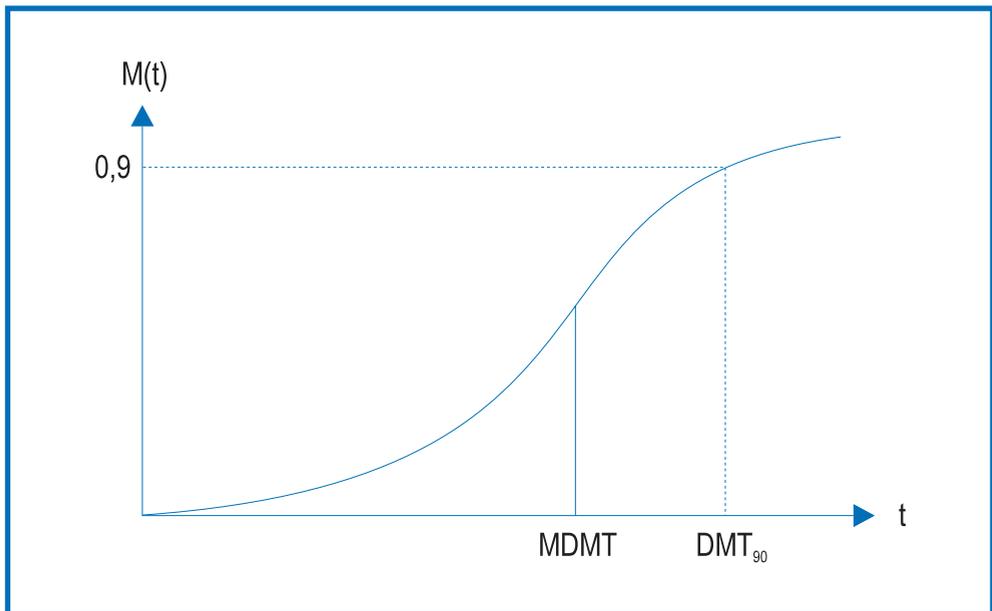


Figura 3 - MEDIDAS DE LA MANTENIBILIDAD -

$$M(20) = 1 - \exp - \left[\frac{(20 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} = 0,288 \quad (2.6)$$

¿Cuál es la probabilidad de que se recupere en 35 minutos?

$$M(35) = 1 - \exp - \left[\frac{(35 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} = 0,82 \quad (2.7)$$

b) El tiempo DMT_p representa el tiempo de recuperación para el se completa un porcentaje dado de tareas de mantenimiento. Para la distribución Weibull se puede calcular usando la siguiente ecuación

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

$$DMT_{20} = 29 \left[-\ln(1 - 0,2) \right]^{1/2,9} = 17,29 \text{ minutos} \quad (2.8)$$

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

c) Para la distribución de probabilidad Weibull, el valor numérico de $E(DMT) = MDMT$ será:

$$E(DMT) = MDMT = 29 \times \Gamma \left(1 + \frac{1}{2,9} \right) = 29 \times 0,892 = 25,87 \text{ minutos} \quad (2.9)$$

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

d) La probabilidad de que una tarea de mantenimiento se complete antes del tiempo t_2 , no habiéndose completado en el tiempo t_1 , puede determinarse como sigue:

$$P(DMT \leq t_2 | DMT > t_1) = 1 - \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)} \quad (2.10)$$

Dado que la tarea no se ha completado en los primeros 29 minutos, ¿cuál es la probabilidad de que se complete en los próximos 10 minutos?

$$P(\text{DMT} \leq 39 | \text{DMT} > 29) = \left[\frac{M(39) - M(29)}{1 - M(29)} \right] \quad (2.11)$$

Así, para la distribución de probabilidad Weibull:

$$M(29) = 1 - \exp - \left[\frac{(29 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} = 1 - 0,3678 = 0,632$$

$$M(39) = 1 - \exp - \left[\frac{(39 - 0)}{(29 - 0)} \right]^{2,9} = 1 - 0,094 = 0,906 \quad (2.12)$$

Por tanto:

$$P(\text{DMT} \leq 39 | \text{DMT} > 29) = \frac{0,906 - 0,632}{1 - 0,632} = 0,745 = 74,5\% \quad (2.13)$$

lo que significa en la práctica que hay una probabilidad de 0,74 de que la tarea de mantenimiento, que no se ha completado en los primeros 29 minutos, se complete con éxito durante los siguientes 10 minutos.

2.3. Clasificación de las tareas de mantenimiento

Según su objetivo, las tareas de mantenimiento se pueden clasificar en las tres siguientes categorías:

- 1) Tareas de mantenimiento correctivo,
- 2) Tareas de mantenimiento preventivo,
- 3) Tareas de mantenimiento condicional.

A continuación se hace un breve examen de cada una.

2.4. Tareas de mantenimiento correctivo

Las tareas de mantenimiento correctivo (Corrective Tasks, CRT) son las tareas que se realizan con intención de recuperar la funcio-

nabilidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren. Una tarea de mantenimiento correctivo típica consta de las siguientes actividades:

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

En la Figura 4 se muestra una representación gráfica de la tarea de mantenimiento CRT. La duración de la tarea se representa por DMT^c , que representa el tiempo transcurrido necesario para la conclusión con éxito de la tarea de mantenimiento correctivo.

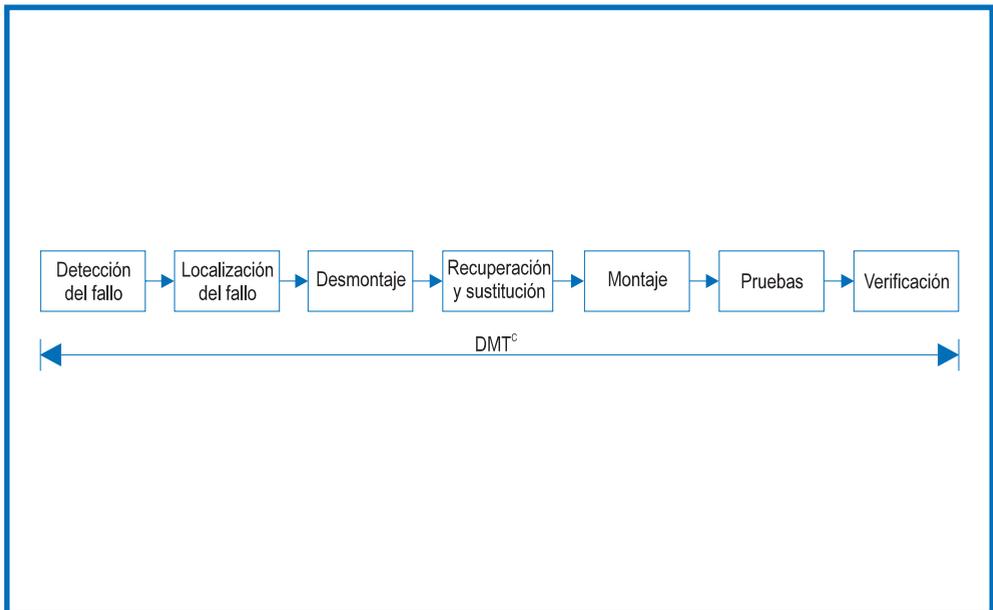


Figura 4 - REPRESENTACIÓN GRÁFICA
DE UNA TAREA TÍPICA DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO -

2.5. Tareas de mantenimiento preventivo

La tarea de mantenimiento preventivo (Preventive Task, PRT) es una tarea que se realiza para reducir la probabilidad de fallo del elemento o sistema, o para maximizar el beneficio operativo. Una tarea de mantenimiento preventivo típica consta de las siguientes actividades de mantenimiento:

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

En la Figura 5 se da una representación gráfica de la tarea de mantenimiento PRT. La duración de la tarea se representa por DMT^p , que representa el tiempo transcurrido necesario para la conclusión con éxito de la tarea de mantenimiento preventivo.

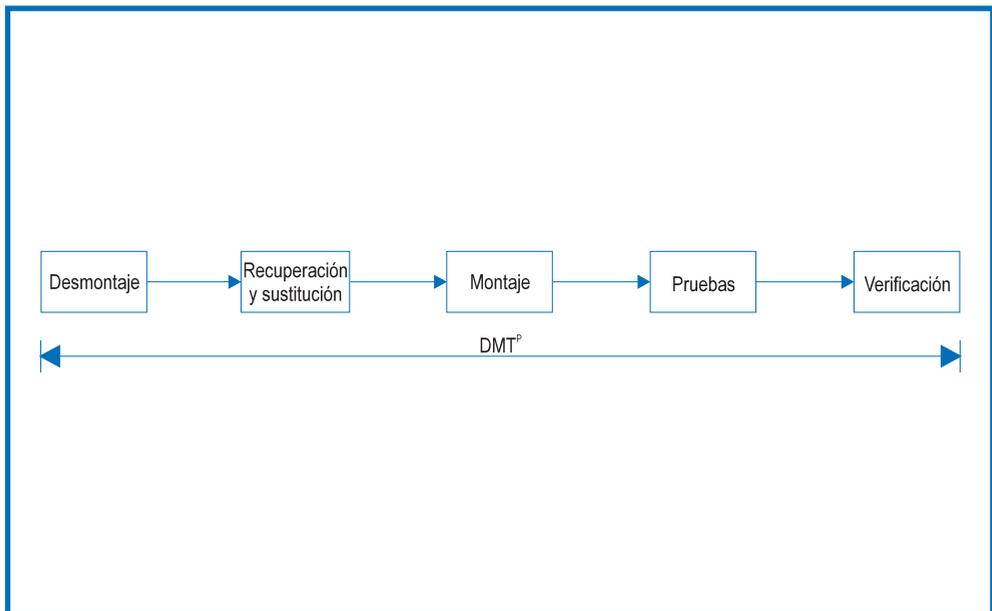


Figura 5 - REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA TAREA TÍPICA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO -

MANTENIMIENTO

Las tareas de mantenimiento de este tipo se realizan antes de que tenga lugar la transición al SoFa, con el objetivo principal de reducir:

- El coste de mantenimiento.
- La probabilidad de fallo.

Las tareas de mantenimiento preventivo más comunes son sustituciones, renovaciones, revisiones generales, etc. Es necesario recalcar que estas tareas se realizan, a intervalos fijos, como por ejemplo, cada 3.000 horas de operación, cada 10.000 millas, o cada 500 aterrizajes, al margen de la condición real de los elementos o sistemas.

En la Tabla 9 se presenta un típico ejemplo de tareas de mantenimiento preventivo realizadas por una mayoría de operadores de aviones comerciales de gran tamaño.

Tipo	Frecuencia [horas de vuelo]	Duración [días empleados]
Revisión mayor	18.000	25 - 30
Revisión intermedia	4.500	9
Revisión de servicio	800 - 3.000	1 - 2
Revisión en línea de vuelo	125 - 500	0,3

Tabla 9 - TIPOS Y FRECUENCIAS DE TAREAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO REALIZADAS EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA -

2.6. Tareas de mantenimiento condicional

Tradicionalmente, las políticas de mantenimiento preventivo y correctivo han sido preferidas por los directores de mantenimiento. Sin embargo, durante los últimos veinte años, muchas organizaciones industriales han reconocido los inconvenientes de estos métodos. Por tanto, la necesidad de proporcionar seguridad y de reducir el coste de mantenimiento, ha llevado a un interés creciente en el desarrollo de políticas de mantenimiento alternativas. Entonces, el método que parece ser más atractivo para minimizar las limitaciones de las tareas de mantenimiento existentes es la política de mantenimiento condicional, COT (Conditional Maintenance Task). Este procedimiento de mantenimiento reconoce que la razón principal para realizar el mantenimiento es el cambio en la condición y/o en las prestaciones, y que la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo debe estar basada en el estado real del elemento o sistema. De esta forma, mediante la vigilancia de ciertos parámetros sería posible identificar el momento más conveniente en que se deben realizar las tareas de mantenimiento preventivo.

Consecuentemente, la tarea de mantenimiento condicional representa una tarea de mantenimiento que se realiza para conseguir una visión de la condición del elemento o sistema, o descubrir un fallo oculto, a fin de determinar, desde el punto de vista del usuario, el curso de acción posterior para conservar la funcionalidad del elemento o sistema.

La tarea de mantenimiento condicional se basa en actividades de vigilancia de la condición que se realizan para determinar el estado físico de un elemento o sistema. Por tanto, el objetivo de la vigilancia de la condición, sea cual sea su forma, es la observación de los parámetros que suministran información sobre los cambios en la condición y/o en las prestaciones del elemento o sistema. La filosofía de la vigilancia de la condición es por tanto la evaluación de la condición en ese momento del elemento o sistema, mediante el uso de técnicas, para determinar la necesidad de realizar una tarea de mantenimiento preventivo, que pueden variar desde los simples sentidos humanos hasta un instrumental complejo.

Una tarea de mantenimiento condicional consta de las siguientes actividades de mantenimiento:

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

En la Figura 6 se muestra una representación gráfica de la tarea de mantenimiento COT. La duración de la tarea se representa por DMT^m , que indica el tiempo transcurrido necesario para la conclusión con éxito de la tarea de mantenimiento condicional.

Por lo tanto, la tarea de mantenimiento condicional es un reconocimiento de que la principal razón para llevar a cabo el mantenimiento es el cambio en la condición y/o en las prestaciones, y de que la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo deben basarse en la condición real del elemento o sistema. Así, gracias a la evaluación de la condición

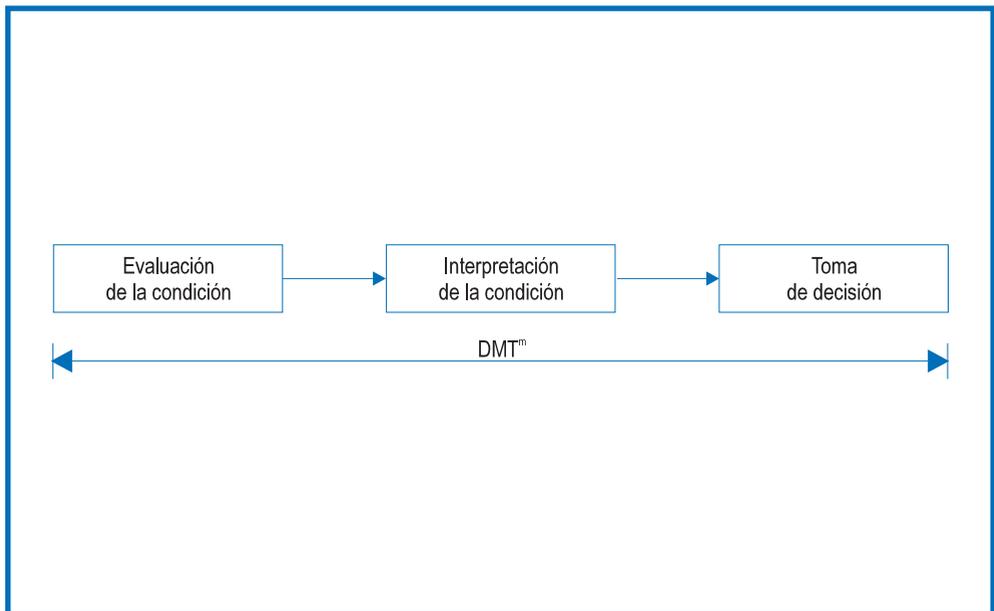


Figura 6 - REPRESENTACIÓN GRÁFICA
DE TAREA TÍPICA DE MANTENIMIENTO CONDICIONAL -

del sistema o elemento mediante la vigilancia de la condición del parámetro o parámetros seleccionados, es posible identificar el instante de tiempo más conveniente en que deben realizarse las tareas de mantenimiento preventivo. En consecuencia, las tareas de mantenimiento preventivo no se realizan mientras sea aceptable la condición del elemento o sistema.

2.6.1. Parámetros de vigilancia de la condición

En la práctica de ingeniería hay dos tipos diferentes de parámetros que permiten evaluar la condición del elemento o sistema [1]:

- i) Indicador adecuado de la condición (Relevant Condition Indicator, RCI).
- ii) Estimador adecuado de la condición (Relevant Condition Predictor, RCP).

Ambos se describen brevemente a continuación.

2.6.2. Indicador adecuado de la condición

Este es un parámetro observable que indica la condición del elemento o sistema, en el instante de la comprobación. Ejemplos típicos de RCI son:

- a) Los niveles de: presión, líquido de dirección asistida, vibración, ruido, aceite, agua, líquido de frenos, anticongelante, líquido del limpiaparabrisas.
 - b) La velocidad en «ralentí» del motor.
 - c) La tensión de la correa del alternador o de la bomba de agua.
 - d) El recorrido del pedal de embrague, o del freno de mano.
-

e) La geometría de las ruedas.

La condición del elemento o sistema será satisfactoria mientras el valor del RCI se mantenga sin alcanzar un nivel crítico, RCI_{cr} . Cuando se alcanza este nivel, debe realizarse la tarea de mantenimiento necesaria, porque el fallo ocurrirá tan pronto como el parámetro alcance su valor límite, RCI_{lim} , como ilustra la Figura 7. Es necesario recalcar que el RCI puede tener valores idénticos en diferentes instantes del tiempo operativo.

2.6.3. *Estimador adecuado de la condición*

El estimador adecuado de la condición, RCP, es un parámetro observable que describe la condición del elemento en cada instante del tiempo operativo. Normalmente, este parámetro está relacionado directamente con la forma, geometría, peso y otras características que describen la condición del elemento considerado. Típicos ejemplos de

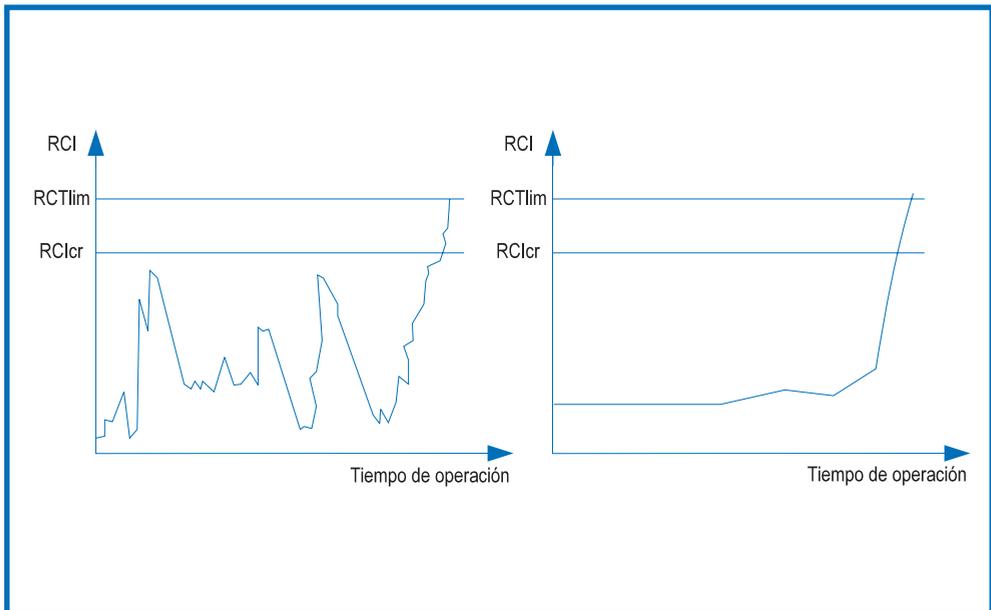


Figura 7 - CAMBIO DEL RCI DURANTE EL TIEMPO DE OPERACIÓN -

RCP son: el grosor de las paredes de tuberías, de las pastillas y zapatas de freno, del disco de freno, del disco de embrague, la longitud de grietas, la profundidad del dibujo de un neumático, el diámetro de un cilindro, etc. Por lo general, la condición del elemento o sistema es satisfactoria mientras que el RCP mantenga un valor que no alcance su nivel crítico, RCP_{cr} . En este punto debe realizarse la tarea de mantenimiento preventivo, porque el fallo ocurrirá tan pronto como el parámetro alcance su valor límite, RCP_{lim} . Es necesario recalcar que el RCP no puede tener valores idénticos para dos o más instantes de tiempo, como ilustra la Figura 8. Esto significa que el RCP crece o decrece continuamente con el tiempo de operación.

2.6.4. Tipos de tareas de mantenimiento condicional

Según la manera en que se usa la información obtenida acerca de la condición del elemento para evaluar la condición del elemento o

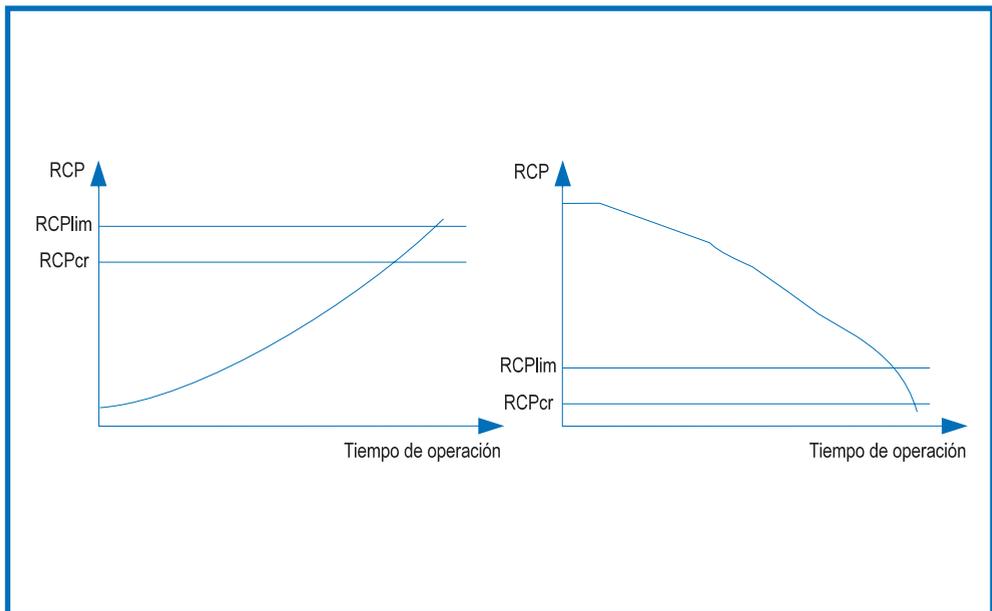


Figura 8 - CAMBIO DEL RCP DURANTE EL TIEMPO DE OPERACIÓN -

sistema, se pueden distinguir dos tareas de mantenimiento condicional diferentes [2]:

- a) Inspección.
- b) Examen.

Ambas se analizan brevemente a continuación.

2.6.5. La inspección como tarea condicional

La inspección es una tarea específica de mantenimiento condicional, cuyo resultado es un informe sobre la condición del elemento, esto es, si la condición es satisfactoria o insatisfactoria, lo que se determina por el valor del RCI. La característica común de todas estas tareas es que los resultados obtenidos no tienen ningún efecto en la programación de la próxima comprobación. Antes de poner en servicio el elemento o sistema se determina la frecuencia de inspecciones más conveniente, TI. Por tanto, a lo largo de la operación del elemento o sistema se realizan las inspecciones a intervalos fijos especificados, hasta que se alcanza el nivel crítico, $RCI(TI) > RCI_{cr}$, en cuyo momento se realizan las tareas de mantenimiento preventivo prescritas.

2.6.6. El examen como tarea condicional

El examen es otro tipo de tarea de mantenimiento condicional que tiene como resultado una descripción numérica de la condición del elemento en ese momento a través del RCP. Contrariamente a las tareas condicionales basadas en la inspección, en este caso los resultados del examen afectan directamente a la programación del siguiente examen, TE^n . Esto es posible debido a las propiedades y características únicas del RCP. Antes de que el elemento empiece a funcionar, se determina solamente el tiempo óptimo TE^1 para la ejecución del primer examen, junto con el nivel crítico del parámetro

adecuado de la condición, RCP_{cr} . En el momento del primer examen, se describe numéricamente la condición del elemento mediante el valor medido del RCP, $MRCP(TE^1)$, siendo posibles las dos opciones siguientes:

1. $MRCP(TE^1) > RCP_{cr}$: se debe realizar la tarea de mantenimiento preventivo necesario.
2. $MRCP(TE^1) \leq RCP_{lim}$: se puede continuar usando el elemento o sistema.

2.7. El coste directo de la tarea de mantenimiento

El coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento (Cost of Maintenance Task, CMT), está relacionado con el coste de los recursos de mantenimiento (Cost of Maintenance Resources, CMR), utilizados directamente durante la ejecución de la tarea:

$$CMT = f(C_s, C_m, C_p, C_{te}, C_f, C_d) \quad (2.14)$$

donde: C_s = coste de los repuestos, C_m = coste del material, C_p = coste del personal, C_{te} = coste de las herramientas y el equipo, C_f = coste de las instalaciones, C_d = coste de los datos técnicos.

Es necesario recalcar que el tipo y cantidad de todos los recursos de mantenimiento necesarios para la conclusión con éxito de cualquier tarea de mantenimiento son consecuencia del diseño del elemento o sistema y se estudian durante el análisis de mantenibilidad del proceso de diseño.

El coste del personal ligado a una tarea de mantenimiento específico, es función de las siguientes variables:

$$C_p = f(DMT, HCP) \quad (2.15)$$

donde:

DMT (Duration of Elapsed Maintenance Time) es una variable aleatoria que representa el tiempo empleado en la tarea de mantenimiento,

HCP (Hourly Cost of Personnel) representa el valor monetario del coste horario del personal empleado en la ejecución de una tarea específica de mantenimiento.

En la práctica diaria, los ingenieros tratan con más frecuencia con el valor medio del coste directo de la tarea de mantenimiento, que puede definirse como:

$$\text{MCMT} = C_s + C_m + C_{te} + C_f + C_d + \text{MDMT} * \text{HCP} \quad (2.16)$$

si suponemos que el coste de todos los recursos de mantenimiento, salvo el personal, es constante.

Sin embargo, la expresión general del coste de cada tarea de mantenimiento depende de los valores porcentuales de las variables aleatorias DMT, definidas en la ecuación (2.2), y por tanto:

$$\text{CMT}_p = C_s + C_m + C_{te} + C_f + C_d + \text{DMT}_p * \text{HCP} \quad (2.17)$$

donde las expresiones de los valores porcentuales de la duración de la tarea de mantenimiento vienen definidas completamente por las distribuciones de probabilidad teóricas disponibles [1].

Por ejemplo, si el usuario quiere conocer el coste directo de mantenimiento que cubriría, por ejemplo, el 80 por ciento de las tareas de mantenimiento realizadas, se usaría la siguiente expresión:

$$\text{CMT}_{80} = C_s + C_m + C_{te} + C_f + C_d + \text{DMT}_{80} * \text{HCP} \quad (2.18)$$

En la Figura 9 se muestra la representación gráfica de la ecuación (2.18).

Es necesario subrayar que el coste definido en la ecuación (2.17) puede diferir considerablemente según los diferentes tipos de tareas

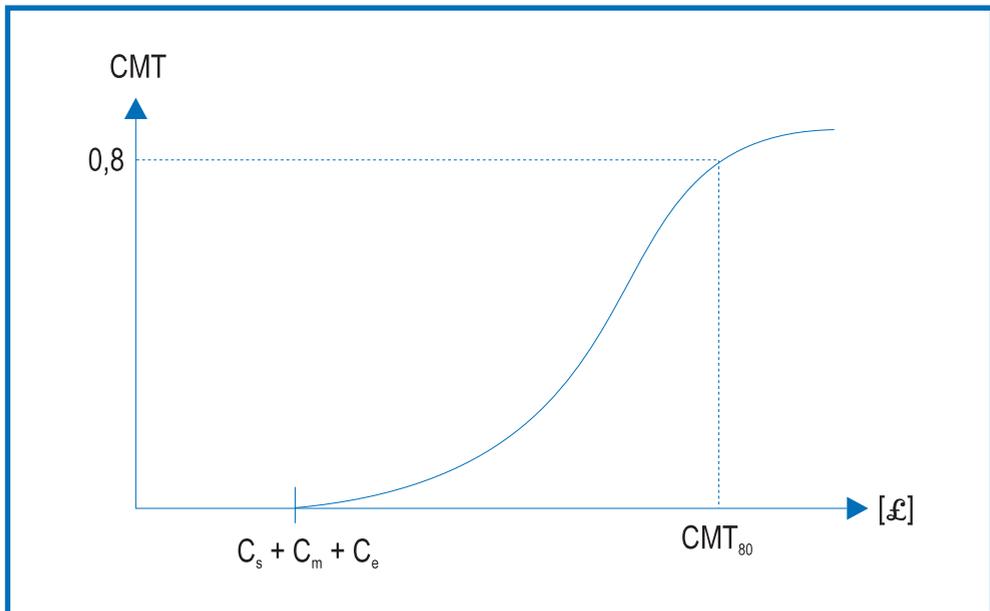


Figura 9 - EL COSTE DE LA TAREA DE MANTENIMIENTO COMO VARIABLE ALEATORIA -

de mantenimiento. La razón principal es el hecho de que las tareas de mantenimiento preventivo se realizan en un instante de tiempo predefinido, antes de que el fallo tenga lugar, lo que significa que los recursos de mantenimiento usados para la conclusión de esta tarea con éxito son los absolutamente necesarios. Sin embargo, en el caso de las tareas de mantenimiento correctivo, existe una alta posibilidad de que se desarrollen fallos secundarios causados por la presencia de fallos primarios, lo que a su vez puede exigir el uso de algunos recursos adicionales. Por ejemplo, el fallo de la correa de ventilación en el motor de un coche puede causar un recalentamiento del motor, lo que a su vez puede causar más daños al motor.

2.7.1. Coste directo de la tarea de mantenimiento correctivo

El coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento correctivo, CMT^c , está relacionado con el coste de los recursos de

mantenimiento necesarios para la conclusión con éxito de la tarea, CMT^c . La expresión general del coste de cada tarea de mantenimiento correctivo tendrá la forma siguiente:

$$CMT^c = f(C_s^c, C_m^c, C_{te}^c, C_f^c, C_d^c, DMT^c, HCP^c) \quad (2.19)$$

En la práctica diaria, los ingenieros tratan con más frecuencia con el valor medio de los costes de mantenimiento correctivo, lo que se representa mediante $MCMT^c$.

$$MCMT^c = C_s^c + C_m^c + C_{te}^c + C_f^c + C_d^c + (MDMT^c * HCP^c) \quad (2.20)$$

2.7.2. *Coste directo de la tarea de mantenimiento preventivo*

El coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento preventivo, CMT^p , está relacionado con el coste de los recursos de mantenimiento necesarios para la conclusión con éxito de la tarea. De esta forma, la expresión general del coste de cada tarea de mantenimiento preventivo tendrá la forma siguiente:

$$CMT^p = f(C_s^p, C_m^p, C_{te}^p, C_f^p, C_d^p, DMT^p, HCP^p) \quad (2.21)$$

En la práctica diaria, los ingenieros tratan con más frecuencia con el valor medio de los costes de mantenimiento preventivo, que se representa mediante $MCMT^p$.

$$MCMT^p = C_s^p + C_m^p + C_{te}^p + C_f^p + C_d^p + (MDMT^p * HCP^p) \quad (2.22)$$

2.7.3. *Coste directo de la tarea de mantenimiento condicional*

El coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento condicional, CMT^m , está relacionado con el coste de los recursos de mantenimiento necesarios para la conclusión con éxito de la tarea,

CMR^m. Consecuentemente, la expresión general del coste de cada tarea de mantenimiento condicional tendrá la forma siguiente:

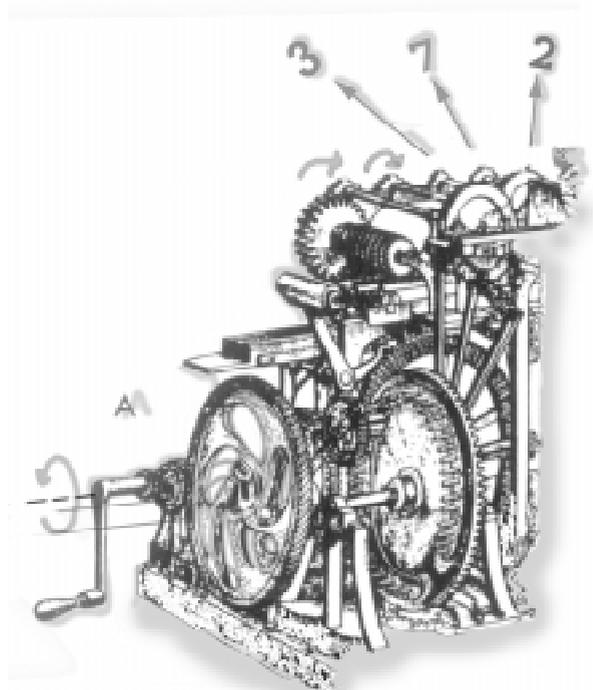
$$CMT^m = f(C_s^m, C_m^m, C_{te}^m, C_f^m, C_d^m, DMT^m, HCP^m) \quad (2.23)$$

En la práctica diaria, los ingenieros tratan con más frecuencia con el valor medio de los costes de mantenimiento condicional, que se representa mediante MCMT^p.

$$MCMT^m = C_s^m + C_m^m + C_{te}^m + C_f^m + C_d^m + (MDMT^m * HCP^m) \quad (2.24)$$

3

Política de mantenimiento basada en el fallo



La política de mantenimiento basada en la presentación del fallo (Failure Based, FB) constituye un método en que se realizan tareas de mantenimiento correctivo tras ocurrir un fallo, a fin de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema considerado. Por consiguiente, este método de mantenimiento se puede describir como de reparación de averías, posterior al fallo, o no programado. En la Figura 10 se representa un diagrama de procedimiento para la política de mantenimiento basada en el fallo. Por lo general, esta política se aplica a elementos

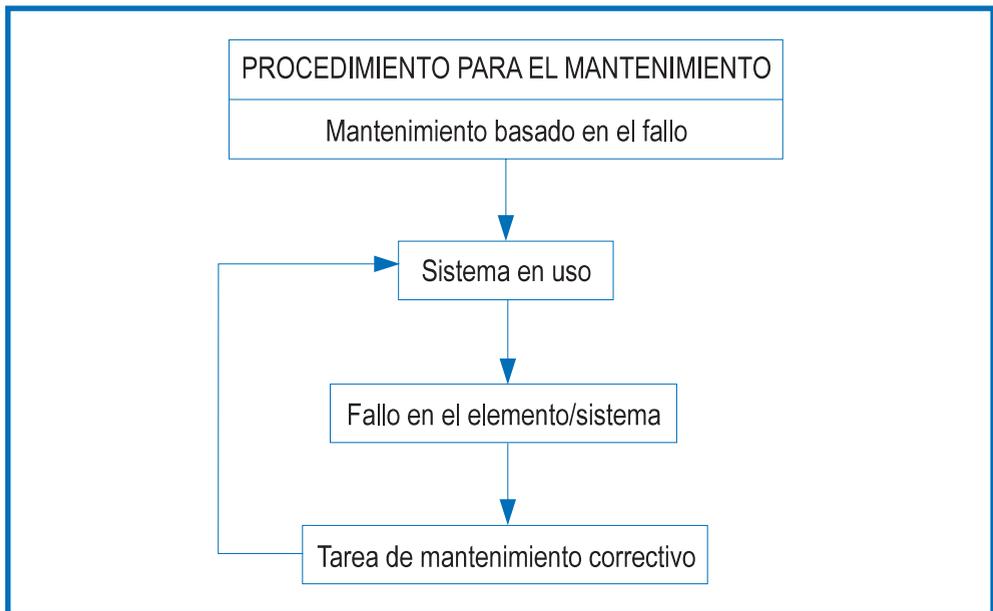


Figura 10 - ALGORITMO
PARA UNA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL FALLO -

cuya pérdida de funcionalidad no repercute en la seguridad del usuario y/o del entorno o en las consecuencias económicas del fallo.

3.1. Ventajas del mantenimiento basado en el fallo

El principal atractivo de esta política de mantenimiento es la total utilización de la vida operativa del elemento considerado. Ello significa en la práctica que el tiempo medio para el mantenimiento (Mean Time To Maintenance, MTTM) de los elementos sometidos a esta política de mantenimiento, $MTTM^f$, es idéntico al MTTF. En consecuencia el coeficiente de utilización de los elementos considerados, CU^f , valdrá siempre 1:

$$CU^f = \frac{MTTM^f}{MTTF} = 1 \quad (3.1)$$

siendo

$$MTTM = MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.2)$$

donde: $R(t)$ se conoce como función de fiabilidad, definida como [1]:

$$R(t) = P(TTF > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (3.3)$$

en que $f(t)$ representa la función de densidad de la variable aleatoria conocida como tiempo hasta el fallo (Time To Failure, TTF). Ver Figura 11.

En la práctica ello implica que cuando se aplica la política de mantenimiento FB, el usuario recupera íntegramente su inversión monetaria en el elemento o sistema.

3.2. Inconvenientes del mantenimiento basado en el fallo

A pesar de la ventaja monetaria que ofrece esta política de mantenimiento, presenta ciertos inconvenientes, entre los que los más importantes son los siguientes:

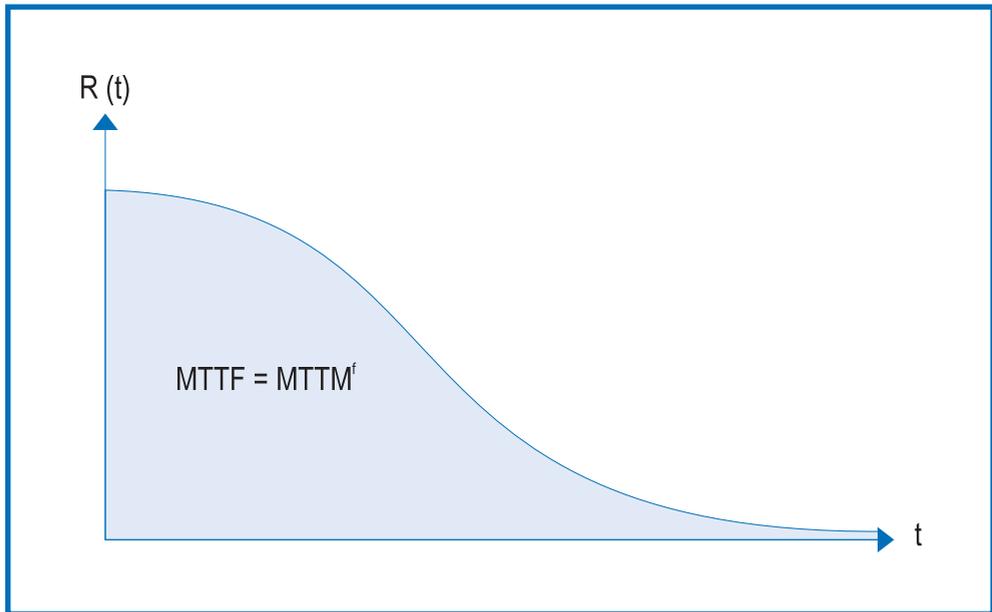


Figura 11 - RELACIÓN ENTRE $MTTM^f$ Y $MTTF$
PARA UNA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL FALLO -

- a) El fallo de un elemento puede a su vez acarrear daños a otros elementos del sistema o al sistema mismo. Los análisis de los costes de mantenimiento han demostrado que una reparación realizada tras un fallo, será normalmente tres o cuatro veces más cara que si se hubieran realizado tareas de mantenimiento preventivo [4].
- b) Como el tiempo de aparición del fallo es incierto no puede planearse la tarea de mantenimiento, por lo que deben esperarse mayores tiempos de inmovilización, debido a la indisponibilidad de recursos (repuestos, personal, herramientas...).

Por tanto, esta política puede llegar a ser más costosa, debido al coste directo para recuperar la funcionalidad del sistema, y al coste indirecto incurrido como resultado de la pérdida de producción, prestigio e incluso vidas.

3.3. Coste total directo de la política de mantenimiento basada en el fallo

Para evaluar el coste directo relacionado con la aplicación de la política de mantenimiento FB a un elemento o sistema, es necesario analizar todas las categorías de costes relacionadas. Así, durante el tiempo de operación fijado T_{st} , por ejemplo, un año o 3.000 horas, el coste total directo de mantenimiento, $CFM(T_{st})$, es una función de:

- a) El coste directo de cada tarea de mantenimiento correctivo realizado, CMT^c .
- b) El número de tareas de mantenimiento correctivo, NMT^c , realizadas durante el tiempo de operación fijado.
- c) La duración del propio tiempo de operación, T_{st} .
- d) El coste de oportunidad, o el coste de pérdida potencial de ingresos, CLR .

De esta forma, la expresión general para el coste total directo de la política de mantenimiento FB podría ser:

$$CFM(T_{st}) = f(CMT^c, NMT^c, T_{st}, CLR) \quad (3.4)$$

Como el análisis realizado hasta ahora del coste de mantenimiento demuestra claramente que los dos primeros elementos de la expresión anterior son variables aleatorias, se deduce que el coste total de mantenimiento para un tiempo de operación fijado es también una variable aleatoria. De esta forma, lo que se usa más frecuentemente en el análisis de mantenimiento de problemas reales es su valor esperado o esperanza matemática. Por consiguiente, el coste medio total de mantenimiento para un tiempo de operación fijado, $MCFM(T_{st})$ es una función de los valores esperados de los elementos de que consta en la ecuación (3.4), que podría escribirse de la siguiente manera:

$$\text{MCFM}(T_{st}) = f(\text{MCMT}^c, \text{MNMT}^c, T_{st}, \text{MCLR}^c) \quad (3.5)$$

Antes de deducir la expresión final del $\text{MCFM}(T_{st})$ es necesario determinar la de cada uno de los elementos de que consta.

El coste medio de las tareas de mantenimiento correctivo se define mediante la ecuación (2.20).

El número esperado de tareas de mantenimiento realizadas durante el tiempo de operación fijado, en los casos de política de mantenimiento FB, es igual al número medio de fallos producidos en este período, $E(\text{NMT}(T_{st})) = \text{MNF}(T_{st})$. En el caso de operación discontinua puede expresarse así [2]:

$$\text{MNMT}(T_{st}) = \text{MNF}(T_{st}) = \sum_{i=1}^{\infty} F^i(T_{st}) \quad (3.6)$$

donde $F^i(T_{st})$ es la función acumulativa del tiempo hasta el i -ésimo fallo [2].

En los casos en que el tiempo fijado es mucho mayor que el tiempo medio hasta el fallo, $T_{st} \gg \text{MTTF}$, la ecuación (3.6) puede aproximarse a la siguiente expresión:

$$\text{MNMT}(T_{st}) = \text{MNF}(T_{st}) = \frac{T_{st}}{\text{MTTF}} \quad (3.7)$$

El coste de los ingresos perdidos, CLR, es función de las siguientes variables:

$$\text{CLR} = f(\text{DMT}^c, \text{DST}^c, \text{HR}) \quad (3.8)$$

donde DMT^c representa una variable aleatoria conocida como duración de la tarea de mantenimiento, y está relacionada con el tiempo de mantenimiento activo [1]; DST^c representa una variable aleatoria conocida como duración de la tarea de apoyo, y está relacionada con el tiempo empleado en el apoyo, que es el tiempo durante el que la tarea de mantenimiento requerida no puede completarse satisfactoriamente debido a la falta de recursos (repuestos, material, personal

cualificado, herramientas, equipo especializado necesario, instalaciones, etc.) [1]. Es necesario puntualizar que la aplicación de diferentes políticas de reparación de los elementos averiados tiene un impacto significativo en el DST^c, por ejemplo:

a) Elementos que se descartan tras su fallo: la variable aleatoria DST^d es función del tiempo de retraso logístico, LDT, y el correspondiente tiempo de retraso administrativo, ADT:

$$\text{DST}^d = f(\text{LDT}, \text{ADT}) \quad (3.9)$$

b) Elementos que son reparables tras su fallo: la variable aleatoria DST^r es la función del tiempo de retorno, TAT, y el correspondiente tiempo de retraso administrativo, ADT:

$$\text{DST}^r = f(\text{TAT}, \text{ADT}) \quad (3.10)$$

HR representa el valor monetario de las pérdidas para el explotador o usuario, producidas durante cada hora en que el elemento o sistema está indisponible para generar ingresos.

Para desarrollar la expresión que determina el coste de ingresos perdidos para un mantenimiento FB, se usarán los valores medios de los elementos de que consta la ecuación (3.8):

$$\text{MCLR} = (\text{MDMT}^c + \text{MDST}^c) \times \text{HR} \quad (3.11)$$

Por tanto, el coste medio de una política de mantenimiento FB para un tiempo fijado es igual al producto del coste directo de mantenimiento de cada tarea de mantenimiento exigida por el fallo, aumentado con el coste de los ingresos perdidos, definido por la expresión (3.5), y del número medio de tareas de mantenimiento correctivo realizadas durante la vida operativa fijada, definido por la ecuación (3.7). Haciendo uso de las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.11), es posible deducir la expresión final para determinar el coste total directo esperado para una política de mantenimiento FB:

$$\text{MCFM}^f(T_{st}) = (\text{MCMT}^c + \text{MCLR}) \times \text{MNMT}^c(T_{st}) \quad (3.12)$$

Para ilustrar el método presentado de evaluación de la conveniencia de la política de mantenimiento FB, se usará el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 6. Consideremos un modelo de bomba de gasolina que consta de tres elementos. El problema es determinar la política óptima de mantenimiento que produzca el coste total mínimo para 240.000 kilómetros. Los datos apropiados se presentan en la Tabla 10. La tasa horaria de ingresos estimada es de 10 libras.

Solución. Para brevedad de la exposición, sólo se dan los detalles más importantes en la Tabla 11 (se usó la ecuación (3.6) para calcular el $\text{MNF}(T_{st})$).

Características y Unidades	Elementos		
	1	2	3
Tarea de mantenimiento	Sustitución	Limpieza	Sustitución
Distribución de fallos	Normal	Normal	Normal
MTFF (km)	60.000	80.000	100.000
SDTFF (km)	18.000	20.000	30.000
CCsp (libra)	250	30	1.200
CCm (libra)	15	3	150
CCp (libra)	500	300	1.000
MDMT (hrs)	10	5	300
MDST (hrs)	90	45	0

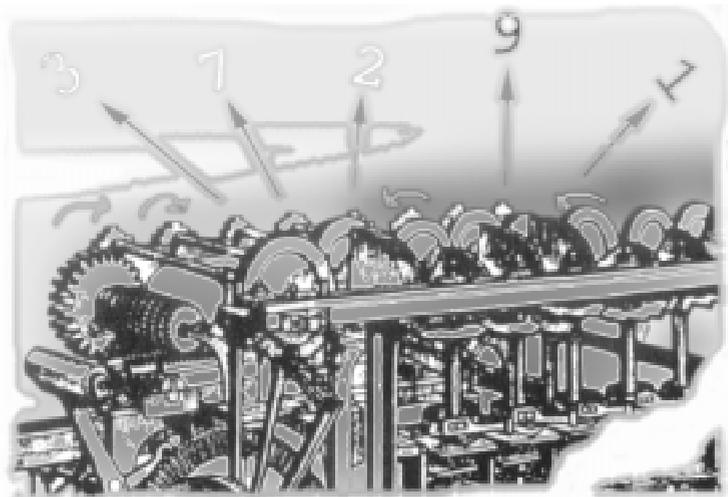
Tabla 10 - DATOS DE ENTRADA PARA EL EJEMPLO 3.1 -

Características y Unidades	Elementos		
	1	2	3
Tarea de mantenimiento	Sustitución	Limpieza	Sustitución
CMT ^c (libras)	765	333	2.350
CLR (libra)	1.000	500	3.000
MNF (240.000)	4,293	3,034	2,338
MCFM (240.000) (libras)	7.577,1	2.527,3	12.508,3

Tabla 11 - VALORES OBTENIDOS PARA UNA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO FB -

4

Política de mantenimiento basada en la duración de vida del sistema



Según la política de mantenimiento basada en la duración de vida del sistema (Life-Based, LB), se realizan tareas de mantenimiento preventivo a intervalos fijos, que son función de la distribución de vida de los elementos considerados. Como el principal objetivo es prevenir el fallo y sus consecuencias, este método de mantenimiento es a menudo llamado política de mantenimiento preventivo. Otro nombre que puede encontrarse en la literatura para esta política, es el de mantenimiento planificado. La razón es que las tareas de mantenimiento se realizan en un tiempo operativo predeterminado, lo que significa que es posible planificar todas las tareas y proporcionar todo el apoyo preciso.

En la Figura 12 se presenta un diagrama del procedimiento de mantenimiento LB. El tiempo para efectuar el mantenimiento, TP, se determina incluso antes de que el elemento haya comenzado a funcionar. A intervalos predeterminados de la vida en estado funcionable, se llevan a cabo tareas de mantenimiento preventivo especificadas. Si el elemento falla antes del tiempo TP, el usuario debe realizar tareas de mantenimiento correctivo; en el momento TP es necesario realizar la tarea preventiva planeada, como muestra la Figura 12.

La política de mantenimiento LB puede aplicarse con efectividad a elementos o sistemas que cumplen algunos de los siguientes requisitos:

- a) Al realizar la tarea se reduce la probabilidad de producción de fallos en el futuro.
-

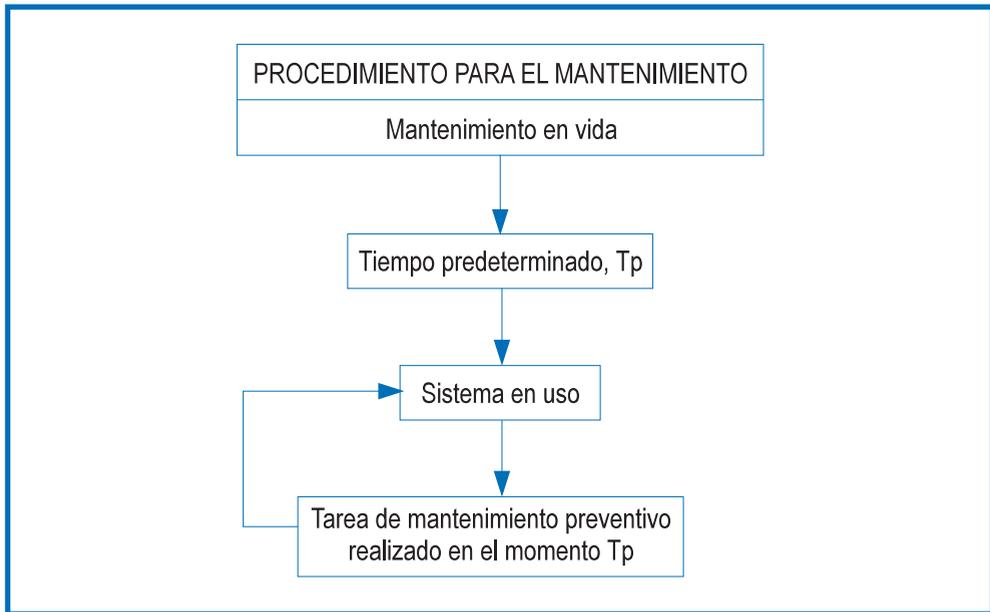


Figura 12 - ALGORITMO
PARA UNA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN LA VIDA DEL SISTEMA -

- b) El coste total de aplicar esta política es sustancialmente menor que el de la política de mantenimiento FB.
- c) La observación de la condición del elemento no es técnicamente factible o es económicamente inaceptable.

4.1. Ventajas de la política de mantenimiento LB

Una de las principales ventajas de esta política de mantenimiento es el hecho de que las tareas de mantenimiento preventivo se realizan en un instante de tiempo predeterminado, con lo que pueden suministrarse por anticipado todos los recursos de apoyo al mantenimiento, evitando posibles interrupciones costosas.

Otra ventaja de la política LB es evitar la producción de fallos, que en algunos casos pueden tener consecuencias catastróficas para

el usuario o explotador y para el entorno (Chernobyl, Bophal, Piper Alpha, etc.).

4.2. Inconvenientes de la política de mantenimiento LB

A pesar de las ventajas presentadas anteriormente, la política de mantenimiento LB tiene bastantes inconvenientes que deben reconocerse y minimizarse. Por ejemplo, puede ser poco rentable porque se reemplazan prematuramente la mayoría de los elementos, independientemente de su estado. El coeficiente de utilización del elemento o sistema considerado, CU^l , definido como:

$$CU^l = \frac{MTTM^p}{MTTF} \ll 1 \quad (4.1)$$

es menor que 1. En esa expresión, $MTTM^p$ es el tiempo medio para el mantenimiento LB, que se define como:

$$MTTM^p = \int_0^{TP} D(t) dt \ll MTTF \quad (4.2)$$

como se ilustra en la Figura 13.

4.2.1. Coste de la política de mantenimiento LB

El coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento, CMT, está relacionado con el coste de recursos de mantenimiento, CMR, por un lado, y por otro con el coste de las consecuencias, CLR, que en este caso está relacionado con los ingresos perdidos por el usuario debido a la indisponibilidad del sistema.

Así, la expresión general del coste de cada tarea de mantenimiento tendrá diferentes formas para diferentes políticas de mantenimiento, como se muestra a continuación:

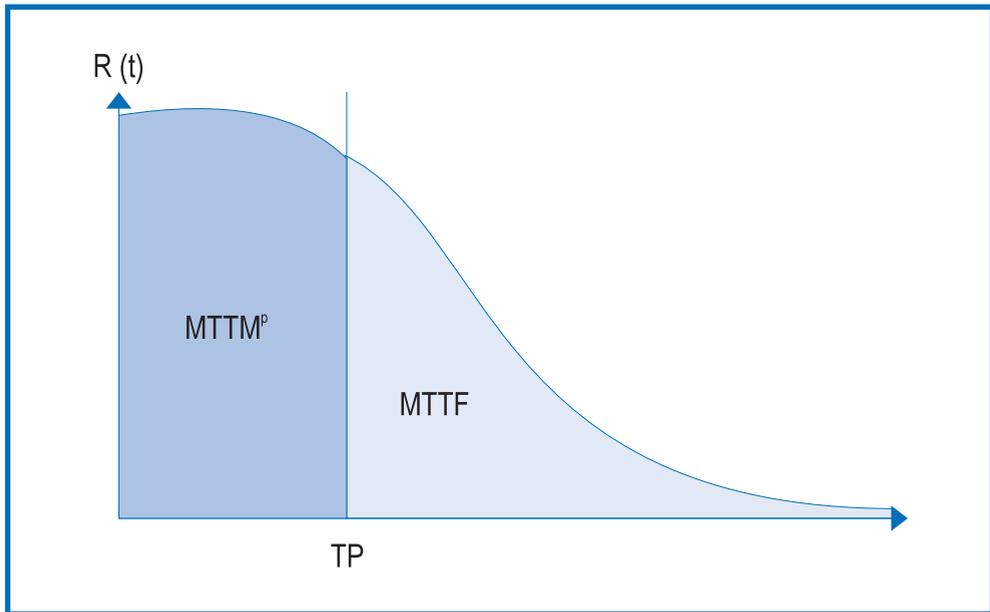


Figura 13 - RELACIÓN
ENTRE $MTTM^p$ Y $MTTF$ PARA UNA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO LB -

$$CMT^p = C_{sp}^p + C_m^p + C_p^p + (DMT^p + DST^p) \times HR \quad (4.3)$$

CMT^p es el coste correspondiente en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema.

La expresión general del coste de cada tarea de mantenimiento depende de los valores porcentuales que toman las variables aleatorias anteriormente mencionadas:

$$CMT_p^p = C_s^p + C_m^p + C_p^p + (DMT_p^p + DST_p^p) \times HR \quad (4.4)$$

Por ejemplo, si el usuario desea conocer el coste de mantenimiento que cubrirá, por ejemplo, el 80 por ciento de las tareas de mantenimiento realizadas, se usaría la siguiente expresión:

$$CMT_{80}^p = C_s^p + C_m^p + C_p^p + (DMT_{80}^p + DST_{80}^p) \times HR \quad (4.5)$$

En la práctica diaria, los ingenieros tratan más frecuentemente con los valores medios de los costes de mantenimiento, lo que se incorpora de la siguiente forma:

$$\text{MCMT}^p = C_s^p + C_m^p + C_p^p + (\text{MDMT}^p + \text{MDST}^p) \times \text{HR} \quad (4.6)$$

4.3. El coste mínimo como criterio de optimización

El coste directo total asociado con cada tarea de mantenimiento, CMT, está relacionado por un lado con el coste de los recursos de mantenimiento utilizados durante la ejecución de la tarea, CMR (ver expresión (2.16)), y por otro, con el coste de las consecuencias, CLR, que en este caso se refiere a la posible pérdida de ingresos para el usuario debido a la indisponibilidad del sistema. Así,

$$\text{CMT} = \text{CMR} + \text{CLR} \quad (4.7)$$

Es necesario subrayar que el coste definido por la expresión anterior puede variar como consecuencia de la adopción de diferentes tareas de mantenimiento, debido al hecho de que las tareas de mantenimiento preventivo se realizan en un instante de tiempo predefinido, con todos los recursos de apoyo al mantenimiento preparados de antemano, mientras que en el caso de una tarea de mantenimiento correctivo, los recursos de mantenimiento no siempre están disponibles. Así, la expresión general del coste de este tipo de tarea de mantenimiento será:

$$\text{CMT}^l = \text{CMR}^l + (\text{MDMT}^l + \text{MDST}^l) \times \text{HR} \quad (4.8)$$

El coste total medio de la política de mantenimiento basada en la vida del sistema, para un período de tiempo fijado, $\text{MCLM}(T_{st})$, es una función del coste de las tareas correctivas realizadas durante el intervalo TP, y del coste de realizar una tarea preventiva, en el instante TP.

El coste total de las tareas correctivas en el intervalo TP es igual al producto del número medio de fallos entre dos sustituciones

preventivas, expresado mediante $MNF(TP)$, y el coste de cada tarea correctiva, CMT^c .

El coste medio de la tarea de mantenimiento preventivo por unidad de operación para un TP específico, expresado como $UMC^l(TP)$, puede representarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$UMC^l(TP) = \left[\frac{F(TP) \times CMT^c + CMT^p}{TP} \right]_{\min} \quad (4.9)$$

La ecuación anterior puede usarse iterativamente a fin de hallar los valores de TP para los que el coste medio de la unidad sea mínimo.

Es necesario decir que, en la expresión anterior, $MNF(TP)$ podría sustituirse por $F(TP)$, porque la diferencia entre ellos en el intervalo de tiempo TP es muy pequeña:

$$UMC^l = \left[\frac{F(TP) \times CMT^c + CMT^p}{TP} \right]_{\min} \quad (4.10)$$

donde $F(TP)$ es la función de distribución del tiempo hasta el fallo, $F(TP) = P(TTF \leq TP)$.

Haciendo uso del análisis anterior, la expresión final del coste esperado de mantenimiento durante el período fijado de tiempo de operación será:

$$MCLM^l(T_{st}) = T_{st} \times UMC^l \quad (4.11)$$

Es importante subrayar que el modelo usado no está restringido a una particular distribución de probabilidad del tiempo hasta el fallo del elemento considerado, es decir, es aplicable a las distribuciones de probabilidad Weibull, normal, lognormal, exponencial o cualquier otra.

EJEMPLO 7. Consideremos un modelo de motor eléctrico que consta de tres elementos recambiables. El problema es determinar la política de mantenimiento óptima que minimizará el coste total de mantenimiento para 240.000 kilómetros. Los datos necesarios se

presentan en la Tabla 12. La tasa horaria de ingresos estimada es de 10 libras.

Solución. Para brevedad de la exposición, sólo se presentan los detalles más relevantes de este caso. En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos para los intervalos de mantenimiento preventivo para cada elemento.

En consecuencia, las frecuencias óptimas de mantenimiento LB son: 40.000 kilómetros para los elementos 1 y 2, y 80.000 kilómetros para el elemento 3.

4.4. La máxima disponibilidad como criterio de optimización

La realización más frecuente de las tareas de mantenimiento podría reducir el tiempo correctivo de inmovilización y así mejorar la

Características y Unidades	Elementos		
	1	2	3
Tarea de mantenimiento	Sustitución	Limpieza	Sustitución
Distribución de fallos	Normal	Normal	Normal
MTFF (km)	60.000	80.000	100.000
SDTFF (km)	18.000	20.000	30.000
$C_s^p = C_s^p$ (pound)	250	30	1.200
$C_m^c = C_m^p$ (pound)	15	3	150
$C_p^c = C_p^p$ (pound)	500	300	1.000
MDMT ^c = MDMT ^p (hrs)	10	5	300
MDST ^c = MDST ^p (hrs)	90	45	0

Tabla 12 - DATOS DE ENTRADA PARA EL EJEMPLO 7 -

Elemento(s)	Intervalos de mantenimiento, TP (1.000 km)				
	20	40	60	80	100
	M C L M (TP)				
1	5525	3909*	5310	6418	6470
2	1966	1092*	1185	1753	2158
3	36896	19038	14190	13258*	13983

Tabla 13 - COSTE DE LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO LB -

disponibilidad. Sin embargo, la ejecución de cualquier tarea de mantenimiento exige cierto tiempo. En consecuencia, cuanto más frecuentemente se llevan a cabo tareas preventivas, menos disponible para el uso se encuentra el elemento o sistema. Está claro que se necesita un equilibrio entre estas dos situaciones contrapuestas. La variable a considerar es el intervalo TP entre tareas de mantenimiento. De esta forma, se puede encontrar la máxima disponibilidad para tareas preventivas, expresando la disponibilidad como función del intervalo de mantenimiento TP. La expresión se muestra a continuación:

$$A(TP) = \left[\frac{MTTF(TP)}{MTTF(TP) + MDMT + [MDMT + MDST] * F(TP)} \right]_{\max} \quad (4.12)$$

EJEMPLO 8. La capacidad de un elemento de un equipo para mantener la funcionalidad se representa mediante una distribución Weibull (W) con un parámetro de escala $A_f = 1400$, y un parámetro de

forma $B_f = 2.6$. ¿Cuál es la máxima disponibilidad del elemento y qué tarea debe adoptarse si $MDMT = 4$ horas, y $MDST = 45$ horas?

Solución. El procedimiento utilizado para resolver este tipo de problemas sigue líneas similares a las usadas en el Ejemplo 7, lo que en la práctica significa que se necesitan varias iteraciones en la ecuación (4.10).

La tarea recomendada para el elemento en este ejemplo es preventiva, con una disponibilidad máxima del 98%, lograda realizando tareas de mantenimiento cada $TP = 460$ horas, como muestra la Figura 14.

4.5. La fiabilidad exigida como criterio de optimización

En un gran número de sistemas de ingeniería es indispensable que se mantenga una probabilidad de fallo muy baja mientras se realiza

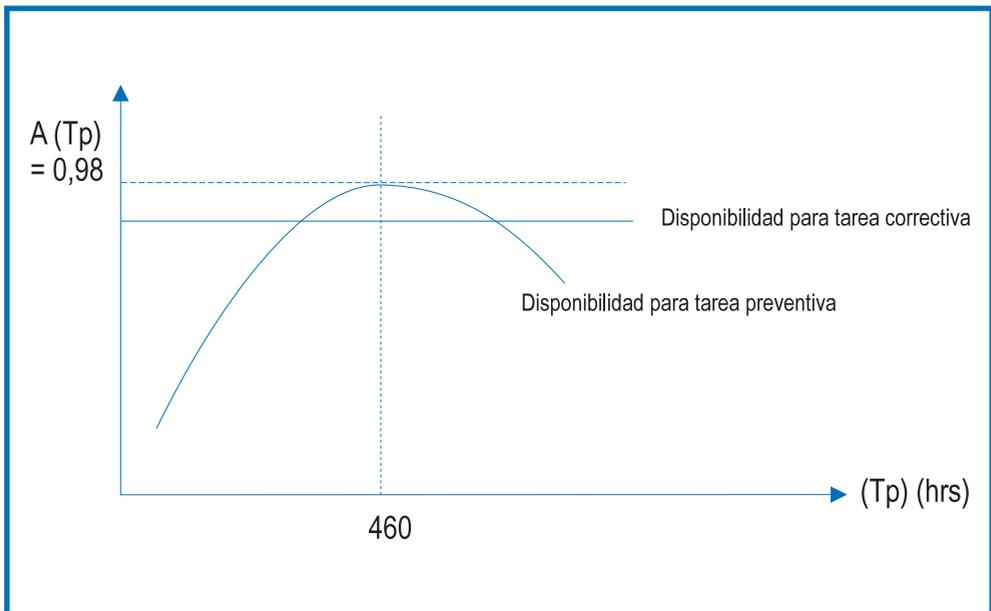


Figura 14 - FRECUENCIA ÓPTIMA DE TAREA PARA EL EJEMPLO 4.2 -

la función requerida, bajo las condiciones exigidas. La razón más común para ello es la seguridad del usuario y del entorno. En estos casos, el criterio de optimización desde el punto de vista de mantenimiento es el nivel de fiabilidad exigido, Rr. Cuando las consideraciones de seguridad sean primordiales, el mantenimiento preventivo es obligatorio.

Para determinar el programa de tareas de mantenimiento y condicionales más beneficioso, es necesario conocer todos los requisitos relacionados con la seguridad y el entorno, que puedan establecer normas, regulaciones o recomendaciones nacionales, internacionales o profesionales. Por ejemplo, la Tabla 14 muestra las exigencias de seguridad relativas a algunos fallos críticos, expresadas mediante índices de riesgo para los sistemas de propulsión, según establece el Informe Inicial del Comité CAAM sobre Riesgos para la Seguridad en Aviones, relacionados con Sistemas de Propulsión y APU¹ desde 1982 hasta 1991.

(1) N. del T. APU: Auxiliary Power Unit (Generador eléctrico auxiliar)

RIESGO	ÍNDICE/HORA DE MOTOR
Fugas de alta	$3,6 \times 10^{-8}$
Incendio incontrolado	$0,3 \times 10^{-8}$
Desprendimiento de motor	$0,2 \times 10^{-8}$
Pérdida importante de control del empuje	$5,6 \times 10^{-8}$

Tabla 14 - CUMPLIMIENTO DE LA SEGURIDAD- ÍNDICE DE RIESGO -

En el caso de la política de mantenimiento LB, las tareas de mantenimiento prescritas se realizan después de intervalos de tiempo predeterminados, completamente independientes de la condición real del sistema. El tiempo para realizar estas actividades, TP, se determina de acuerdo con la función de fiabilidad, $R(t)$, basada en la distribución de probabilidad de la duración de vida hasta la aparición del fallo, y debe satisfacer la siguiente ecuación:

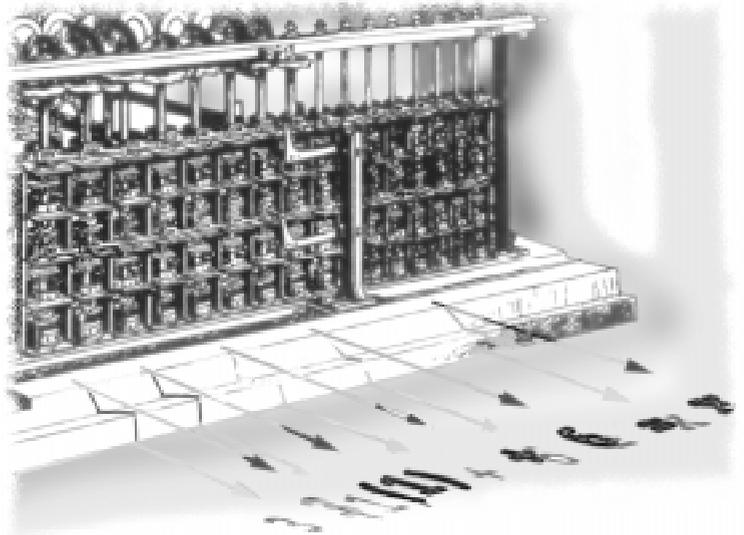
$$R(TP) = P(TTF > TP) > R_r \quad (4.13)$$

Claramente, este método es antieconómico porque no todos los sistemas se usan al completo.

El coeficiente de utilización, CU^l , muestra el punto débil de este método, porque su valor es siempre mucho menor que 1. Es obvio que en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema, la vida operativa no usada, implica costes al usuario para poder mantener el nivel de fiabilidad exigido. El usuario podría hacerse razonablemente la siguiente pregunta: ¿Es posible suministrar el nivel de fiabilidad exigido del sistema con extensión de la vida operativa? La intención del próximo Capítulo es suministrar una respuesta positiva a esta pregunta.

5

Política de mantenimiento basada en la inspección



Tradicionalmente, las políticas de mantenimiento preventivo y correctivo han sido las favoritas entre los directores de mantenimiento. Sin embargo, durante los últimos veinte años, muchas organizaciones industriales han reconocido los inconvenientes de estos métodos. Por tanto, la necesidad de proporcionar seguridad y de reducir el coste de mantenimiento ha llevado a un interés creciente en el desarrollo de políticas de mantenimiento alternativas. El método que parece ser más atractivo para minimizar las limitaciones de las tareas de mantenimiento existentes es la política de mantenimiento basado en la condición (Inspection-Based, IB). Este procedimiento de mantenimiento admite que la razón principal para realizar el mantenimiento es el cambio en la condición y/o las prestaciones, y que la ejecución de las tareas de mantenimiento preventivo debe estar basada en el estado real del elemento o sistema. Mediante el control de ciertos parámetros sería posible identificar el momento más conveniente en el que se deben realizar las tareas de mantenimiento preventivo.

La ventaja de este procedimiento es que proporciona una mejor utilización del elemento considerado que en el caso de la aplicación de mantenimiento preventivo, satisfaciendo el nivel requerido de seguridad o de utilidad.

La inspección es una tarea de mantenimiento condicional, que tiene como resultado un informe sobre la condición del elemento, es decir, si la condición es satisfactoria o no, lo que se determina a través del RCI. El rasgo común de todas estas tareas es que los resultados

obtenidos no tienen ningún efecto sobre la programación de la siguiente inspección. Antes de que el elemento o sistema se ponga en servicio se determina la frecuencia más adecuada para las inspecciones, T_i . Así, durante la operación del elemento o sistema, las inspecciones se llevan a cabo con intervalos fijos especificados hasta que se alcanza el nivel crítico, $RCI(T_i) > RClcr$, en cuyo momento se realizan las tareas de mantenimiento preventivo prescritas. Si el elemento falla entre inspecciones, se realiza un mantenimiento correctivo. El algoritmo presentado en la Figura 15 muestra el procedimiento de mantenimiento cuando se usa la inspección para vigilar la condición.

5.1. Ventajas de la política de mantenimiento IB

Los sistemas cuya operación sigue una técnica de vigilancia de la condición producirán información acerca de la condición de sus elementos componentes. Los ingenieros de mantenimiento comienzan

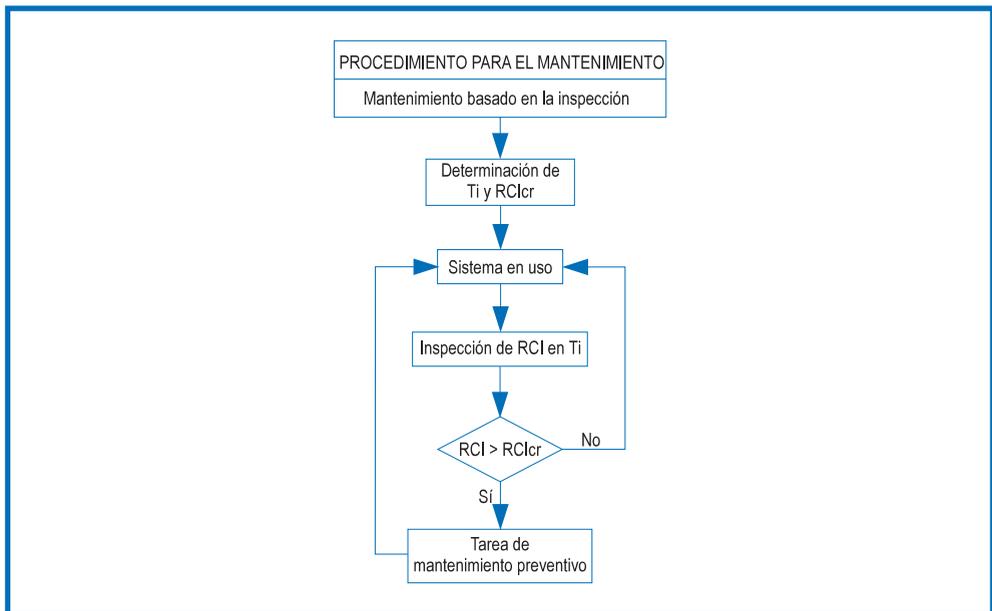


Figura 15 - PROCEDIMIENTO DE MANTENIMIENTO PARA UNA POLÍTICA BASADA EN LA INSPECCIÓN -

a darse cuenta del valor de esta información. Los beneficios de la vigilancia de la condición pueden resumirse así:

- 1) Detección, lo más pronto posible, del deterioro en la condición y/o en las prestaciones de un elemento o sistema.
- 2) Reducción del tiempo de inmovilización de los sistemas, ya que los ingenieros de mantenimiento pueden determinar el intervalo de mantenimiento óptimo, a través de la condición de los elementos componentes. Esto permite una mejor planificación del mantenimiento y un uso más eficaz de los recursos.
- 3) Mejora de la seguridad, ya que las técnicas de vigilancia permiten al usuario detener el sistema antes de que se produzca un fallo.
- 4) Aumento de la disponibilidad, al poder mantener los sistemas funcionando durante más tiempo.

5.2. Coeficiente de utilización

El coeficiente de utilización de la vida del elemento, cuya sustitución se basa en la condición que presenta, puede determinarse según la siguiente expresión:

$$CU^i = \frac{MTIR}{MTTF} = \frac{\int_0^{\infty} R_{RCI_{\sigma}} dt}{MTTF} \quad (5.1)$$

donde MTIR representa el tiempo medio hasta la sustitución del elemento.

5.3. Análisis de los modelos de vigilancia de la condición

La determinación del procedimiento óptimo de mantenimiento en el caso de mantenimiento basado en la inspección, se funda en

modelos matemáticos que tienen en cuenta la distribución de probabilidad de las características que describen la condición del elemento, RCI, así como el coste resultante de totalizar el coste de realización de la inspección, el coste de fallo, el coste del equipo usado, etc. En la mayoría de los casos, el criterio de optimización es la fiabilidad o el nivel de probabilidad de que el fallo no ocurra entre dos inspecciones.

5.3.1. *El nivel de fiabilidad exigido como criterio de optimización*

En un gran número de sistemas de ingeniería es indispensable que se mantenga una probabilidad de fallo muy baja, cuando se realiza la función requerida bajo las condiciones exigidas. La razón más común para ello es la seguridad del usuario y del entorno. En estos casos, desde el punto de vista del mantenimiento, el criterio de optimización es el nivel exigido de fiabilidad, R_r . Cuando las consideraciones de seguridad sean primordiales, el mantenimiento preventivo es obligatorio.

En el caso de la tarea de mantenimiento preventivo, las actividades de mantenimiento prescritas se realizan en un momento predeterminado, completamente independiente de la condición real del sistema. El tiempo para realizar estas actividades, T_p , se determina de acuerdo con la función de durabilidad, $D(t)$, basada en la distribución de probabilidad de la duración de la vida funcional hasta el fallo, que debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$D(T_p) = P(\text{TTF} > T_p) > R_r \quad (5.2)$$

$$P(\text{RCI}(T^{i+1}) \leq \text{RCI}^{\text{cr}} \mid \text{RCI}(T^i) \leq \text{RCP}^{\text{cr}}) = R_r + \frac{R(T^{i+1})}{R(T^i)} \quad (5.3)$$

Por tanto,

$$R(T^{i+1}) = R_r \times R(T^i) \quad (5.4)$$

En consecuencia, es necesario determinar el Tl^{+1} que satisfaga la expresión anterior, como función de la expresión de la función fiabilidad $R(Tl)$.

Es importante subrayar que el modelo usado no se restringe a una particular distribución de probabilidad del tiempo hasta el fallo del elemento considerado, es decir, es aplicable a las distribuciones de probabilidad Weibull, normal, lognormal, exponencial o cualquier otra.

EJEMPLO 9. Para examinar el impacto del mecanismo del fallo en la frecuencia de las inspecciones, se examinarán tres mecanismos diferentes, X, Y y Z. Cada mecanismo se modeliza según la distribución de probabilidad Weibull, con parámetros específicos dados en la Tabla 15.

Solución. En este ejemplo en particular, el nivel de fiabilidad requerido es 0,88.

Mecanismo	Parámetro de escala [hrs]	Parámetro de forma	Función de riesgo
X	100	0,77	decreciente
Y	100	1,00	constante
Z	100	1,77	creciente

Tabla 15 - PARÁMETROS
DE LA DISTRIBUCIÓN PARA LOS MECANISMOS EXAMINADOS -

La expresión general de la función de fiabilidad en los casos en que el tiempo hasta el fallo puede modelizarse adecuadamente mediante la distribución Weibull, es:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{A}\right)^B\right) \quad (5.5)$$

donde A y B son los parámetros de escala y forma de la distribución.

Por consiguiente, haciendo uso de la ecuación (5.3), las frecuencias de realización de las tareas de mantenimiento condicional en forma de inspección, se determinan según la expresión siguiente:

$$Tf^i = A \times \left((-\log(R_r)) \right)^{\left(\frac{1}{B}\right)} \quad (5.6)$$

En la Tabla 16 se dan los valores calculados de las frecuencias de inspección para los tres mecanismos de fallo analizados.

i	Tf_x^i [hrs]	Tf_y^i [hrs]	Tf_z^i [hrs]
1	6,915	12,783	31,281
2	10,096	12,783	14,994
3	11,791	12,783	11,913
4	13,046	12,783	10,269
5	14,062	12,783	9,198
6	14,939	12,783	8,425
7	15,704	12,783	7,833
8	16,391	12,783	7,359
9	17,016	12,783	6,968
10	17,591	12,783	6,638

Tabla 16 - INTERVALOS DE INSPECCIÓN -

Los resultados obtenidos demuestran claramente que el factor determinante de la frecuencia de inspecciones es el mecanismo de fallo, y que en el caso de función de riesgo decreciente, la frecuencia también decrece, mientras que en el caso de función de riesgo creciente, la frecuencia de inspecciones es creciente, como era de esperar.

5.3.2. El coste mínimo como criterio de optimización

En ciertas situaciones el sistema puede ser funcional pero no funcionable, debido a la presencia de un fallo que sólo puede ser detectado, por ejemplo, mediante una inspección, o por la vigilancia de la calidad de la salida del sistema. Cuando se detecta un fallo, se restablece la funcionabilidad del sistema como resultado de la ejecución de una tarea de mantenimiento correctivo. El problema con este tipo de sistemas es la determinación de la frecuencia óptima de inspección, para minimizar los costes totales por unidad de tiempo asociados con la inspección, y la reducción de las consecuencias de operar el sistema con un fallo.

El modelo representado por Jardine [5] para tratar este tipo de problemas se basa en las siguientes hipótesis:

- (1) $f(t)$ es la función de densidad del tiempo hasta el fallo del sistema.
 - (2) CMT^i es el coste de una inspección.
 - (3) CLR es el coste por unidad de tiempo, asociado con el funcionamiento del sistema con un fallo no detectado (por ejemplo, puede ser el coste de eliminación, el coste de reparación, coste de producción perdida).
 - (4) CMT^c es el coste de realizar una tarea correctiva.
 - (5) DMT^c es la duración de la tarea correctiva.
-

- (6) La política de inspección es realizar inspecciones en los tiempos TI_1, TI_2, TI_3, \dots , hasta que se detecta un fallo de un sistema.
- (7) El objetivo es determinar el programa óptimo de inspección para minimizar los costes totales por unidad de tiempo.

El coste total esperado por unidad de tiempo de la inspección y recuperación del sistema es función del programa de tiempos de inspección TI_1, TI_2, TI_3, \dots . De esta forma, la expresión final de la frecuencia óptima de decisiones de inspección podría expresarse como [5]:

$$C(TI_1, TI_2, TI_3, \dots) = \frac{CMT^c + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{TI_k}^{TI_{k+1}} [CMT^i(k+1) + CLR(TI_{k+1} - t)] f(t) dt}{MTTF + T_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{TI_k}^{TI_{k+1}} (TI_{k+1} - t) f(t) dt} \quad (5.7)$$

Este es un modelo matemático del problema que relaciona el programa de inspecciones TI_1, TI_2, TI_3, \dots con el coste total por unidad de tiempo $C(TI_1, TI_2, TI_3, \dots, TI_k, \dots)$. El programa óptimo es el conjunto de tiempos TI_1, TI_2, TI_3, \dots que minimiza el segundo miembro de la ecuación (5.7). Finalmente, la frecuencia óptima de inspección puede obtenerse tomando la derivada parcial de $C(TI_1, TI_2, TI_3, \dots)$ con respecto a TI_k , para todos los valores de $k = 1, 2, 3, \dots$, igualando a cero y resolviendo el sistema de ecuaciones resultante.

6

Política de mantenimiento basada en el examen de la condición



Existe un gran número de elementos técnicos implicados en las operaciones y procesos de producción que deben funcionar con una probabilidad de fallo muy baja. La razón más frecuente es el deseo del usuario de disponer de un proceso seguro, con buena relación coste-eficacia y libre de interrupciones. En la mayoría de los casos, esto se consigue mediante una política de mantenimiento preventivo. Las tareas de mantenimiento prescritas se realizan obligatoriamente en un momento predeterminado, TP. La programación de las tareas de mantenimiento se basa en las características de fiabilidad de los elementos considerados, de acuerdo con la expresión que sigue:

$$R(TP) = P(TTF > TP) = R_r \quad (6.1)$$

donde TTF es una variable aleatoria que representa el tiempo hasta el fallo, R_r es el nivel de fiabilidad exigido y $R(TP)$ el valor de la función de fiabilidad en el instante TP.

En la práctica se ha observado que este método implica un alto coste para el usuario para poder mantener el nivel de fiabilidad requerido, ya que la mayoría de elementos se sustituyen prematuramente. Al mismo tiempo, esta práctica implica una reducción en la disponibilidad operativa del elemento.

Para aumentar el nivel de utilización de los elementos sustituidos preventivamente, conservando una baja probabilidad de fallo durante la operación, es necesario obtener más información sobre su compor-

tamiento a lo largo del proceso de operación. Ya que la función de fiabilidad representa la principal fuente de información en la expresión anterior, el único camino era crear un nuevo enfoque de la fiabilidad que pudiera suministrar una imagen más completa del proceso de cambio de la condición de los elementos considerados.

Consciente de ello, Knezevic [6] desarrolló una metodología para la determinación de la fiabilidad, basada en un estimador adecuado de la condición, RPC. Este nuevo método suministró información adicional sobre el cambio de la condición de los elementos considerados, durante su vida operativa. En consecuencia, se desarrolló un nuevo método de control de los procedimientos de mantenimiento [7]. Mediante el suministro de una información más completa del proceso de cambio en la condición, se llegó a un nivel más alto de utilización de los elementos, conservando una baja probabilidad de fallo durante la operación.

Es un proceso dinámico, porque el tiempo para la realización del siguiente examen se determina completamente a partir de la condición real del sistema al efectuar cada examen. El control dinámico de las tareas de mantenimiento según este nuevo modelo permite que cada sistema individual realice la función requerida con la probabilidad de fallo exigida, como en el caso de mantenimiento preventivo basado en la vida del sistema, pero con una utilización más completa de la vida operativa, reduciendo así el coste total de operación y producción.

6.1. Puntos principales del método RCP para determinación de la fiabilidad

El método convencional para determinar la fiabilidad a través del tiempo hasta el fallo considera al elemento como una caja negra que realiza la función requerida hasta que falla. Tal método es totalmente satisfactorio desde el punto de vista de la estadística matemática, pero no tanto desde el punto de vista de ingeniería, ya que los ingenieros,

especialmente los ingenieros de explotación y de mantenimiento, querrían saber lo que está pasando dentro de la caja.

Para lograrlo, es necesario describir la condición de un elemento en cualquier instante. Esta fue la principal razón para introducir el concepto de un estimador adecuado de la condición o simplemente estimador de condición. Se define como un parámetro que está ligado directa o indirectamente con el elemento y sus prestaciones, y que describe la condición del elemento durante su vida operativa, satisfaciendo los siguientes requisitos:

- a) Descripción completa de la condición del elemento.
- b) Cambio continuo y monótono durante el tiempo operativo.
- c) Definición numérica de la condición del elemento.

Según este método, un elemento está en estado de funcionamiento en tanto que su estimador de condición se encuentre dentro del intervalo definido por su valor inicial, RCP_{in} , y su valor límite, RCP_{lim} . Cuando este estimador rebasa el límite prescrito, se presenta la transición al estado de fallo.

El estudio de los procesos de cambio en la condición demuestra que es imposible su predicción, porque están condicionados tanto por factores externos como por la evolución de procesos físicos que ocurren en el interior del elemento durante la vida operativa. Por consiguiente, en todo momento del tiempo operativo, el estimador de condición, $RCP(t)$, es una variable aleatoria que sólo puede expresarse mediante su distribución de probabilidad. La función de densidad del estimador de condición en un instante de tiempo t , se expresa mediante $f_{RCP(t)}(c)$.

Por lo tanto, la probabilidad de que el estimador de condición se encuentre dentro del intervalo admitido, en el instante t , es también la probabilidad de operación satisfactoria del elemento, lo que no es más que la fiabilidad:

$$P(RCP_{in} < RCP(t) < RCP_{lim}) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP(t)}(c) dc = R(t) \quad (6.2)$$

La ecuación (6.2) describe la probabilidad de que, en el instante t , la variable aleatoria $RCP(t)$ tenga un valor dentro del intervalo aceptable, lo que a su vez representa la probabilidad de que el elemento mantenga su funcionalidad durante un tiempo t , como muestra la Figura 16.

Resumiendo, se puede decir que el método RCP presentado anteriormente suministra una imagen más completa de la fiabilidad del elemento durante la vida operativa, porque se basa en un proceso continuo de cambio, mientras que el método del tiempo hasta el fallo se basa sólo en los momentos de transición al estado de fallo. La información sobre los cambios en la condición del elemento es muy valiosa para los ingenieros, particularmente para los de mantenimiento, que la utilizan como base para la selección de una política o estrategia de mantenimiento.

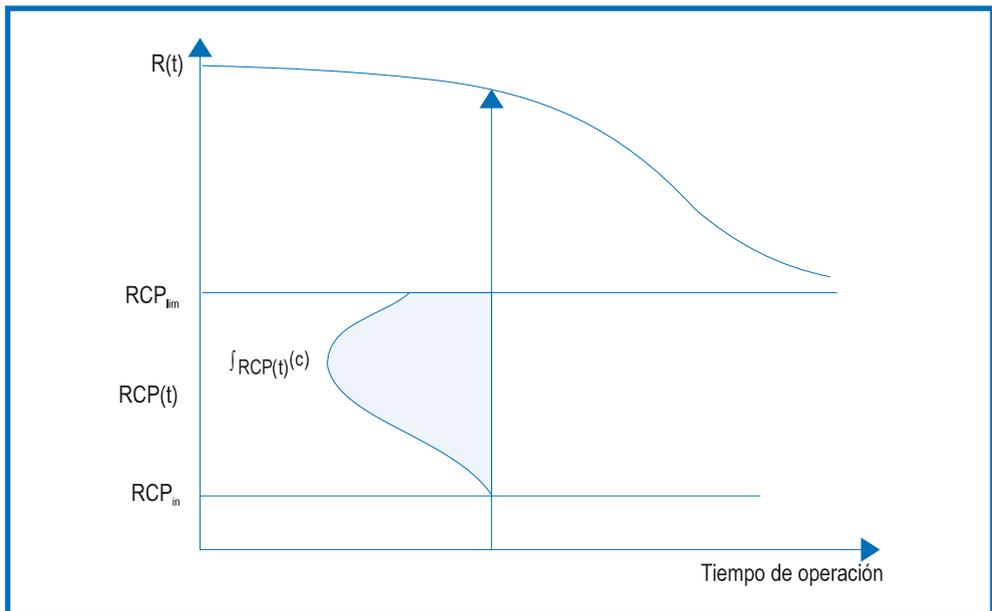


Figura 16 - MÉTODO RCP PARA LA FIABILIDAD -

6.2. Puntos principales del método RCP para el mantenimiento

Como el nivel de fiabilidad exigido sólo puede mantenerse aplicando una política de mantenimiento preventivo, el método RCP de mantenimiento introdujo el nivel crítico del estimador de condición RCP_{cr} , más allá del cual deben realizarse las tareas de mantenimiento apropiadas. El intervalo entre los valores límites y críticos se conoce como intervalo de seguridad, y depende de la capacidad del usuario para medir la condición del elemento mediante el RCP.

Desde el punto de vista del mantenimiento, el elemento considerado puede estar, según el valor numérico del RCP en cualquier instante de tiempo de operación, en uno de estos tres estados:

- 1) $RCP_{in} < RCP(t) < RCP_{cr}$: continuación de las inspecciones o exámenes;
- 2) $RCP_{cr} < RCP(t) < RCP_{lim}$: se precisa la tarea de mantenimiento preventivo;
- 3) $RCP_{lim} < RCP(t)$: es necesaria la tarea de mantenimiento correctivo, porque el fallo ya ha ocurrido.

Para minimizar las interrupciones en la operación y así aumentar la disponibilidad del sistema, el nuevo método no tiene en cuenta ninguna interrupción hasta el momento del primer examen de la condición del elemento, TE_1 , expresado en alguna de las unidades operativas (kilómetros, horas, años, etc.). Hasta ese instante del tiempo operativo se mantiene la probabilidad exigida de operación fiable por lo que satisface la siguiente ecuación:

$$R(TE_1) = P(RCP(TE_1) < RCP_{lim}) > R_r \quad (6.3)$$

El resultado del examen se da mediante el valor numérico del estimador de condición, $MRCP(TE_1)$, que representa la condición real

del elemento en este instante de tiempo. Con respecto al valor registrado, son posibles las dos siguientes condiciones:

- 1) $MRCP(TE_1) > RCP_{cr}$, lo que significa que debe realizarse la tarea de mantenimiento prescrita.
- 2) $MRCP(TE_1) < RCP_{cr}$: el elemento puede seguir siendo utilizado. La pregunta que surge inmediatamente aquí es: ¿cuándo tendremos que realizar el siguiente examen, manteniendo el nivel de fiabilidad exigido?

El tiempo hasta el siguiente examen depende de la diferencia entre el RCP_{cr} y $MRCP(TE_1)$. Cuanto mayor sea la diferencia, mayor será el tiempo de operación hasta el siguiente examen, TE_2 . El tiempo del siguiente examen es el valor de TE_2 que satisface la siguiente ecuación:

$$\int_{TE_1}^{t_2} f(t, MRCP(TE_1)) dt = \int_{MRCP(TE_1)}^{RCP_{cr}} f_{RCP(TE_2)}(c) dc \quad (6.4)$$

donde: $f(t, MRCP(TE_1))$ es la función de densidad de la intersección horizontal de la función aleatoria $RCP(t)$ con el nivel $MRCP(TE_1)$; $f_{RCP(TE_2)}(c)$ es la función de densidad de la intersección vertical de $RCP(t)$ en el instante del siguiente examen.

En el tiempo predeterminado para el siguiente examen, TE_n , cualquiera de las dos condiciones es posible, y debe seguirse el mismo procedimiento, como muestra la Figura 17.

6.3. Ventajas de la política basada en el examen

Los siguientes puntos representan las ventajas del método de mantenimiento basado en el RCP:

- 1) Proporciona el nivel de fiabilidad exigido para cada elemento individual.

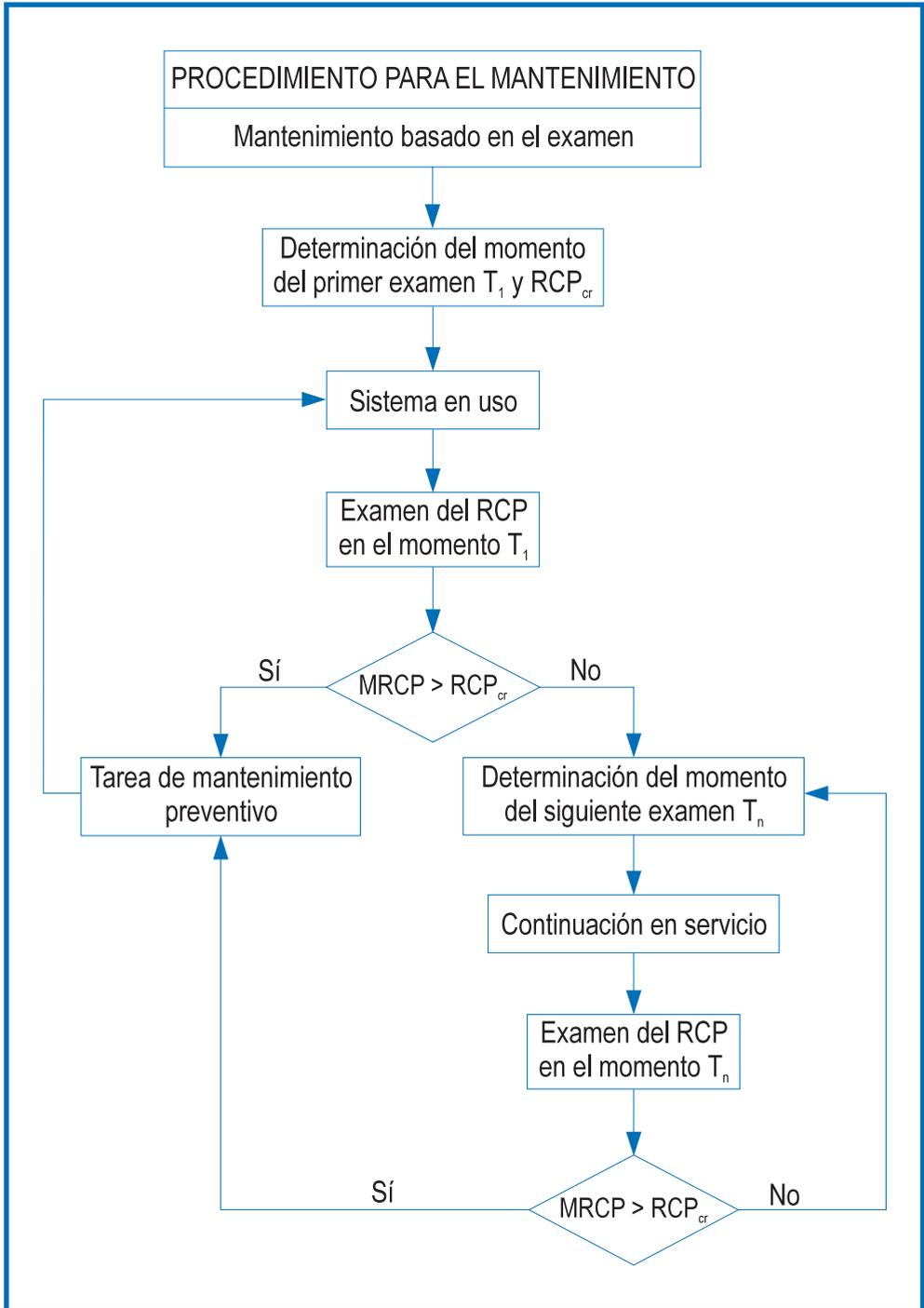


Figura 17 - ALGORITMO
PARA EL CONTROL DEL PROCESO DE MANTENIMIENTO -

- 2) Reduce el coste de mantenimiento como resultado de:
 - i) Una vida operativa más larga para cada elemento individual que en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema.
 - ii) Una mayor disponibilidad del elemento gracias a la reducción del número de inspecciones, comparado con un mantenimiento basado en la inspección.
- 3) Desde el punto de vista del apoyo logístico, proporciona una planificación de las tareas de mantenimiento.
- 4) Es aplicable a todos los elementos de ingeniería.

El estudio de un caso práctico presentado por Bland muestra los ahorros que podrían obtenerse usando este método. El objetivo principal del método es proporcionar una utilización más completa de la vida operativa de cada sistema individual que la que puede obtenerse con el mantenimiento basado en la vida del sistema, como se muestra a continuación en la resolución del modelo desarrollado.

Según la dinámica de mantenimiento adoptada de un mantenimiento basado en el examen, todos los sistemas realizan la función esperada hasta el tiempo TE_1 . La vida operativa media alcanzable $MUL(TE_1)$ es:

$$MUL(TE_1) = \int_0^{TE_1} Rlim(t) dt = \int_0^{TE_1} \left[\int_{RCP_m}^{RCP_{cr}} (f_{RCP(t)} dc) \right] dt \quad (6.5)$$

Según la estrategia adoptada como consecuencia del examen en el tiempo TE_1 , se realizarán las tareas de mantenimiento prescritas en algunos de los sistemas, pero otros continuarán su funcionamiento, proporcionando la fiabilidad exigida hasta que cada uno de ellos alcance el valor crítico RCP_{cr} . La vida operativa prolongada esperada, $E(EOL)$, puede calcularse de la siguiente manera:

$$E(EOL) = \int_{TE_1}^{\infty} R_{cr}(t) dt = \int_{TE_1}^{\infty} \left[\int_{RCP_n}^{RCP_{cr}} (f_{RCP(t)} dc) \right] dt \quad (6.6)$$

En la ecuación (6.6) $R_{cr}(t)$ es la probabilidad de que la función aleatoria $RCP(t)$ tenga, en el instante de tiempo t , un valor menor o igual que el valor crítico RCP_{cr} .

La ecuación (6.6) indica un aumento medio de la utilización durante la vida operativa del sistema gracias al nuevo método desarrollado, en comparación con el mantenimiento basado en la vida del sistema. Según el modelo desarrollado, la media para la vida operativa alcanzable en el caso de mantenimiento basado en el examen, MUL^e , se define por la siguiente expresión:

$$MUL^e = MUL(TE_1) + EMTTF \quad (6.7)$$

y se representa en la Figura 18.

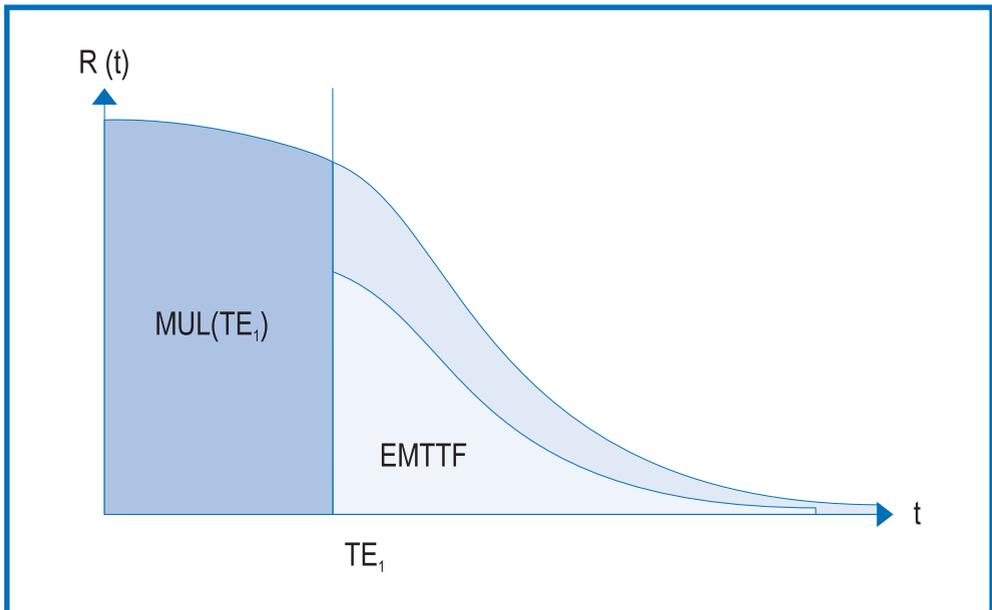


Figura 18 - VIDA EN SERVICIO DE UN ELEMENTO PARA UNA POLÍTICA EB -

El coeficiente de utilización en este caso, CU^e , es:

$$CU^e = \frac{MULEB}{MTTF} = \frac{\int_0^{TE_1} R_{lim}(t)dt + \int_{TE_1}^{\infty} Rcr(t)dt}{\int_0^{\infty} R_{lim}(t)dt} \quad (6.8)$$

Las ventajas de esta política sobre la que se basa en la vida del sistema son claras, ya que la siguiente desigualdad habla por sí misma:

$$CU^e > CU^l \quad (6.9)$$

Haciendo uso del modelo propuesto, el mantenimiento puede controlarse mejor, con un considerable ahorro.

6.4. Observaciones finales

El método aquí expuesto para determinar la estrategia óptima de mantenimiento es uno de los pocos que consideran el nivel de fiabilidad requerido como criterio de optimización.

Las ventajas de la política de mantenimiento basada en el examen son:

- 1) Una más completa utilización de la vida operativa de cada sistema individual que en el caso del mantenimiento basado en la vida del sistema.
- 2) Proporciona el nivel de fiabilidad exigido de cada sistema individual, de igual forma que en el mantenimiento basado en la vida del sistema.
- 3) Reducción del coste total de mantenimiento, como resultado de la prolongación de la vida operativa alcanzable del sistema y establecimiento de una planificación de las tareas de man-

tenimiento, de gran interés desde el punto de vista del trabajo, los equipos y los repuestos.

- 4) Aplicabilidad a todos los sistemas de ingeniería. Las principales dificultades son la selección de un estimador de condición y la determinación de la descripción matemática de este RCP(t).

6.5. Estudio de un caso práctico

Este ejemplo representa una aplicación práctica del mantenimiento basado en el examen, relacionado con el mantenimiento de contactores en una flota de vehículos eléctricos de reparto. El trabajo descrito trata el mantenimiento de una flota de 37 vehículos eléctricos, utilizados para el reparto diario de leche en el área local de Exeter. Vehículos similares son de uso común en todo el Reino Unido.

Los vehículos tienen un peso con carga de 2,5 toneladas y llevan motores en serie de corriente continua de 3 kW, alimentados por baterías de tracción de 60 V, a través de un controlador que actúa sobre cuatro contactores como respuesta a la presión sobre el pedal de aceleración.

Desde el punto de vista de la fiabilidad, los elementos más críticos de los vehículos eléctricos son los juegos de contactos de los contactores y las escobillas de los motores de tracción. En esta monografía se restringe la discusión a los contactores únicamente.

Cada contactor consta de un solenoide y un émbolo montado en la base, con un conjunto recambiable de contactos que se sujeta al émbolo.

Los ingenieros de mantenimiento no habían encontrado ningún patrón coherente en que basar su estrategia de sustitución. Aplicaron

un mantenimiento preventivo, mediante la vigilancia visual de los juegos de contactos cada seis semanas y efectuaron la correspondiente sustitución tras tres o cuatro inspecciones, con el resultado de que los juegos de contactos no fueron utilizados por completo.

El objetivo principal de esta investigación fue establecer unos criterios de sustitución y determinar una estrategia para el control, a fin de:

- a) Suministrar el nivel exigido de fiabilidad del vehículo.
- b) Prolongar la vida operativa alcanzable.
- c) Reducir los costes de mantenimiento.

Para alcanzar estos objetivos mediante el mantenimiento basado en el examen, deben considerarse las cinco etapas siguientes:

1. Identificación de un «Estimador de Condición» (RCP).
2. Identificación del «Estimador de Mantenimiento» (RMP).
3. Determinación de las condiciones reales en que opera el componente.
4. Ejecución de las pruebas de duración para simular las condiciones operativas actuales.
5. Establecimiento de una estrategia de mantenimiento apropiada.

Por lo general, estas etapas serán comunes a la mayoría de las aplicaciones de mantenimiento basadas en el examen, independientemente del sistema investigado. Las siguientes Secciones bosquejan con más detalle su aplicación a este sistema específico.

6.5.1. Identificación del estimador de condición (RCP)

El estimador de condición que define con más precisión la condición de los juegos de contactos para cuantificar su deterioro, es la sobrecarrera del interruptor. Esto representa la distancia entre el

aislante del émbolo y la sección móvil de cobre de los contactos, cuando el émbolo está completamente presionado; esto constituye una indicación directa del desgaste del extremo. El estimador adecuado de condición para este sistema es por tanto la sobrecarrera del interruptor.

Con unos contactos sin utilizar, la sobrecarrera media era de 2,1 mm, mientras que según las instrucciones del fabricante, «una cifra típica de sobrecarrera para la sustitución es de 0,3 mm». Esto se consideró como el valor límite permisible para la sobrecarrera, definiendo así la duración del juego de contactos.

6.5.2. Determinación del estimador de mantenimiento

El valor del estimador de condición durante la vida de los juegos de contactos depende directamente del número de operaciones que han realizado, por lo que se ha adoptado esta última magnitud como el verdadero estimador adecuado de mantenimiento.

Desafortunadamente, el usuario de la flota no tenía los medios para registrar directamente esta variable, por lo que se requirió que la frecuencia del servicio se especificara en días de uso, que fueron considerados en la práctica como el estimador de mantenimiento adecuado. Se necesitó un conjunto de pruebas en ruta para establecer cómo se relacionaba el número de operaciones de contacto con los días de uso. Para lograrlo, se instalaron contadores especialmente diseñados en tres vehículos con diferentes conductores e itinerarios (considerando tanto las distancias del itinerario como el terreno recorrido). Tras dos meses de operación se estableció con una probabilidad acumulativa del 95%, que el número de operaciones por día, era igual o menor que 580 para el contactor más usado, y valores más pequeños para los demás.

Estas pruebas permitieron relacionar la duración con el intervalo de servicios, pero todavía faltaba obtener la función de

deterioro real para los juegos de contactos para que la información pudiera ser útil.

6.5.3. Determinación de las condiciones operativas en servicio

El ritmo de deterioro depende del valor de la corriente conmutada a lo largo de la operación diaria. Esto se estableció mediante pruebas en ruta adicionales con un vehículo prestado por el propietario de la flota, que se había preparado con un equipo de registro.

El vehículo se hizo funcionar con un 80% de la carga útil en una carretera de prueba accidentada, con una pendiente del 25%, exigiendo un uso a fondo del acelerador y de los frenos. Se encontró que, aunque el máximo de la corriente en el motor pasaba de los 500 A, la máxima corriente a la que se dispara cada contactor durante el servicio normal es de 135 A.

6.5.4. Ensayo de la duración

Se realizó un examen de desgaste acelerado, en el que los interruptores bajo examen estaban conectados con un generador «compound» de corriente continua, a través de una resistencia tomada de un vehículo.

Se ajustó el campo excitado de los generadores para suministrar un voltaje en circuito abierto de 60 V, el mismo que el voltaje de la batería del vehículo. Se actuó sobre el campo acumulativo en serie para producir una corriente final de 135 A, con una forma de onda para la corriente del ensayo que reproducía fielmente las condiciones de operación que se producían en la práctica.

Era vital conocer cuándo ocurría el primer fallo. En la práctica esto habría implicado la necesidad de recuperar el vehículo por medio de un equipo de reparaciones para sustituir el juego de contactos.

La solución utilizada fue usar una combinación de contadores electrónicos y electromecánicos, basándose en que los primeros serían más propensos a pasarse, debido al ruido electromagnético, y los segundos a no llegar, a causa del desgaste o a la adherencia. Este método suministró resultados muy fiables. Los siete primeros juegos de contactos fallaron entre las 4.000 y las 70.000 operaciones, a pesar de las condiciones perfectas de las puntas, y con una sobrecarrera mucho mayor que el valor límite. Para eliminar este mal funcionamiento de juegos de contactos que aparentemente estaban en buen estado, se realizó una pequeña modificación en su diseño que hizo posible el servicio satisfactorio de cada contacto hasta el valor límite permisible de la sobrecarrera.

Se examinaron diez conjuntos de contactos bajo las mismas condiciones. Cada 100.000 operaciones se midió el valor de la sobrecarrera, usando una galga especialmente diseñada, y se obtuvo una dispersión de las duraciones entre 0,7 y 1,2 millones de operaciones. Estos resultados se disponen en una matriz de condición (Tabla 17), exigida por la aplicación directa de la política basada en el examen.

6.5.5. Determinación de la estrategia de mantenimiento

Los resultados anteriores se trataron con el programa informático de los autores para obtener los modelos matemáticos de la función de deterioro (ecuación (6.2)) y, de ahí, la función de fiabilidad (ecuación (6.3)).

$$\text{MVRCP}(t) = -1,6 \times 10^{-6} t + 2,085 \quad (6.10)$$

MVRCP es la media del valor medido del parámetro adecuado de condición (Measured Value of the Relevant Condition Parameter), y t es el número de contactos establecidos. La desviación típica del parámetro de condición adecuado, SDRCP (Standard Deviation of the Relevant Condition Parameter), fue 0,35.

Miles de operaciones	Valores de sobrecarrera, RCP (mm)									
	Muestras de los juegos de contactos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,90	2,00	1,70	1,90	1,90	2,10	2,00	1,70	2,20	2,10
100	1,80	1,90	1,65	1,82	2,00	2,00	2,00	1,80	1,90	1,95
200	1,70	1,85	1,60	1,65	1,90	1,90	1,90	1,65	1,80	1,85
300	1,50	1,70	1,40	1,55	1,80	1,80	1,80	1,55	1,60	1,75
400	1,40	1,60	1,30	1,45	1,60	1,65	1,65	1,30	1,45	1,50
500	1,30	1,48	1,00	1,30	1,40	1,50	1,50	1,15	1,35	1,20
600	1,13	1,30	0,80	1,20	1,10	1,40	1,30	0,90	1,00	0,90
700	1,00	1,15	0,30	0,70	0,50	1,25	1,10	0,80	0,30	0,60

Tabla 17 - LA MATRIZ DE CONDICIÓN PARA DIEZ JUEGOS DE CONTACTOS MUESTRA LOS VALORES DE SOBRECARRERA EN DIFERENTES ESTADOS DE USO -

$$\begin{aligned}
 R(t) &= P\{RCP, t > RCP_{lim}\} \\
 &= \Phi\left\{\frac{RCP_{lim} - MVRCP(t)}{SDRCP(t)}\right\} \quad (6.11) \\
 &= \Phi\left\{\frac{0,3 - (2,085 - 1,6 \times 10^{-6} t)}{0,35}\right\}
 \end{aligned}$$

donde Φ es la función normal de Laplace.

Se presenta una interpretación gráfica de esta función de fiabilidad en la Figura 19. La función de fiabilidad muestra el número de contactos a los que se debe realizar el primer examen para suministrar la fiabilidad exigida. Por ejemplo, si el nivel de fiabilidad requerido, R_r , es 0,95, sustituyendo en la ecuación (6.11) se encuentra que el primer examen se requiere a las 759.000 operaciones.

La estrategia de mantenimiento debe asegurar que no se llega a alcanzar el valor límite de la sobrecarrera, RCP_{lim} , y que la sustitución se realiza para un valor crítico mayor, RCP_{cr} , que se corresponde con

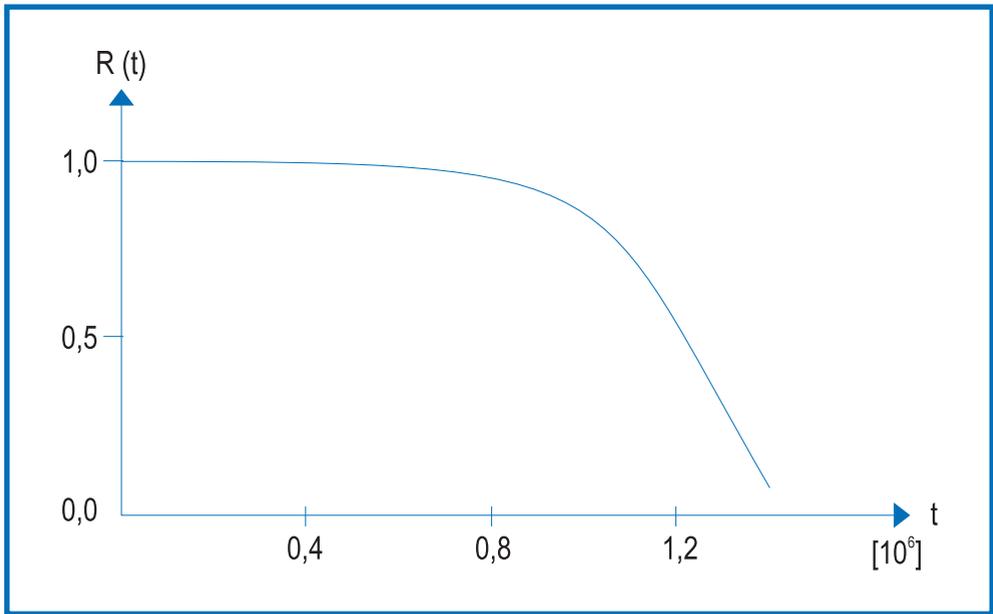


Figura 19 - FUNCIÓN DE FIABILIDAD CALCULADA -

el nivel de fiabilidad exigido. Esto se consigue sustituyendo T_1 por t en la ecuación (6.10), obteniendo RCP_{cr} igual a 0,90 mm.

Similarmente, para cualquier otro nivel de fiabilidad exigido, a partir de las ecuaciones (6.10) y (6.11) pueden obtenerse los valores correspondientes para T_1 y RCP_{cr} .

La esencia de la estrategia de mantenimiento propuesta es que se puede conseguir un nivel de fiabilidad de 0,95, si los juegos de contactos se usan, sin necesidad de inspección, desde que son nuevos hasta las 759.000 operaciones, en cuyo momento se debe llevar a cabo el primer examen, medir la sobrecarrera y tomar decisiones de mantenimiento.

Las decisiones apropiadas se basan en el valor medido de la sobrecarrera en ese momento, $CRCP$, y a partir de ese valor las decisiones apropiadas son:

- (1) sobrecarrera < 0,9 mm SUSTITUIR EL CONTACTOR
- (2) sobrecarrera \geq 0,9 mm CONTINUAR USANDO EL CONTACTOR

La pregunta que surge inmediatamente aquí es: ¿cuándo debemos realizar el siguiente examen para conservar el nivel de fiabilidad exigido?

Esto se resuelve mediante la aplicación del programa informático [8] que indica el momento en que el interruptor debe ser examinado de nuevo (Tabla 18). En ese momento, se debe repetir el procedimiento anterior hasta que sea necesaria la sustitución.

La experiencia del usuario mostró que algunos juegos de contactos tal como eran suministrados en origen, podían no ofrecer un nivel de fiabilidad del 0,95, incluso en los intervalos nominales de seis semanas entre inspecciones, adoptados por los propietarios de la flota.

Medida de la sobrecarrera MRCP (t) (mm)	Tiempo para el siguiente examen operaciones	días
0,9	31.320	54
1,0	93.960	162
1,1	156.600	270
1,2	219.240	378
1,3	281.880	486
1,4	344.520	594
1,5	407.160	702
1,6	469.800	810

Tabla 18 - TIEMPOS RECOMENDADOS PARA EL SIGUIENTE EXAMEN -

Sin embargo, tras la modificación de los juegos de contactos, la estrategia propuesta indica que el período de tiempo hasta el primer examen puede extenderse de seis semanas a cuatro años.

Debido a que cada conjunto de contactos cuesta aproximadamente 25 libras y hay cuatro en cada vehículo, está claro que es posible un ahorro sustancial; por ejemplo, sólo para el Almacén de Exeter el ahorro debería ser de 26.000 libras (40.000 dólares) en los cuatro primeros años.

Una posterior relación con Express Dairies, el usuario de la flota, confirma que este ahorro se obtiene además de conseguirse un nivel de fiabilidad satisfactorio de 0,95. De hecho, desde que se implantó este esquema no ha aparecido ningún fallo en los juegos de contactos.

7

Política de mantenimiento basada en la oportunidad



En un sistema existen muchos elementos heterogéneos que requieren una sustitución en grupo, por alguna de las siguientes razones:

- 1) Necesidad de seguridad en la operación del sistema, tanto para los usuarios como para el entorno.
- 2) Limitaciones en la tecnología o el diseño del sistema.

En la mayoría de los casos, el fabricante recomienda una sustitución en grupo, incorporándolo en sus manuales de mantenimiento.

Con el fin de evitar interrupciones costosas, también es posible emprender sustituciones de grupo que afecten a elementos heterogéneos, de modo que, cuando uno de ellos falle, se sustituyan todos los elementos del grupo. De esta forma las tareas de mantenimiento se realizan en elementos que no han causado el fallo. Por tanto, la realización de esas tareas de mantenimiento adicionales es consecuencia de la oportunidad surgida durante el tiempo de baja obligatoria, causada por la realización de la tarea de mantenimiento correctivo del elemento averiado. Esta política de mantenimiento se conoce como mantenimiento basado en la oportunidad (Opportunity Based, OB), y es apropiado para sistemas de costes elevados de inmovilización o indisponibilidad.

Para comprender su fundamento, se analizará el coste medio total de una política de mantenimiento basada en el fallo, para todos los elementos críticos de un sistema o subsistema, NCI, durante el tiempo operativo establecido en el caso de sustitución individual, $MCFMIT(T_{st})$. Ese coste es igual a la suma del coste total medio de una política basada en el fallo para cada uno de ellos, $MCFM(T_{st})$, definida por la ecuación (3.12):

$$\begin{aligned}
 \text{MCFMI}(T_{st}) &= \sum_{i=1}^{\text{NCI}} \text{MCFM}_i(T_{st}) = \sum_{i=1}^{\text{NCI}} \text{MNMT}_i^c(T_{st}) \times (C_{sp_i} + C_{m_i} + C_{l_i} + C_{o_i}) \\
 &= \text{MNMT}_1^c(T_{st}) \times (C_{sp1} + C_{m1} + C_{l1} + C_{o1}) + \\
 &+ \text{MNMT}_2^c(T_{st}) \times (C_{sp2} + C_{m2} + C_{l2} + C_{o2}) + \\
 &\quad + \dots + \\
 &\quad \vdots \\
 &+ \text{MNMT}_i^c(T_{st}) \times (C_{spi} + C_{mi} + C_{li} + C_{oi})
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

donde $i = 1, \dots, \text{NCI}$.

Si analizamos la expresión anterior, está clara la reducción en el coste de mantenimiento producida por la sustitución en grupo de los elementos. Para reducir el coste de mantenimiento total, la metodología «EXETER» [9] sugiere una sustitución en grupo, incluyendo elementos heterogéneos críticos. De esa forma, en el caso de una política basada en el fallo, al averiarse un elemento se lleva a cabo la sustitución de todos los elementos del grupo especificado, o en el caso de política basada en la vida del sistema, cuando el proceso de funcionamiento se detiene para la sustitución preventiva de un elemento, se realiza la sustitución de todos los elementos del grupo especificado. Este tipo de sustitución se llama sustitución de elementos en grupo [9], y es posible cuando el número de elementos críticos, NCI, es mayor o igual que 2.

Hay dos razones para sugerir la sustitución en grupo:

- a) Reducción posible del número de paradas (fallos).

El número total de tareas de mantenimiento durante un tiempo operativo fijado, $\text{TMNMT}^c(T_{st})$ es, para varios elementos críticos, igual a la suma del número de tareas individuales, $\text{MNMT}_i^c(T_{st})$, y del número de tareas de mantenimiento relacionadas con el grupo, $\text{MNMTG}^c(T_{st})$,

$$\text{TMNMT}^c(T_{st}) = \text{MNMT}_i^c(T_{st}) + \text{MNMTG}^c(T_{st}) \tag{7.2}$$

donde:

$$MNMTI^c(T_{st}) = \sum_{j=1}^{NI} MNF_j(T_{st}) = \sum_{j=1}^{NI} \left[\sum_{n=1}^{\infty} F_j^n(T_{st}) \right] \quad (7.3)$$

NI = número de elementos sustituidos individualmente,

$$MNMTG^c(T_{st}) = \sum_{n=1}^{\infty} F_{gr}^n T_{st} \quad (7.4)$$

en que $F_{gr}^n(T_{st})$ = función de distribución del tiempo hasta el fallo n-ésimo del grupo de elementos conectados en serie, desde el punto de vista de la fiabilidad, definida por:

$$F_{gr}^n(t) = 1 - \sum_{i=1}^{NG} [1 - F_i^n(t)] \quad (7.5)$$

En algunos casos, el número total de tareas puede disminuir a medida que aumenta el número de elementos sustituidos en el grupo, NG:

$$MNMTG^c(T_{st}) < MNMTI^c(T_{st}) \quad (7.6)$$

Como ilustración de la afirmación anterior, se analizará un grupo de cinco elementos idénticos, cuyo tiempo de fallo está distribuido normalmente con MTTF = 100 horas y desviación típica SDTTF = 25 horas. El número esperado de tareas individuales y de grupo, para un tiempo operativo de 500 horas, aparece en la Tabla 19.

Así, si todos los elementos se sustituyen en grupo se realizarán en término medio 7,61 tareas de mantenimiento, durante el tiempo fijado, mientras que en el caso de política individual habrá 23,7 peticiones de mantenimiento.

- b) Reducción posible del coste de mantenimiento.

Según la ecuación (4.7), el coste de cada tarea de mantenimiento realizada en el grupo de elementos, CMTG, será:

$$CMTG = CG_{sp} + CG_m + CG_p + CLRG \quad (7.7)$$

NI	NG	MNMTI ^c (T _{st})	MNMTG ^c (T _{st})	TMNMT ^c (T _{st})
5	0	23,70	0,00	23,70
3	2	14,22	6,03	20,25
2	3	9,48	7,02	16,50
1	4	4,74	7,56	15,30
0	5	0,00	7,61	7,61

Tabla 19 - NÚMERO DE ACCIONES DE MANTENIMIENTO PARA SUSTITUCIÓN INDIVIDUAL Y POR GRUPOS -

donde CG_{sp} es el coste de los repuestos usados, CG_m es el coste de material necesario para la sustitución del grupo, CG_p es el coste de personal para la sustitución del grupo ($CG_p = HRP * MDMT_g$) y CLRG es el coste de los ingresos perdidos a causa de la ejecución de la tarea de mantenimiento en un grupo de elementos.

En la expresión anterior está claro que, como no todos los elementos son usados completamente, al aumentar el número de repuestos usados en un grupo aumenta el coste de repuestos para cada sustitución de grupo, CG_{sp} :

$$CG_{sp} = \left(\sum_{j=1}^{NG} C_{spj} \right) > C_{spj}, \text{ para cualquier } j = 1, \dots, NG \quad (7.8)$$

Por otro lado, todos los demás elementos de coste de la sustitución del grupo pueden ser considerablemente meno-

res: el sistema necesita ser desmontado sólo una vez, lo que significa que es necesario consumir sólo una «porción» de material (juntas, aceite, líquido refrigerante, etc.), que el equipo especial debe ser utilizado o alquilado sólo una vez, y que hay un ahorro considerable en personal. Como el sistema está fuera de servicio sólo una vez, frente a posiblemente cinco veces si tenemos cinco elementos, se pueden conseguir ahorros considerables debido a la reducción de los ingresos perdidos durante el mantenimiento:

$$\begin{aligned} CG_m &< \sum_{j=1}^{NG} C_{m_j} \\ CG_p &< \sum_{j=1}^{NG} C_{l_j} \\ CLRG &< \sum_{j=1}^{NG} CLR_j \end{aligned} \quad (7.9)$$

El coste de cada sustitución en grupo es en el caso de

(a) Política de mantenimiento correctivo:

$$CMTG^c = CG_{sp}^c + CG_m^c + CG_p^c + CLRG^c \quad (7.10)$$

(b) Política preventiva:

$$CMTG^p = CG_{sp}^p + CG_m^p + CG_p^p + CLRG^p \quad (7.11)$$

7.1. Política de mantenimiento basada en la oportunidad para un grupo de elementos

En el caso de que la tarea de mantenimiento se realice sobre un grupo de elementos, el coste medio total para el tiempo operativo fijado, $TMCG^c(T_{st})$ se define como:

$$TMCG^c(T_{st}) = MNFG(T_{st}) \times CMTG^c \quad (7.12)$$

donde $MNFG(T_{st}) = T_{st}/MTTFG$ es el número esperado de tareas de mantenimiento de grupo realizadas durante el tiempo fijado, y $CMTG^c$

es el coste de cada tarea correctiva realizada sobre el grupo de elementos, expresado en la ecuación (7.10). En la Figura 20 se muestra una representación gráfica de la sustitución individual y por grupos, en el caso de política de mantenimiento correctiva.

7.2. Política de mantenimiento preventiva para un grupo de elementos

En los casos en que se realiza una tarea de mantenimiento sobre un grupo de elementos, el coste de mantenimiento por unidad de operación se define como:

$$UMCG^p(TP) = \left[\frac{\sum_{j=1}^{NG} (MNF_j(TP) \times CMT_j^c + CMTG^p)}{TP} \right]_{\min} \quad (7.13)$$

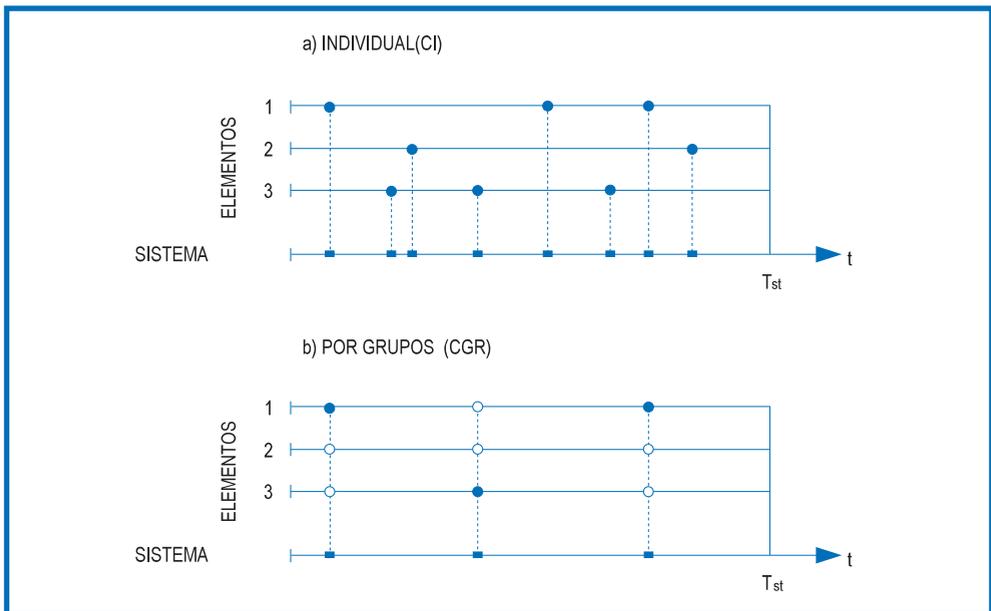


Figura 20 - TAREA DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO INDIVIDUAL Y POR GRUPOS -

Sustituyendo $MNF_j(T_p)$ por $F_j(T_p)$, la expresión anterior podría escribirse en forma simplificada como:

$$UMCG^p(TP) = \left[\frac{\sum_{j=1}^{NG} (F_j(TP) \times CMT_j^c + CMTG^p)}{TP} \right]_{\min} \quad (7.14)$$

En la Figura 21 se muestra una representación gráfica de sustitución individual y por grupos, en el caso de política de mantenimiento preventiva.

7.3. Estrategia óptima para una política de mantenimiento OB

Para optimizar el procedimiento de mantenimiento de los sistemas que constan de varios elementos críticos de mantenimiento,

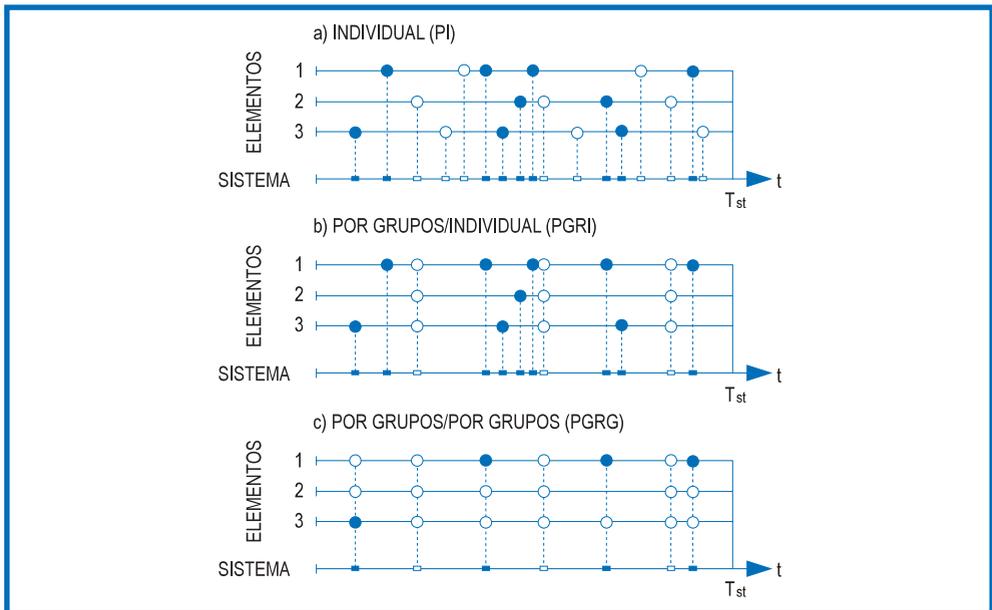


Figura 21 - TAREA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO INDIVIDUAL Y POR GRUPOS -

NCI, es posible combinar tareas de mantenimiento realizadas sobre elementos individuales, NI, y sobre un grupo de elementos, NG. Así podría surgir la oportunidad de establecer un gran número de posibles estrategias de mantenimiento. El número de éstas, NMS, puede determinarse con la siguiente expresión, que representa la suma del número de combinaciones de NG elementos tomados entre los NCI:

$$NMS = 1 + \sum_{NG=2}^{NCI} \binom{NCI}{NG} = 1 + \frac{\sum_{NG=2}^{NCI} NCI}{NG!(NCI-NG)!} \quad (7.15)$$

El coste medio total de cada estrategia de mantenimiento para todos los elementos críticos, a lo largo de un tiempo fijado, $TCMS(T_{st})$, es igual a la suma del coste medio total del mantenimiento realizado a cada elemento individual, $MCOMI(T_{st})$, y el coste medio total de la tarea de mantenimiento realizada a un grupo de elementos, $MCOMG(T_{st})$:

$$TCMS(T_{st}) = MCOMI(T_{st}) + MCOMG(T_{st}) \quad (7.16)$$

donde:

$$MCOMI(T_{st}) = \sum_{i=1}^{NCI-NG} MCOM_i(T_{st}) \quad (7.17)$$

La estrategia con el coste medio total mínimo es la estrategia de sustitución óptima, ORS, ya que éste fue el criterio de optimización que se adoptó:

$$ORS = \{TCRS_j(T_{st}), j = 1, NMS\}_{\min} \quad (7.18)$$

7.4. Metodología para determinar la estrategia de sustitución óptima

El siguiente algoritmo se desarrolló para indicar los pasos que deben seguirse en la determinación de la estrategia de sustitución óptima de elementos críticos:

- 1) Determinar los elementos que son adecuados para la sustitución por grupos, NCI.
- 2) Determinar el número de posibles estrategias de mantenimiento, NMS.
- 3) Para cada elemento, determinar:
 - a) El número medio de fallos para el tiempo fijado, $MNF(T_{st})$.
 - b) El coste de cada tarea de mantenimiento, CMT.
- 4) Para cada estrategia de mantenimiento, determinar:
 - a) El número medio de fallos para un grupo de elementos sometidos a una tarea de mantenimiento en el mismo momento, $MNFG(T_{st})$.
 - b) El coste de todas las tareas de mantenimiento: $MCOMI(T_{st})$ y $MCOMG(T_{st})$.
 - c) El coste medio total para el mantenimiento en el momento fijado, $TCMS(T_{st})$.
- 5) Comparar los costes medios totales para todas las estrategias de mantenimiento.
- 6) Determinar la estrategia de sustitución óptima.

7.5. Sustitución de elementos con el mismo nivel de acceso

El diagrama de bloques de fiabilidad de un sistema determinado representa el efecto del fallo del elemento sobre las prestaciones del sistema. Desde el punto de vista del mantenimiento, el diagrama de

bloques funcional puede modificarse para obtener un diagrama de nivel de mantenimiento según la localización de los elementos. Todos los elementos que están localizados en la superficie del sistema estarán en el mismo nivel de acceso en el diagrama de nivel de mantenimiento. Todos los elementos que están localizados inmediatamente debajo de ellos, es decir, cuyo acceso necesita el desmontaje de los elementos del nivel previo, establecerán un segundo nivel, y así sucesivamente. Por tanto, para ganar acceso a los elementos en un nivel inferior, todos o algunos elementos de los niveles superiores deben ser desmontados. A efectos prácticos, es importante localizar cada elemento crítico en el diagrama de nivel de mantenimiento, porque sólo ellos permiten determinar la estrategia óptima de sustitución sólo puede determinarse claramente para ellos. Si se efectúa la sustitución en grupo de los elementos del mismo nivel de acceso, el coste total de cada sustitución es:

$$\text{CMTG}^c = \sum_{i=1}^{\text{NG}} C_{\text{spi}}^c + C_m^c + C_l^c + \text{CLRC} = \sum_{i=1}^{\text{NG}} C_{\text{spi}}^c + \text{CAL} \quad (7.19)$$

donde CAL es el coste de acceso al nivel en que se encuentran los elementos. Por tanto, según el modelo «EXETER», el coste medio total de la sustitución en grupo de todos los elementos del mismo nivel de acceso, para el tiempo fijado en el caso de sustitución correctiva, será:

$$\text{MCOMG}^c(T_{\text{st}}) = \text{MNMTG}^c(T_{\text{st}}) \times \text{CMTG}^c = \text{MNMTG}^c(T_{\text{st}}) \times \left(\sum_{i=1}^{\text{NG}} C_{\text{spi}}^c + \text{CAL} \right) \quad (7.20)$$

Ese método de sustitución en grupo de elementos proporciona una reducción en el coste total, como resultado de una reducción en los costes de material, equipo usado, interrupción y personal por cada sustitución, porque en el caso de sustitución en grupo es necesario alcanzar el nivel sólo una vez, mientras que en el caso de sustitución individual, el nivel debe ser alcanzado para cada sustitución.

EJEMPLO 10. Se presenta un ejemplo numérico hipotético para ilustrar la utilidad del modelo y de la metodología aquí contenidos. Consideremos un sistema de ingeniería que comprenda nueve elementos críticos, localizados en tres niveles de acceso.

El ejemplo numérico presentado considera un tercer nivel que consta de cinco elementos críticos. El problema es determinar la estrategia óptima de sustitución que proporcione el coste total mínimo de mantenimiento para un período operativo de 500 semanas. Los datos iniciales necesarios se presentan en la Tabla 20, y se acordó que el tiempo hasta el fallo para todos los elementos renovables, podía modelizarse adecuadamente usando la distribución normal, definida por el tiempo medio hasta el fallo, MTTF, y la desviación típica del tiempo hasta el fallo, SDTTF. El coste de alcanzar el tercer nivel de acceso es 110 dólares.

En la Tabla 21 se presentan los datos calculados para la sustitución individual de elementos críticos.

Elemento	1	2	3	4	5
MTTF (semana)	60	150	200	80	100
SDTTF (semana)	18	35	50	20	30
C_{sp}	40	4	70	19	15

Tabla 20 - DATOS DE ENTRADA PARA EL EJEMPLO ILUSTRATIVO -

Elemento (i)	1	2	3	4	5
$MNF_i(T_{st})$	7,84	5,87	5,19	7,06	5,53
$C_i^c (\$/sust.)$	150	114	180	129	125
$MCOM_i^c(T_{st}) (\$)$	1176,0	327,2	394,2	910,7	691,3

Tabla 21 - RESULTADOS PARA SUSTITUCIÓN INDIVIDUAL -

Todos los demás datos obtenidos se presentan en la Tabla 22, donde la primera columna relaciona 27 posibles estrategias de sustitución dentro de la política de sustitución OB. En las columnas 2-6, los elementos que están sujetos a sustitución individual se representan por I y por G los que lo están a sustitución en grupo. De los resultados de la columna 11, se puede deducir que hay diferencias significativas entre ellos, pero que la estrategia de sustitución número 23 ofrece el coste mínimo. La estrategia de sustitución óptima para los cinco elementos críticos considerados es: sustitución en grupo de los elementos 1, 2, 4 y 5 cuando alguno de ellos falle, y sustitución individual del elemento número 3 después de su fallo.

El ejemplo expuesto muestra que el coste de mantenimiento puede reducirse considerablemente usando el modelo presentado para determinar la estrategia óptima de sustitución. Se alcanzó la principal reducción del coste total de mantenimiento para el tiempo fijado, combinando las sustituciones individuales y en grupo de los elementos

MANTENIMIENTO

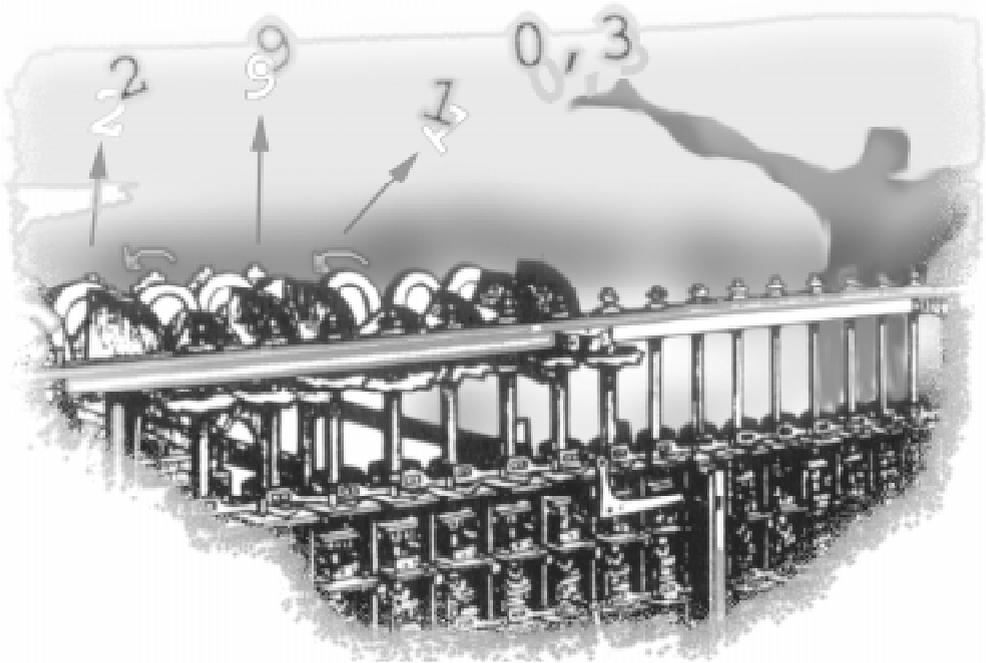
MS	1	2	3	4	5	MNFG _i (T _{st})	CMTG ^c	TCMTG ^c (T _{st})	MCOMI ^c (T _{st})	TMMS (T _{st})
1	G	G	I	I	I	8,43	154	1.298,2	1.996,2	3.294,4
2	G	I	G	I	I	8,42	220	1.855,4	1.929,6	3.785,0
3	G	I	I	G	I	9,34	169	1.578,5	1.415,7	2.991,2
4	G	I	I	I	G	8,86	165	1.461,9	1.635,1	3.094,0
5	I	G	G	I	I	3,47	184	638,5	2.778,0	3.416,5
6	I	G	I	G	I	6,51	133	865,8	2.261,5	3.127,3
7	I	G	I	I	G	5,28	129	681,1	2.480,9	3.165,0
8	I	I	G	G	I	6,43	199	1.279,6	2.194,5	3.474,1
9	I	I	G	I	G	5,03	195	980,9	2.413,9	3.394,8
10	I	I	I	G	G	6,99	143	1.006,6	1.897,4	2.904,0
11	G	G	G	I	I	9,10	224	2.038,4	1.605,0	3.640,4
12	G	G	I	G	I	9,81	173	1.697,1	1.085,5	2.785,6
13	G	G	I	I	G	9,46	169	1.598,7	1.304,9	2.903,6
14	G	I	G	G	I	9,90	239	2.366,1	1.019,5	3.384,6
15	G	I	G	I	G	9,68	235	2.274,8	1.237,9	3.515,7
16	G	I	I	G	G	10,27	184	1.889,7	721,4	2.611,1
17	I	G	G	G	I	6,81	203	1.395,4	1.867,3	3.249,7
18	I	G	G	I	G	5,47	199	1.088,5	2.086,7	3.175,2
19	I	G	I	G	G	7,60	148	1.124,8	1.570,2	2.695,0
20	I	I	G	G	G	7,45	214	1.594,3	1.503,3	3.097,5
21	G	G	G	G	I	9,77	243	2.374,1	691,3	3.065,4
22	G	G	G	I	G	9,47	239	2.263,3	910,7	3.174,0
23	G	G	I	G	G	10,13	188	1.904,4	394,2	2.298,6*
24	G	I	G	G	G	10,16	254	2.580,6	327,2	2.907,8
25	I	G	G	G	G	7,37	218	1.606,7	1.176,0	2.785,7
26	G	G	G	G	G	10,10	258	2.605,8	/	2.605,8
27	I	I	I	I	I	/	/	/	3.499,4	3.499,4

Tabla 22 - RESULTADOS DEL EJEMPLO ILUSTRATIVO -

críticos del mismo nivel de acceso. De esta forma, al aplicar los principios de mantenimiento OB, los explotadores o usuarios pueden conseguir un mantenimiento más eficaz y suministrar los recambios necesarios a tiempo, consiguiendo así un uso más eficaz de los sistemas, con menores inversiones en recursos o costes.

8

Tecnología avanzada para el mantenimiento



"Una buena localización de averías no es más que un buen razonamiento deductivo. En medio de ese razonamiento existe una cuidadosa observación y evaluación de la evidencia física. Desgraciadamente, muchos dispositivos en los aviones utilizan «chips» de ordenador para realizar una función que anteriormente desempeñaban componentes o subsistemas básicamente mecánicos. Consecuentemente se dificulta la localización de averías, en el sentido tradicional de búsqueda de evidencias físicas del fallo. No se puede localizar una avería en un «chip» de ordenador buscando evidencias físicas. Un «chip» averiado no ofrece un aspecto distinto de otro en buen estado. Aunque se puede argumentar que los «chips» averiados desprenden humo en ocasiones, pocas veces se evidencia el de fallo. Los «chips» averiados no gotean, no vibran, ni hacen ruido. En su interior, un «software» defectuoso no deja charcos o manchas como evidencia de su comportamiento erróneo. Por decirlo de otro modo, es difícil ver caer los unos y ceros del extremo de una patilla de conexión."

John Hessburg, Mecánico Jefe
Grupo Aéreo Comercial Boeing [Airliner/Enero-Marzo 1995]

El objetivo principal de este capítulo es analizar el impacto de los avances de la tecnología en los procesos de mantenimiento, con énfasis en:

- 1) La vigilancia de la condición.
- 2) La localización de averías.

8.1. Técnicas de vigilancia de la condición

Las técnicas de vigilancia de la condición se basan en dispositivos utilizados para vigilar, detectar y diagnosticar la condición de los sistemas

considerados. Por tanto, el objetivo de la técnica de vigilancia de la condición es suministrar información referente a la condición real del sistema y a los cambios que se producen en esa condición. Es importante entender el comportamiento del elemento al producirse el fallo, para que puedan seleccionarse las técnicas de vigilancia más efectivas. La decisión sobre la selección de las técnicas de vigilancia de la condición depende en gran forma del tipo de sistema usado, y en último término viene determinada por consideraciones económicas y/o de seguridad. Una vez que se ha tomado la decisión sobre las técnicas a usar, es posible definir el sistema que se necesitará para llevar a cabo la vigilancia de la condición. Debido al creciente interés en esta técnica durante los últimos años, existen muchos desarrollos de dispositivos relacionados con la vigilancia de la condición de sistemas. Los sensores, instrumentos, y dispositivos de grabación y de análisis han mejorado notablemente. Este desarrollo ha permitido obtener una información más fiable acerca de la condición del sistema. Una vez que se instalan los sensores de vigilancia de la condición y se recogen los datos, es necesario tener métodos fiables de interpretación de los mismos, para detectar en qué momento ocurren los fallos. Una tarea de mantenimiento condicional eficaz exige un gran número de medidas, efectuadas a intervalos que aseguren la identificación del cambio en la condición de un elemento o sistema, con tiempo suficiente antes de la acción correctiva. El volumen de datos necesario para determinar con precisión la condición del elemento o sistema, exige una considerable cantidad de tiempo para llegar a una presentación que pueda interpretarse. Por tanto, ha surgido una gran demanda de desarrollo de herramientas que diagnostiquen la condición del sistema y permitan la predicción del fallo. Los diagnósticos de los sistemas se han desarrollado hasta un punto en que la información disponible es de tal volumen, que el hombre necesita la ayuda del ordenador para sacar el mayor beneficio. La inteligencia artificial parece cubrir esta necesidad, suministrando numerosas técnicas potentes, para manejar grandes cantidades de datos. En todos los campos de la ingeniería se han aplicado técnicas de inteligencia artificial tales como sistemas expertos, redes neuronales, lógica difusa y sistemas basados en el conocimiento. En los últimos años, se han utilizado estas técnicas

en el campo de la vigilancia y diagnóstico de sistemas. Entre todas esas técnicas de inteligencia artificial, los sistemas expertos acaparan la mayor atención. Durante más de una década ha estado presente la idea de usar la tecnología de los sistemas expertos para desarrollar herramientas de apoyo de «software» para el mantenimiento de sistemas. Los sistemas expertos extienden la potencia del ordenador más allá de las funciones matemáticas y estadísticas habituales, usando el diálogo y la lógica para determinar diversas posibles acciones o consecuencias. Los sistemas expertos tienen varias ventajas sobre los expertos humanos:

- a) Pueden procesar la información mucho más rápidamente y, en consecuencia, pueden reducir el tiempo de diagnóstico de mantenimiento.
- b) Pueden analizar situaciones con objetividad y no olvidar ningún hecho relevante, reduciendo por tanto la probabilidad de realizar un diagnóstico erróneo.
- c) Pueden detectar fallos incipientes mediante la vigilancia en directo de los parámetros de condición del sistema.

Actualmente hay una gran variedad de técnicas de vigilancia bien desarrolladas, que se usan ampliamente para apoyar y mejorar las tareas de mantenimiento condicional. En general, las técnicas de vigilancia de la condición pueden dividirse en diferentes categorías según distintos criterios.

A continuación se analizan brevemente algunas de las técnicas usadas con más frecuencia.

8.1.1. Vigilancia de las vibraciones

Este tipo de técnica de vigilancia de la condición se basa en el hecho de que las máquinas giratorias, tales como bombas, compresores,

cajas de cambios, turbinas, etc. producen vibraciones a medida que las máquinas se deterioran. Si alguno de estos sistemas empieza a fallar, sus niveles de vibración cambian; mediante la vigilancia de las vibraciones se trata de detectar y analizar estos cambios. A menudo sólo se mide y analiza el nivel de vibración global para vigilar la condición general del sistema. Los cambios en los niveles de vibración se pueden usar como un indicador para detectar fallos incipientes, y a veces para definir las posibles causas de un mal funcionamiento. Por tanto, la medida y el análisis del nivel de vibración pueden dar una buena indicación de la condición de la máquina, y usarse fiablemente en programas de mantenimiento basados en la condición, tanto como parámetro de vigilancia continua como en un programa periódico. La vibración puede caracterizarse mediante tres parámetros: desplazamiento, velocidad y aceleración. Basado en estos parámetros, existen básicamente tres transductores de medida de la vibración que pueden usar los ingenieros de mantenimiento para recopilar datos de las máquinas giratorias. Los tres transductores considerados son: transductor de desplazamiento, transductor de velocidad y acelerómetro. Hoy en día hay disponible una amplia gama de instrumentos que varían desde el simple hasta el especializado, así como sistemas basados en ordenador para la vigilancia de la vibración. Algunos de ellos son sistemas conectados en directo con sensores montados permanentemente. Otros se basan en medidas manuales. Al margen de si están conectados en directo o no, todos estos sistemas pueden analizar las medidas, almacenar los datos, deducir tendencias y representar gráficamente los resultados. El equipo de vigilancia de vibración consta normalmente de tres elementos principales: un dispositivo de adquisición de datos, efectuado mediante el uso de uno o más transductores apropiados localizados en la propia máquina, algún tipo de procesamiento de la señal, bien como análisis de series temporales o bien como espectro de frecuencias, y un método por el cual se expone la condición de la máquina que se vigila. La mayoría de los análisis de vibración se basan en una o más técnicas de tendencia y análisis. Estas técnicas incluyen tendencia en banda ancha, tendencia en banda estrecha y análisis de firma. La importancia de la vigilancia de la condición de las máquinas giratorias por el análisis de vibraciones,

crece continuamente y es probablemente una de las técnicas mejor desarrolladas en el campo del mantenimiento basado en la condición. Los problemas más importantes cuando se mide la vibración son: la gran cantidad de información a procesar y el pequeño número de personas expertas en el análisis de unos datos particulares de vibración que puedan deducir la condición de la máquina. Estas limitaciones se están venciendo mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial para automatizar la interpretación de los datos de vibración. Recientemente, ha habido un interés considerable en la aplicación de sistemas expertos a la vigilancia de la vibración de sistemas como turbinas de gas, cajas de cambios, etc.

8.1.2. Vigilancia de la tribología

Normalmente, las muestras de aceite se analizan en laboratorio usando diferentes métodos. La información del análisis es útil para determinar si una máquina, por ejemplo un motor, está sufriendo un desgaste anormal o si el lubricante está degradado. La vigilancia de la tribología emplea varias técnicas que pueden usarse en la ejecución de tareas de mantenimiento condicional.

A) **Análisis del aceite lubricante.** En los análisis del aceite lubricante, se estudian las muestras para determinar si cumplen todavía los requisitos de lubricación. Los resultados del análisis pueden emplearse para determinar la vida del lubricante y, por tanto, cuándo se debe cambiar o renovar para que siga cumpliendo los requisitos especificados. De esta forma, se puede usar el análisis del aceite lubricante para programar el intervalo de cambio de aceite, de acuerdo con su condición real. Los resultados del análisis pueden servir como base para cambiar el tipo de aceite a fin de mejorar las prestaciones. En conclusión, no se puede utilizar el análisis de aceite lubricante como una herramienta para determinar la condición operativa del sistema, pero sí como una ayuda importante para un mantenimiento basado en la condición.

B) Análisis de partículas. Es una técnica muy importante que se usa para suministrar una indicación acerca del cambio en la condición del sistema, así como para ayudar a determinar la causa del fallo. Las técnicas de vigilancia de los productos de desgaste se consideran como un método muy fiable para detectar una degradación de la condición operativa en casi todos los sistemas lubricados por aceite, porque una variación en el índice de contenido de dichos productos significa un cambio en la condición del sistema. Las partículas contenidas en el aceite lubricante proporcionan una información detallada e importante sobre la condición de la máquina. Esta información puede deducirse de la forma, distribución de tamaños y composición de las partículas. Se aplican distintas técnicas para la vigilancia de la condición de sistemas lubricados por aceite, a fin de comprender los procesos de desgaste que aparecen, y establecer un método apropiado que pueda aplicarse para detectar y diagnosticar una condición anormal del sistema. Mobley [4] clasifica el análisis de partículas de desgaste en dos estados básicos: análisis del contenido de sólidos del lubricante, como cantidad, tamaño y composición, y análisis del tipo de desgaste.

Sin embargo, las limitaciones principales en el uso del análisis de la tribología como tarea de mantenimiento condicional son: el coste del equipo, la precisión en la adquisición de las muestras y la interpretación de los datos obtenidos.

8.2. Vigilancia de las prestaciones

La vigilancia de las prestaciones es un método que observa principalmente el modo en que los elementos o sistemas están realizando la función asignada. Las prestaciones que se consideran a estos efectos son, por ejemplo: eficacia, temperatura, presión, caudal, velocidad, etc. Se recogen normalmente los datos de estos parámetros dentro de la rutina de funcionamiento para vigilar las prestaciones del sistema. Se puede explotar más a fondo su utilidad para que sirvan como indicadores de la condición del sistema. De esta forma, la

vigilancia de las prestaciones se ha convertido en un procedimiento adoptado en muchas compañías, ya que puede ser una herramienta eficaz en la detección de fallos del sistema. De forma general, el análisis se compone simplemente de estudios de tendencia en función del tiempo. Se detecta una condición de fallo cuando se exceden ciertos valores límites. En grandes instalaciones es muy común que la mayoría de sistemas tengan instalada la instrumentación necesaria para medir los parámetros que indican la condición operativa real del sistema, como termómetros, indicadores de presión, etc. La masa de información que producen se recoge de una de estas dos formas: sistemas manuales o sistemas basados en microprocesadores; después, se analizan los datos para preparar salidas tales como gráficos, listados y, en algunos casos, órdenes de trabajo para el personal responsable de la tarea real de mantenimiento. En vez de estudiar los resultados de los sistemas de vigilancia de prestaciones, y decidir en consecuencia (lo que normalmente debería realizar personal altamente capacitado), se puede ahorrar mucho tiempo y dinero ejecutando inmediatamente los pasos de mantenimiento establecidos por sistemas expertos. La ventaja de tales sistemas de diagnóstico inteligente es que ayudan a interpretar la gran cantidad de datos de parámetros de prestaciones que suministran los sistemas convencionales de vigilancia de condición al personal de mantenimiento. Además, son adecuados para encontrar sentido a un conjunto complejo de datos en situaciones en que debe tomarse un gran número de decisiones interrelacionadas.

8.3. Inspección visual

A pesar de los muchos métodos complejos de inspección disponibles, todavía es importante la ayuda de la inspección visual. Un inspector experimentado puede detectar visualmente muchos defectos, tales como fugas, holguras en los montajes, grietas superficiales, etc. Se dispone de una amplia gama de herramientas que ayudan en la realización de las inspecciones visuales, como espejos, lentes,

telescopios, etc. La inspección visual se usa ampliamente en la industria como una forma simple, rápida y relativamente barata de vigilar la condición, y a menudo juega un papel importante en el mantenimiento basado en la condición.

8.4. Técnicas de ensayo no destructivo

Esta monografía se centra en la vigilancia de condición mediante técnicas que miden directamente la condición de un elemento o sistema. Se pueden usar algunas de las técnicas de ensayo no destructivo para vigilar de forma directa el deterioro de la condición del sistema en servicio. La gama de técnicas de examen no destructivo disponibles es tan amplia que aquí solamente describiremos algunas de ellas.

A) **Inspección con partículas magnéticas:** Se usa para detectar y localizar en los materiales ferromagnéticos las discontinuidades superficiales o cercanas a la superficie, mediante la generación de una corriente magnética en el elemento. Durante la revisión general de mantenimiento programada, se puede inspeccionar la existencia de grietas en elementos tales como ejes, volantes, álabes de turbinas de vapor, etc., mediante la inspección con partículas magnéticas. Este tipo de técnica no es un análisis cuantitativo, pero con ella un usuario cualificado puede ser capaz de proporcionar una estimación razonable de la profundidad de una grieta.

B) **Examen por corrientes inducidas:** Es un método que se basa en los principios del electromagnetismo. Cuando un material magnético está presente en un campo electromagnético y se produce algún movimiento entre ellos, se induce una corriente eléctrica en el material metálico (corrientes parásitas). La presencia de discontinuidades en el material, tales como grietas, burbujas, etc., determina la magnitud y fase de la corriente inducida. Se puede usar la técnica de las corrientes inducidas para detectar defectos superficiales o

sub-superficiales en un elemento, y también para medir el espesor de capas, conductoras o no conductoras, en materiales con base ferrosa o no ferrosa, así como para suministrar información sobre ciertas características estructurales tales como las condiciones metalúrgicas y las propiedades físicas.

C) **Emisión acústica:** Es la emisión de ondas de alta frecuencia cuando se libera rápidamente energía de deformación, como consecuencia de ciertos cambios estructurales ocurridos en un material, tales como el crecimiento de una grieta y la deformación plástica. Las transformaciones del material tienen como resultado la generación de señales acústicas que pueden detectarse y analizarse, y por tanto, es posible obtener información sobre la localización y la significación estructural de tales fenómenos. Esta técnica es capaz de detectar la localización de la transformación interna del material, pero sin embargo no es capaz de identificar la magnitud de la grieta o de cualquier otra transformación del material, precisando por tanto complementarse con otras técnicas, por ejemplo, la de ultrasonidos. Una de las aplicaciones de esta técnica es la inspección de las vasijas de presión en las plantas nucleares [Asociación Internacional de Energía Atómica (1993)]. La vigilancia acústica depende mucho del establecimiento de unas precisas condiciones iniciales. Una vez que se determina la firma acústica del sistema, los resultados pueden compararse con la base establecida. Los cambios respecto a ella representan cambios en las condiciones del sistema.

D) **Termografía:** Es la práctica de recoger imágenes de la radiación térmica emitida por los objetos en la región infrarroja del espectro. Por tanto, esta técnica se basa en el principio de que alguno de los sistemas en operación desprende calor. La termografía usa una instrumentación diseñada para medir emisiones de energía en el infrarrojo, como medio para determinar la condición operativa del sistema. La cantidad de calor emitida varía a medida que lo hacen las condiciones de operación. La termografía se utiliza en la vigilancia de la condición para distintas aplicaciones; quizá el mayor uso de esta técnica es en la

detección de fallos en circuitos eléctricos, por ejemplo, para detectar conexiones eléctricas defectuosas en transformadores e interruptores eléctricos. Puede usarse también en la detección de la vida operativa de las paredes de hornos y en la alineación de las vasijas de presión en la industria petroquímica y del acero.

E) **Radiografías:** Se pueden fotografiar las discontinuidades superficiales o sub-superficiales causadas por fatiga, inclusiones, corrosión por tensión, etc., usando una radiación electromagnética de onda muy corta, principalmente rayos-X o rayos gamma. Esta técnica es una manera eficaz de detectar grietas internas, imperfecciones, faltas de homogeneidad, etc., pero la determinación del tamaño y posición de cualquier discontinuidad exige un personal muy especializado. Los inconvenientes de esta técnica son que exige el acceso a dos lados opuestos de un objeto, y que tiende a ser una técnica cara, comparada con otros métodos no destructivos. Esta técnica ha sido desarrollada más a fondo, y en la práctica se han aplicado métodos como la radiografía de neutrones, la estéreo-radiografía y la micro-radiografía.

F) **Inspección por ultrasonidos:** Es uno de los métodos más usados de ensayo no destructivo. Este método es apropiado para la detección, identificación y evaluación del tamaño para una amplia variedad de defectos superficiales y sub-superficiales en los materiales metálicos, siempre que haya acceso a la superficie. Se puede usar en la inspección rutinaria de aviones, vehículos de raíl, etc. para la búsqueda de grietas de fatiga incipientes. Puede emplearse también para medidas precisas de espesores, lo que puede realizarse usando técnicas de eco de los impulsos ultrasónicos. Este grado de precisión permite la vigilancia de la corrosión registrando los pequeños cambios en el espesor de una pared. Algunos equipos ultrasónicos, que están contruidos específicamente para la medida de espesores, suministran una lectura digital directa del grosor de la pared. Este tipo de técnica de vigilancia parece ser el más apropiado para vigilar directamente el parámetro de condición. Esta técnica es difícil de usar cuando las

partes inspeccionadas son rugosas, irregulares en su forma, o no homogéneas.

G) Líquidos penetrantes: Se usan principalmente para detectar discontinuidades abiertas superficiales, tales como grietas, porosidades, despegaduras y exfoliaciones.

8.5. Comprobación integrada

La comprobación integrada (Built-in Test, BIT), practica generalmente las funciones de detección de fallos y errores de un sistema, con el objeto principal de proteger al usuario y al sistema contra presentaciones u órdenes, erróneas o engañosas. Esta función de detección de fallos es por tanto parte de la función operativa básica del sistema.

8.6. Sistemas digitales de diagnóstico

Los sistemas digitales han demostrado ser fiables por su capacidad de autocomprobación. Sin embargo, pueden también producir problemas en los talleres cuando los fallos comunicados no pueden confirmarse en una comprobación posterior. Los usuarios observan en la práctica que algunos fallos son transitorios y no repetibles. La explicación puede encontrarse en las diferencias entre el entorno previsto y el real, en la práctica del mantenimiento o en problemas de diseño de los sistemas.

En la Tabla 23 se muestran los resultados de un estudio (Boeing 737-300 FMCS). La fiabilidad se mide mediante el tiempo medio entre fallos (MTBF). Los fabricantes cuentan como fallos los que se confirman en la comprobación en taller y ello conduce al habitual desacuerdo entre usuarios y fabricantes acerca de la cuantía de la tasa de desmontajes no confirmados, con la implicación por parte de los

Categoría	Número	%
Fallo confirmado por prueba en taller	177	46
Fallo confirmado por BITE	123	32
Problema de diseño de "software"	35	9
Datos insuficientes	26	7
Rechazo erróneo de LRU	23	6
Total	384	100
Horas de Vuelo	914.000	

Tabla 23 - ANÁLISIS DE FALLOS REGISTRADOS EN UN SISTEMA DIGITAL -

fabricantes de que muchos de ellos son debidos a errores de mantenimiento por parte del usuario.

Una buena solución es contar todos los fallos internos detectados por el sistema BITE que es más preciso. Los datos de la tabla indican 177 desmontajes (46 por ciento) confirmados por la comprobación en taller, pero también fallos confirmados por BITE en 123 casos más (32 por ciento). El MTBF es sólo una medida de los fallos realmente confirmados («hard fault») y no una indicación de la disponibilidad del sistema. El argumento tradicional del fabricante podría ser algo así como que «la mitad de ellos no fallan en la comprobación, por tanto no es nuestro problema», mientras que la respuesta del usuario podría ser que «la mitad se desmontan porque no podemos encontrar lo que les falla cuando están montados en el avión». Otras líneas de argumentación del usuario se centran en la observación de que, aunque la unidad pueda pasar la comprobación en taller, su sustitución resolvió evidentemente un fallo en el sistema del avión, implicando con ello que el taller no estaba en lo cierto.

El tiempo medio entre sustituciones no programadas (MTBUR) es una mejor medida de la actuación. Viene afectado por las técnicas de mantenimiento, pero también ignora los casos en que se solucionan ciertos fallos transitorios apagando y encendiendo de nuevo, lo que favorece al fabricante. El MTBUR se establece fácilmente a partir de los registros del usuario, pero es sólo éste quien puede deducirlo, ya que los fabricantes sólo reciben las unidades rechazadas.

Lo que se necesita es un sistema de medida de la tasa de fallos que incluya la confirmación por el BITE y el reconocimiento de los errores de diseño. Así se forzaría a los diseñadores a confiar en el BITE y en su integridad. Se deben corregir los fallos indicados por el BITE; si el propio BITE fallara, entonces habría que mejorar la precisión del BITE.

Los especialistas en aviónica digital distinguen entre fallos continuados («hard failure»), fallos transitorios («soft failure») y fallos intermitentes («intermittent failure»). Un fallo continuado es el que persiste tras varios intentos de arrancar el sistema. Un fallo transitorio es aquél cuyos síntomas de fallo desaparecen al restablecer la alimentación o cuando se ejecuta una prueba BITE. Un fallo intermitente es el que desaparece sin ninguna acción expresa del usuario.

Los fallos transitorios son la mayor área de preocupación en la aviónica digital; pueden consistir en una combinación de fallos de «hardware» y errores de «software». Los fallos intermitentes son más una molestia que un peligro, pero pueden consumir un tiempo de mantenimiento excesivo mientras se intenta localizarlos. En aviónica, estos fallos transitorios e intermitentes son el origen de ciertas prácticas irregulares de mantenimiento, realizadas para salir del paso. Una práctica común aplicada cuando el personal de mantenimiento no está seguro de la causa de un fallo de aviónica es proceder a través del sistema; primero se sustituye el transductor, después el

amplificador o procesador, después el indicador, y así sucesivamente hasta que desaparece el fallo.

8.7. Equipo integrado de comprobación (Built-In Test Equipment, BITE)

BITE es un término común en la industria, usado para indicar aquella parte del sistema que realiza la función de mantenimiento. En la mayoría de la aviónica digital, el equipo integrado de comprobación incluye algo de «hardware» y mucho «software».

A efectos del «software» existe una distinción importante. La función de mantenimiento, o BITE, se clasifica como no esencial para la seguridad. La función de detección de fallos, o BIT, es una parte básica del sistema, clasificada como esencial o crítica y debe certificarse al mismo nivel que el sistema.

El sistema a comprobar se conecta al BITE mediante una unidad de interfase constituida esencialmente por un sistema de encaminamiento, de forma que los dispositivos de estímulo y medida puedan conectarse al sistema que se comprueba. El operario controla y vigila la secuencia de la prueba a través del panel de control y presentación. Las señales de control se introducen en la secuencia central de la prueba y son devueltas al panel de presentación. La pantalla informa al usuario del resultado de la prueba y, si se requiere, de la acción correctiva más probable.

Se puede activar periódicamente la capacidad de autocomprobación del sistema BITE, para asegurarse de que funciona correctamente antes de examinar un sistema sospechoso. El sistema a probar se conecta al sistema de comprobación, identificando las conexiones por sus códigos. Para la identificación se usan tres líneas codificadas en binario. La inserción del conector apaga el sistema, dejándolo fuera del circuito principal.

Una vez que se ha conectado el sistema a probar, se selecciona la función «Prueba del sistema (System Test)» y se comienza la secuencia de pruebas presionando el botón de selección de prueba. El control central inicia la primera prueba de la secuencia, de forma que se conectan al sistema en prueba los dispositivos apropiados de estímulo y medida. Se hace la medida, comparando el resultado con los niveles de referencia, y se determina y expone al usuario si «pasa» o «falla».

El usuario selecciona las pruebas en secuencia hasta que se indica un fallo o hasta que finalice la secuencia. Cuando se presenta un fallo, se sustituye el módulo averiado indicado, se retiran los conectores de prueba y se puede disponer de nuevo el sistema para la acción de control.

El panel de control va montado en la consola de control, adyacente a los sistemas que se someten a comprobación. El conector de prueba del sistema incluye las conexiones necesarias para poder comprobar totalmente el sistema. Cuando se realiza una conexión desde este conector a cualquier sistema, o al conector de «Autocomprobación (Self-Test)», el sistema BITE realizará automáticamente las pruebas en el sistema seleccionado o en el propio equipo de comprobación, dependiendo del modo seleccionado.

El conmutador de modo es del tipo giratorio, con cuatro posiciones, y selecciona el modo de operación apropiado:

- (1) Apagado.
- (2) Autocomprobación 1. Pruebas de testigos y presentación.
- (3) Autocomprobación 2. Pruebas de estímulos y medidas.
- (4) Prueba de sistemas.

Con el conmutador de modo en la posición 2, y apretado el botón de selección de prueba, se realiza automáticamente la prueba de la presentación en pantalla. El número de prueba comienza en el «00» y

va corriendo hasta el número correspondiente a la finalización de la comprobación, indicando al usuario cualquier discrepancia. Con el conmutador de modo en la posición 3, se lleva a cabo una prueba de los dispositivos de estímulo y medida. A partir de ahí, la secuencia de prueba es idéntica a la de un sistema normal. El dispositivo de autocomprobación se oculta normalmente bajo una bandera, para no confundir durante el funcionamiento del panel.

La prueba del sistema se lleva a cabo con el conmutador de modo en la posición 4, y con el sistema a comprobar enchufado al conector de prueba. Cuando se selecciona la prueba del sistema, el testigo de «Desconectado (off-line)» se ilumina confirmando que el sistema examinado está desconectado. Se selecciona la primera prueba apretando el botón de selección de prueba, aparece en la pantalla el resultado del examen (es decir, «pasa» o «falla») y se indica el módulo o minimódulo afectado. Se continúa la comprobación, apretando de nuevo el botón de selección de prueba y observando los resultados. Se comprueba la capacidad de un sistema para mover un actuador mediante un indicador de tambor giratorio. El usuario comprueba el sentido de giro mediante la consulta del testigo de «abrir» o «cerrar», en que se ilumina el correspondiente al sentido de giro.

Los estímulos se dividen básicamente en dos tipos: señales analógicas y señales lógicas digitales. Las señales lógicas se aplican al sistema en prueba, para simular las diversas señales de estado de los dispositivos. Pueden aplicarse hasta 24 bits para una prueba determinada, o cualquier parte de la palabra de 24 bits para una prueba rápida superpuesta a la secuencia. Todas las entradas pueden alimentarse con una señal lógica «1» o «0» o dejarse en circuito abierto, dependiendo del requisito de la prueba seleccionada.

Se dispone para las entradas del sistema de una variedad de señales de frecuencia fija y de un generador de frecuencia variable. Pueden seleccionarse y aplicarse señales variables en corriente continua, así como valores fijos de voltaje en corriente continua. Se miden las

señales que retornan desde el sistema en comprobación, para determinar si entran dentro de los límites programados. Tanto las señales analógicas como las lógicas digitales se procesan en paralelo, mostrándose el resultado en la pantalla como «pasa» o «falla». Se indica el tipo de prueba y si las medidas se encuentran dentro de tolerancias, ya sea un voltaje analógico, un nivel lógico o una combinación de ambos.

La mayoría de las modificaciones en los sistemas existentes que se comprueban pueden limitarse, en la mayoría de los casos, a cambios de «software», o sea, del programa. Pueden realizarse alteraciones cambiando el PROM (memoria programable, únicamente para lectura), un circuito integrado recambiable. Pueden añadirse dispositivos adicionales de estímulo y medida para aumentar sus posibilidades de aplicación.

8.8. Uso de BITE para el seguimiento operativo de las prestaciones

Frecuentemente el fallo de una LRU² registrado en el BITE es el único dato útil que ayuda en la investigación del fallo. Por ello es importante que el personal del taller examine y rastree los registros del BITE de todos los LRU recibidos. Los datos del BITE deben ser fiables para que el trabajo de mantenimiento pueda basarse en ellos.

El establecimiento de una correlación entre los registros de reparación y las quejas de los usuarios es una tarea laboriosa, especialmente si las entradas de los registros no señalan más que los habituales enigmáticos «U/S»³, «falló», o términos menos significativos. Un «software» complejo precisa que exista una descripción completa de los acontecimientos, para poder ser reproducido en una prueba en taller. Probablemente, unos datos manuales no serán nunca adecuados para esto. Un sistema de mantenimiento integrado puede portarse mucho mejor.

(2) LRU: Line Replaceable Unit: Unidad reemplazable en línea (1^{er} escalón).

(3) U/S: Unserviceable: Fuera de servicio.

La industria de aviónica debe conservar registros de las reparaciones de equipos y de los datos del BITE. Actualmente, la memoria para los datos del BITE es barata y lo suficientemente grande como para guardar muchos datos útiles, como fase del vuelo, avión y ruta, localización del fallo, estado del sistema en ese momento, etc. La frecuencia de grabación de acontecimientos en los sistemas BITE es programable por los usuarios, lo que constituye una característica útil si se conoce.

8.9. El concepto de «bus»⁴ de datos

El «bus» de datos se presenta cada vez más en el diseño de aviones. ARINC 429 se usa ampliamente en el mercado de la aviónica civil, mientras que MIL-STD-1553 se usa principalmente en la aviónica militar.

Antes de la introducción del «bus» de datos, todas las conexiones se realizaban punto a punto. Si se necesitaba una señal determinada del avión (por ejemplo, la velocidad aerodinámica) como entrada para una función (tal como la navegación), era necesario disponer un par exclusivo de cables para transportar esa señal. A medida que los sistemas de aviones se volvían más complicados, se ponía de manifiesto la importancia de la transferencia de datos entre sistemas para alcanzar una optimización de las prestaciones. A su vez, esto condujo a que el cableado del avión se volviera cada vez más complejo, debido a la gran cantidad de cables y conectores necesarios, lo que a su vez acarrea los consecuentes fallos y acciones de mantenimiento. Para reducir el peso y mejorar la fiabilidad, los ingenieros comenzaron a idear formas para juntar más de una señal en un mismo cable.

Tan pronto como esté presente más de una señal en un determinado medio (a este proceso se le llama multiplexación), deben

(4) N. del T. La palabra «bus» para representar un conductor por el que circulan simultáneamente diversas señales que seleccionan oportunamente los dispositivos que las necesitan, es de uso frecuente, por lo que se ha preferido mantener sin traducir.

establecerse medios para identificar y separar las señales en el extremo receptor (proceso llamado demultiplexación). Un ejemplo simple de un «bus» de datos es el control multicanal por radio de los aeromodelos. Aquí el medio es una portadora de radiofrecuencia, y las señales son una cadena de impulsos, cuya longitud es proporcional a la señal analógica que se transmite. Un impulso de sincronización inicia la secuencia, y se identifica cada señal por su lugar en el tren de impulsos. Esto se conoce como direccionamiento secuencial en el tiempo, y conduce a los conceptos de prioridad, ritmo de renovación e integridad. En este ejemplo, todas las señales tienen la misma prioridad y son renovadas (se transmiten los nuevos datos) al mismo ritmo. El sistema tiene implícitamente una baja integridad, ya que no hay medios inmediatos para saber, en el transmisor, si se han recibido todos los datos en el receptor, y si los datos son correctos. Estos parámetros de prioridad, ritmo de renovación e integridad se usan para establecer las distintas clases de «buses» de datos.

8.9.1. ARINC 429

ARINC 429 fue el primer «bus» de datos adoptado universalmente en el mundo de los aviones comerciales, siendo incorporado en el diseño de los Boeing 757 y 767, y del Airbus A310. Surgió de estudios iniciados a mediados de los años 70 para especificar un «bus» de datos normalizado para aviones comerciales. La ventaja de la normalización ya se estaba confirmando en la industria, por ejemplo con la definición ARINC 561 de las características de un Sistema de Navegación Inercial (Inertial Navigation System, INS), y la definición ARINC 571 de los datos precisos desde y hasta un INS.

8.9.2. MIL-STD-1553

MIL-STD-1553 se desarrolló ampliamente en la misma época que ARINC 429, y tuvo una primera introducción de amplitud en el

avión F-16. Difiere de ARINC 429 en que es multifuente, multisumidero y bidireccional. Esto significa que las unidades que acceden al «bus», indicadas como terminales remotas, pueden tanto transmitir como recibir datos. Para evitar posibles conflictos, que podrían aparecer cuando las fuentes quieren introducir datos en el «bus» de forma independiente, MIL-STD-1553 incorpora un controlador central del «bus».

8.9.3. ARINC 629

El desarrollo de ARINC 629 comenzó en 1977 con estudios por parte de Boeing de un sistema de Comunicación Digital con Acceso de Terminales Autónomas (Digital Autonomous Terminal Acces Communication, DATAC) para sustituir a ARINC 429. En 1985 se diseñaron los requisitos del sistema DATAC, y se obtuvieron resultados alentadores en el desarrollo de un prototipo de un avión de la NASA.

Como los objetivos del «bus» eran parecidos en muchos aspectos a los de MIL-STD-1553, hay muchas similitudes entre los dos sistemas. La diferencia principal entre los dos es que en ARINC 629 la función de control del «bus» se distribuye en vez de centralizarse.

8.9.4. Implicaciones del sistema

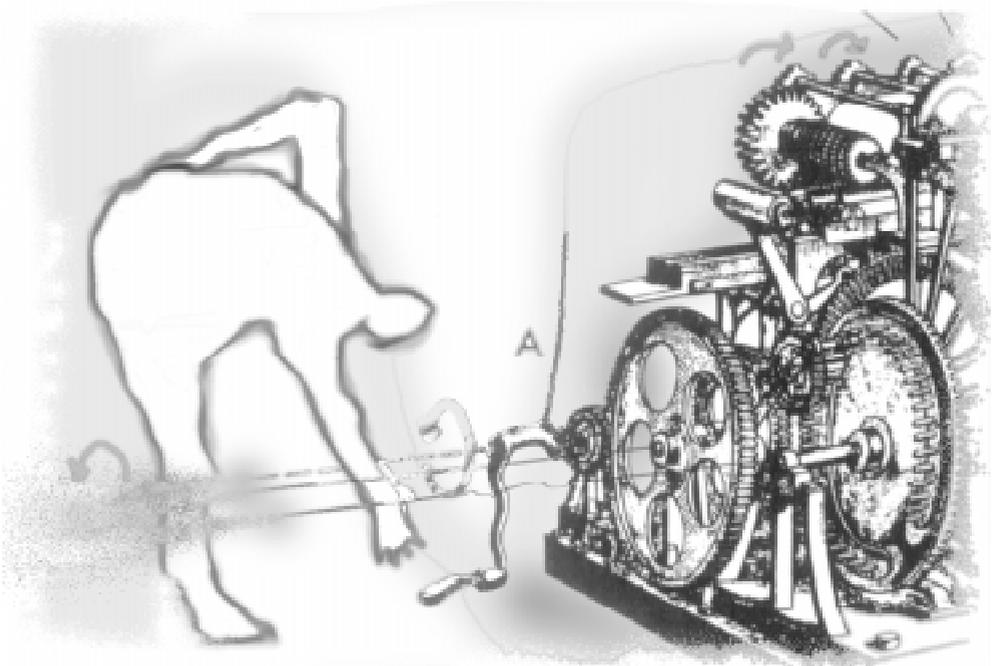
Una de las ventajas de un «bus» de datos es que puede actuar como un conducto que reúne los datos de mantenimiento de todo el avión en una instalación de mantenimiento centralizada. El encargado del mantenimiento se beneficia de tener un solo puerto de acceso a estos datos. Una consecuencia de esta capacidad para que un sistema informe de fallos de otro, por estar en el mismo «bus» de datos, es que la caja que informa del fallo puede estar ella misma en situación de fallar. Los encargados de mantenimiento necesitarán asegurarse de que no «matan al mensajero», y de que no condenan como averiadas unas LRU que están detectando correctamente los fallos de otras. En

este caso, la detección de un fallo es evidencia de la buena condición de una caja.

Contra estas ventajas está el hecho de que se necesita un «hardware» más complejo para acceder a un «bus» de datos, a fin de extraer información de mantenimiento; la época en que se encontraban todos los fallos con «una lente y un calibre» ha pasado a la historia para muchos sistemas modernos. Sin embargo, la adopción creciente de «buses» de datos asegura que los encargados de mantenimiento disponen de equipos de examen adecuados a precios razonables.

9

Planificación y organización del mantenimiento



Una organización de mantenimiento puede ser de diversos tipos, pero en todos ellos aparecen los tres componentes siguientes, necesarios e interrelacionados:

- 1) **Recursos:** comprende personal, repuestos y herramientas, con un tamaño, composición, localización y movimiento determinados.
- 2) **Administración:** una estructura jerárquica con autoridad y responsabilidad que decida qué trabajo se hará, y cuándo y cómo debe llevarse a cabo.
- 3) **Planificación del trabajo y sistema de control:** un mecanismo para planificar y programar el trabajo, y garantizar la recuperación de la información necesaria para que el esfuerzo de mantenimiento se dirija correctamente hacia el objetivo definido.

La totalidad del sistema de mantenimiento es un organismo en continua evolución, cuya organización necesitará una modificación continua como respuesta a unos requisitos cambiantes. Como el objetivo principal de la organización es hacer corresponder los recursos con la carga de trabajo, es preciso considerar estas características antes de detallar los tres componentes básicos citados anteriormente.

9.1. La carga de trabajo

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

9.1.1. *Trabajos no programados*

Para el conjunto del sistema, los trabajos no programados se presentan de una manera casi aleatoria; a menudo se encuentra que la distribución de los tiempos necesarios para realizar esos trabajos se aproxima mucho a la distribución lognormal. De no existir una vigilancia de la condición, no puede llevarse a cabo la programación hasta que se ha producido la petición de trabajo.

Parte de la demanda de trabajos de mantenimiento no programados se presenta sin previo aviso y exige una atención urgente. Es difícil planificar los trabajos de emergencia, y otros de alta prioridad y ausencia de aviso previo. Como mucho, sólo se puede prever el número medio de peticiones. Los trabajos individualizados exigen atención en el turno durante el que se presentan. A veces este tipo de trabajo se denomina trabajo no programado, a pesar de que su demanda debe programarse en términos de personal, repuestos y equipo. En este caso, la dificultad principal es la predicción del tiempo disponible para la programación y la planificación de ese trabajo.

9.1.2. *Trabajos programados*

Se pueden planificar con detalle y programarse con antelación, con las tolerancias de tiempo necesarias para el acoplamiento y la regularización del trabajo. Estos trabajos se clasifican según la facilidad con que pueden programarse:

- A) Trabajos de rutina: Trabajos de corta periodicidad realizados principalmente durante el funcionamiento del sistema.
- B) Trabajos menores, con el sistema parado: Reposiciones y otros trabajos poco importantes que incluyen trabajos de corta y media periodicidad a sistema parado. Se realizan a menudo en intervalos entre operaciones.
- C) Trabajos mayores, con el sistema parado: Revisiones generales y otros trabajos importantes a sistema parado, que incluyen trabajos de larga periodicidad, trabajos múltiples, trabajos que precisan diversas especialidades. En la mayoría de los casos es necesaria una parada programada.

En general, las dos primeras categorías pueden programarse de forma equilibrada a lo largo del año, planificando y programando la tercera de forma específica.

La diferencia principal entre trabajo programado y no programado es que el nivel y tipo del trabajo no programado se decide en el departamento de mantenimiento, en vez de generarse desde el sistema. Varios departamentos están implicados en el proceso de toma de decisiones y se necesitan diversas fuentes de información.

Como cada tipo de trabajo de mantenimiento tiene diferentes características, la naturaleza de la organización del mantenimiento dependerá mucho de las proporciones relativas de los trabajos no programados, programados y condicionales. Se necesita una experiencia operativa considerable si se quiere evaluar correctamente el nivel esperado de trabajo programado consecuente a una entrada de trabajo no programado. La relación entre trabajo no programado y programado siempre es confusa. Siempre hay un cierto retraso antes de que se atienda una petición no planificada lo que debe tenerse en cuenta en la organización de los recursos.

La variación con el tiempo de la carga de trabajo es claramente función del tipo de sistema. Si consta de elementos pequeños independientes, como una flota de autobuses, el trabajo se parece mucho al descrito anteriormente. Si consta de grandes cadenas de producción, poco numerosas y de operación continua, entonces el trabajo (excluyendo el trabajo de emergencia) se realiza durante tiempos largos a intervalos periódicos. Obviamente esto tiene una influencia considerable sobre la naturaleza de la organización del mantenimiento.

9.2. Análisis de los recursos de mantenimiento

Una adecuada planificación y organización de cualquier proceso de mantenimiento depende principalmente de la disponibilidad de los recursos de mantenimiento, siendo los más importantes:

A) Personal: Como recurso de mantenimiento, puede clasificarse según el área técnica en la que se emplee: mecánica, eléctrica, de instrumentos, de construcción. Una división más profunda puede hacerse según la especialidad: ajustador, soldador, electricista, etc. La mayor parte de los trabajos de mantenimiento suelen necesitar más de una especialidad, por lo que la clasificación anterior se hará de acuerdo con la especialidad dominante en cada trabajo.

La calidad del personal disponible dependerá principalmente del entorno en el que opera la compañía. Es consecuencia del sistema de formación, incluyendo la recalificación y la formación especializada, de las posibilidades de contratación, y de la influencia y actitud de las organizaciones sindicales.

B) Repuestos: El objetivo de la gestión de repuestos es alcanzar el equilibrio óptimo entre el coste de posesión (depreciación, intereses, rentas, etc.) y el coste de la «ruptura de stock» (indisponibilidad, etc.). La principal dificultad de esta acción, tan simplemente

expresada, surge de la variedad y complejidad de los miles de artículos distintos (de costes y tasa de utilización tan diversos) necesarios para llevar a cabo una operación determinada. En cierto sentido, cada repuesto presenta un problema individual de control. Para facilitar ese control así como la catalogación, identificación y almacenamiento, se pueden clasificar los repuestos según su tasa de uso y otras características asociadas.

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

9.2.1. Estructura de los recursos

El objetivo es hacer corresponder el tamaño, composición y localización de los recursos con la carga de trabajo esperada. Por tanto, es esencial tener una imagen tan completa como sea posible de esta última. Se debe incluir:

- a) La localización de la petición.
 - b) El cálculo de la petición esperada de mantenimiento no programado, su naturaleza y configuración en un período dado.
 - c) La estimación de la petición esperada de mantenimiento programado, su naturaleza y configuración en un período dado, y su clasificación.
 - d) La consideración de las especialidades necesarias, teniendo en cuenta que, en general, a mayor división del trabajo,
-

mayor especialidad se precisa. Por otro lado, muchos trabajos de mantenimiento exigen la participación de distintas especialidades y ello hace más difícil conseguir una utilización a fondo de la capacidad laboral.

Para un sistema existente, los pasos del análisis serán diferentes que para un sistema nuevo. Con el primero, el proceso consiste normalmente en identificar y definir la estructura existente y las cargas de trabajo, para modificar a continuación la estructura a fin de mejorar su eficacia. Con el segundo, el trabajo consiste en estimar la carga de trabajo esperada y a continuación desarrollar una estructura con que atenderla. En ambos casos, la solución puede exigir modificaciones al variar la carga de trabajo. Los sistemas de control de gestión deben vigilar los parámetros que determinan la necesidad de cambios en la estructura de recursos (por ejemplo, el tiempo de respuesta del mantenimiento de emergencia).

9.3. La administración del mantenimiento

La administración puede ser considerada como un sistema de toma de decisiones, cuyo objetivo es dirigir los recursos disponibles hacia la realización del objetivo de la organización. Los diversos trabajos realizados por cada individuo en la estructura jerárquica se componen de dos elementos: decisión y ejecución. Así, hay una división horizontal de la estructura jerárquica en las diversas funciones de trabajo (ejecución), esto es, mecánica, eléctrica, etc., y una división vertical en niveles de autoridad (decisión) para la realización de dichas funciones. Los niveles superiores se centran más en la decisión que en la ejecución, mientras que los niveles inferiores, de taller, pueden tener poderes mínimos de decisión. Lo más alto de la estructura jerárquica se dedicará a determinar el objetivo y la política de la compañía y se centrará principalmente en los asuntos no recurrentes de inversión de capital, muchos de los cuales, son en el caso mejor no cuantificables y en el peor, están fuera del control de la organización. En este nivel es donde

MANTENIMIENTO

se diseña y establece la estructura administrativa, un trabajo que necesita:

- a) que se determinen las áreas de trabajo y la responsabilidad (límites de toma de decisiones) de cada miembro de la estructura jerárquica,
- b) que se establezcan las relaciones, tanto verticales como horizontales, entre estas áreas,
- c) que se asegure que el objetivo de la compañía se interpreta y se comprende por cada miembro de la estructura jerárquica,
- d) que se establezcan sistemas eficaces de comunicación e información.

Según esto, los trabajos de mantenimiento programado ascienden por el sistema hasta el punto designado para la toma de decisiones y después retroceden al nivel de taller para su ejecución. Por otro lado, los trabajos no programados y de proyecto arrancan en algún lugar de la parte de arriba del sistema y se desplazan hacia abajo. En cada caso, y debido a la naturaleza interdisciplinaria del trabajo, se necesita una comunicación a través de las líneas de autoridad para transmitir las múltiples informaciones (técnicas, especializada, de planificación) necesarias para la eficaz planificación, asignación y ejecución de trabajos. Además, las líneas de autoridad se verán fuertemente influenciadas por la naturaleza del trabajo. Por ejemplo, cuando la información técnica es importante (por ejemplo, un sistema de una central de energía), la autoridad para la toma de decisiones de mantenimiento debe residir en ingenieros profesionales, permaneciendo ininterrumpidas las líneas de autoridad a través de ingenieros y personal de mantenimiento hasta el nivel de taller. Cuando los costes de mantenimiento son una parte importante del coste de producción, la función de mantenimiento debe estar directamente representada en los altos niveles de la admi-

nistración. Esto asegura que el mantenimiento sea adecuadamente contemplado junto con la producción al tomar decisiones operativas y, aún de más importancia, al considerar la adquisición de un sistema nuevo o que reemplace al existente.

9.4. Planificación del trabajo de mantenimiento

La función principal del servicio de planificación de trabajos es la planificación y programación, a medio y largo plazo, de la carga de trabajo de mantenimiento para los encargados de las áreas. Por tanto, el horizonte de planificación puede extenderse desde tan sólo 48 horas hasta un año, y abarcará todos los trabajos, aparte de los aplazados de alta prioridad y del mantenimiento de emergencia. El servicio es responsable de suministrar a los encargados de mantenimiento la carga de trabajo a medio plazo a realizar en el próximo período de producción, por ejemplo, de una semana, y que debe distribuirse cierto tiempo antes de la fecha de comienzo del período. En esta responsabilidad se incluyen la coordinación inicial del trabajo multidisciplinario, el suministro de información de mantenimiento, como planos o manuales, la comprobación de la disponibilidad de los repuestos más importantes y la comprobación de la disponibilidad de los sistemas críticos. El grado de detalle necesario depende de la naturaleza del trabajo. Una revisión general programada, a completar en un tiempo límite y que precise tanto de trabajo interno como contratado, puede necesitar una planificación con escala de tiempos detallada (por ejemplo, turno a turno) y puede necesitar de la aplicación del Análisis de Camino Crítico.

La planificación detallada y la asignación de trabajos son las funciones de planificación más importantes de la supervisión de primer escalón, a la que debe dejarse actuar en el sitio de trabajo. Esto es particularmente importante en el caso de la supervisión de área porque el trabajo de emergencia se les presenta directamente a ellos; su aparición puede alterar prioridades establecidas y, por consiguiente, la programación a medio plazo.

Es necesario recalcar que los términos «programar» (scheduling) y «ordenar» (sequencing) pueden prestarse a confusiones. Sin embargo, corresponden a definiciones muy distintas. Así,

- Programar se refiere a la determinación de los tiempos de llegadas o salidas de los elementos que necesitan mantenimiento. Por ejemplo, el plan de mantenimiento es una programación de los tiempos en que deben llevarse a cabo tareas específicas de mantenimiento.
- Ordenar se refiere a la determinación del orden en que deben realizarse las tareas de mantenimiento necesarias. Por ejemplo, un elemento averiado, a su llegada a una instalación de mantenimiento, puede tener que esperar en una cola antes de que se realice la tarea de mantenimiento necesaria. A continuación, según las prioridades ligadas con los diversos elementos en la cola, se determina la secuencia en que se recuperan o reparan.

EJEMPLO 12. Se presenta un informe sobre la evolución del Maintenance Steering Group, MSG, como ejemplo de un esquema de mantenimiento estructurado y organizado implantado con éxito dentro de la aviación comercial. MSG se introdujo en 1968 para desarrollar los requisitos de mantenimiento programado del Boeing 747. Le siguió MSG-2 en 1970 que se usó para la realización de tareas similares relacionadas con el Lockheed L1011 y el McDonald Douglas DC-10. En 1972, la Asociación de Compañías Aéreas Europeas desarrolló SEMSG como una mejora de MSG-2 con el objetivo de desarrollar programas para el Airbus A300 y el Concorde. Finalmente, un equipo conjunto colaboró en el desarrollo de MSG-3, que se usó en la industria de EE.UU. para los programas de mantenimiento de los aviones Boeing 757 y 767. Es la versión utilizada actualmente.

El método MSG ofrece un conjunto de reglas lógicas a seguir para la decisión de la política de mantenimiento de un avión y de sus

sistemas. Estas reglas se basan en la importancia del componente o sistema, la naturaleza de los fallos anticipados que pueden ocurrir dentro de ellos, la visibilidad de tales fallos, y las posibles tareas correctivas. No es posible disponer anticipadamente de un conjunto de reglas para cada uno de los requisitos, porque algunas decisiones en el proceso requieren un juicio de ingeniería por parte de personal experimentado. En los iniciales MSG-1 y MSG-2 había un margen considerable para la interpretación de las reglas, que podía conducir a diferentes resultados, dependiendo de la experiencia aportada. Uno de los objetivos del MSG-3 fue precisar las definiciones usadas por los ingenieros de las compañías aéreas y por los fabricantes, a fin de no dejar posibilidad de ambigüedades en discusiones posteriores. El trabajo inicial de implantar el proceso MSG se divide en varios grupos tales como estructuras, sistemas, motores, aviónica, hidráulica de vuelo, e inspecciones zonales. Los grupos de trabajo, formados por representantes de los usuarios, fabricantes y autoridades están supervisados por el comité de dirección.

Uno de los logros más notables de MSG es la creación de la metodología de Mantenimiento Centrada en la Fiabilidad (Reliability Centered Maintenance), conocida como RCM, que reduce drásticamente la demanda de ejecución de tareas de mantenimiento preventivo para la mayoría de los elementos de un sistema. Una información más amplia sobre el RCM se puede obtener de la monografía sobre Mantenibilidad de esta serie.

9.5. Mantenimiento en la propia empresa y mantenimiento en el exterior

Una de las principales preocupaciones del proceso de gestión de mantenimiento es determinar las tareas de mantenimiento que deben realizarse en la propia empresa y aquellas que deben ser contratadas. El problema es la selección de la composición de las tareas de mantenimiento realizadas en cada sitio.

Un aumento de los recursos de mantenimiento propios exige un aumento del coste de capital. Sin embargo, el aumento de las capacidades propias de mantenimiento reduce la necesidad de contratar fuera. En este caso, se precisa un equilibrio entre el coste asociado al uso de recursos propios y el coste asociado al uso de recursos exteriores. Se presenta un problema de costes difícil, ya que no sólo debe considerarse el coste requerido por los recursos exteriores, sino también el coste asociado con la pérdida de control de los trabajos de mantenimiento. Por ejemplo, usando recursos exteriores existe la posibilidad de que se produzca un mayor tiempo de inmovilización y, por consiguiente, un coste asociado de pérdida de ingresos.

La selección de la alternativa más favorable a realizar en un momento determinado, depende de:

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

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

EJEMPLO 13. El Boeing 747 es, sin duda, el avión de gran capacidad de mayor éxito. En la Tabla 24 se muestra la distribución de todos los modelos o variaciones de este avión junto con el número total producido para cada uno de ellos y su estado actual.

Los análisis de mercado realizados por el Journal AM (Aircraft Maintenance Internacional) en su número de junio de 1995 mostraban la proporción de capacidad propia de mantenimiento entre las diez mayores compañías que explotan el B747. La Tabla 25 se presentan los resultados de la investigación para las 5 mayores compañías.

Planificación y organización del mantenimiento

MODELO	TOTAL	PROPIOS	ALQUILADOS
B747SP	37	21	16
B747SR	14	14	0
B747-100/100F/100B/EUD/SCD	133	91	42
B747-200B/EUD/SF/Combi/C/F	358	213	145
B747-300/Combi/SR	77	50	27
B747-400/Combi/F	326	211	115
Total	945	600	345

Tabla 24 - DIMENSIÓN DE LA FLOTA EXISTENTE DE BOEING 747 -

COMPAÑÍA	MODELOS	CANTIDAD	% CAPACIDAD PROPIA
Japan Airlines	-100	6	100
	-200	31	100
	-300	13	100
	-400	31	100
British Airways	-100	15	gt90
	-200	16	gt90
	-400	32	100
United Airlines	SP	10	100
	-100	18	100
	-200	9	80
Singapore Airlines	-400	24	100
	-200	6	97
	-300	12	97
Air France	-400	32	97
	-100	6	100
	-200	21	100
	-300	4	100
	-400	13	100

Tabla 25 - CAPACIDAD PROPIA DE MANTENIMIENTO PARA LOS 5 MAYORES USUARIOS DE B747 -

Hay que observar que en el mundo, a principios de 1996, había 66 empresas capaces de efectuar la revisión general de estructura del B747. A continuación se indica su distribución por continentes (Tabla 26).

9.6. Clasificación de los niveles de mantenimiento

Los tres niveles de mantenimiento que se admiten con más frecuencia, considerando el emplazamiento geográfico o el tipo de instalaciones, son:

1. Nivel de mantenimiento organizativo, o de primer escalón: incluye todas las tareas de mantenimiento que se realizan en el lugar de operación (avión, barco, vehículo, fábrica, hogar, etc.). Generalmente incluye trabajos realizados por la organización usuaria con sus propios equipos. El personal de primer escalón está normalmente relacionado

CONTINENTE	NÚMERO DE COMPAÑÍAS
Norteamérica	22
Sudamérica	4
Asia	20
África	3
Europa	14
Australia	3

Tabla 26 - NÚMERO DE COMPAÑÍAS CAPACES DE EFECTUAR REVISIÓN GENERAL DE ESTRUCTURA DEL B747 -

con el manejo y uso del equipo, y no dispone apenas de tiempo para el mantenimiento detallado del sistema. El mantenimiento en este nivel se limita normalmente a comprobaciones periódicas de las prestaciones del equipo, inspecciones visuales, limpieza de los equipos, pequeñas operaciones de servicio, ajustes externos, y el desmontaje y sustitución de algunos componentes. El personal asignado a este nivel generalmente no repara los componentes desmontados, sino que los envían al siguiente escalón. Desde el punto de vista del mantenimiento, esta función se asigna al personal menos cualificado.

2. Nivel de mantenimiento intermedio, o de segundo escalón: los trabajos se realizan mediante organizaciones e instalaciones especializadas móviles, semimóviles y/o fijas. En este nivel, los componentes pueden repararse desmontando y sustituyendo los módulos, subconjuntos o piezas más importantes. También puede efectuarse el mantenimiento programado que precise el despiece de equipos. Normalmente el personal de mantenimiento disponible está más cualificado y mejor equipado que el del nivel anterior y su responsabilidad se centra en un mantenimiento más minucioso. A menudo se asignan unidades móviles o semimóviles para suministrar un mayor apoyo a los equipos operativos dispersos. Estas unidades pueden disponerse en furgonetas, camiones o casetas portátiles que incluyan ciertos equipos de examen y apoyo, así como repuestos. La misión es asegurar el mantenimiento en el lugar de operación (aparte del realizado por el personal del primer escalón) para facilitar de forma rápida la devolución del sistema a su estado de total operatividad. Se puede emplear una unidad móvil para apoyar a más de un lugar de operación. Un buen ejemplo es el vehículo de mantenimiento que se despliega desde el hangar del aeropuerto hasta un avión aparcado en la puerta del terminal de una compañía aérea comercial, y que precisa un mantenimiento de cierta profundidad.

Generalmente se disponen instalaciones fijas (talleres permanentes) para apoyar tanto a los trabajos del primer escalón como a las unidades móviles o semimóviles. Se llevan a cabo los trabajos de mante-

nimiento que no pueden realizar los niveles inferiores, debido a las capacidades limitadas del personal y del equipo de prueba. Al disponer de personal más cualificado, más equipos de prueba y apoyo, más repuestos y mejores instalaciones se puede llegar a la reparación de equipos a nivel de módulo y de pieza. Los talleres fijos se sitúan normalmente en áreas geográficas determinadas.

3. Nivel de mantenimiento del almacén, depósito o de tercer escalón: constituye el tipo más alto de mantenimiento⁵, y realiza las tareas de mantenimiento cuya complejidad se encuentra más allá de la capacidad del segundo escalón. Físicamente, el almacén o depósito puede ser una instalación de reparaciones especializada que apoya ciertos sistemas o equipos del inventario o tratarse de las instalaciones del fabricante⁶. Las instalaciones son fijas y no se busca la movilidad. Si es preciso, incluirán equipos complejos y voluminosos, grandes cantidades de repuestos, provisiones para control del entorno, etc. El gran potencial de estas instalaciones fomenta el empleo de técnicas de cadena de montaje, lo que a su vez, permite el uso de un personal relativamente poco cualificado para gran parte de la carga de trabajo, concentrando los especialistas de alta cualificación en áreas claves, tales como diagnóstico de fallos y control de calidad.

El nivel de mantenimiento de almacén incluye el despiece y reconstrucción consiguiente a una revisión general y la calibración completa de los equipos, así como la realización de tareas de mantenimiento de alta complejidad. Además, proporciona una capacidad de abastecimiento de los artículos en inventario. Generalmente sus instalaciones están situadas en lugares estratégicos para apoyar las necesidades de áreas geográficas específicas o cadenas de producción determinadas.

(5) N. del T. Se sobrentiende dentro de la organización. Como se ve más adelante pueden existir escalones más altos fuera de la organización.

(6) N. del T. Si la propia organización dispone de un tercer escalón, las instalaciones de la industria pasarían a designarse como cuarto escalón.

9.7. Estudio de un caso práctico: el concepto de mantenimiento en la RAF

Los niveles de mantenimiento del avión en las organizaciones militares difieren de los de operación civil. El concepto de mantenimiento de la Royal Air Force se describe con una terminología normalizada definida en las publicaciones aéreas 100A-01. La asignación del trabajo podría ser como sigue:

- **Primer escalón:** es la organización de mantenimiento directamente responsable del mantenimiento y preparación para el uso del sistema o equipo como un todo. Normalmente aborda tareas como pruebas funcionales, reabastecimiento, cambio de configuración, modificaciones menores, diagnóstico de fallos y reparaciones menores. En la RAF la organización típica de primer escalón es el escuadrón de vuelo.
 - **Segundo escalón:** es la organización de mantenimiento responsable de suministrar apoyo de mantenimiento a las organizaciones de primer escalón especificadas. Se incluye el mantenimiento programado del avión y el mantenimiento en taller de conjuntos. Esta función la desempeña en la RAF el ala de ingeniería y abastecimiento de una base aérea en la que pueden operar varios escuadrones de vuelo.
 - **Tercer escalón:** es la organización de mantenimiento dentro del servicio, excluyendo las organizaciones incluidas en primero y segundo escalón. Las tareas típicas realizadas en este nivel son las reparaciones, revisiones parciales y modificaciones que requieren cualificaciones y equipos especiales, así como medios de uso relativamente infrecuente que no resulta económico distribuir en todos los niveles. No alcanza la capacidad para realizar el total despiece, revisión y reensamble.
-

- Cuarto escalón: es la organización industrial de mantenimiento que suministra por contrata el apoyo de mantenimiento superior al segundo escalón.

9.7.1. Un tercer escalón de mantenimiento de la RAF

St Athan es una importante unidad de mantenimiento de tercer escalón de la RAF, encargada de las reparaciones y revisiones generales de estructura, motor y mecánica de los aviones de la RAF. Está situada en el valle de Glamorgan, unas millas al oeste de Cardiff, en el Reino Unido. El establecimiento fue construido en 1936 sobre una extensión de 400 hectáreas, disponiendo actualmente de una sola pista de vuelo en servicio. Consta de dieciséis grandes hangares, un área de talleres bien equipados y una gran zona residencial. El personal incluye unos 3.000 militares, alrededor de 1.500 civiles y equipos de la industria en algunas labores de modificaciones. La gestión y ejecución del proceso de mantenimiento en St Athan se organiza mediante escuadrones especializados. En este estudio se analizarán algunos de ellos desde el punto de vista del contenido y alcance de la tarea de mantenimiento realizada. Además de la función de mantenimiento primaria, están ubicadas varias unidades, entre las que destaca la Escuela de Formación Técnica. La escuela incluye una Escuela Civil de Formación Técnica, donde se preparan mecánicos de aviación civiles como parte del plan de aprendizaje del Ministerio de Defensa del Reino Unido, con vistas a la contratación en St Athan.

Las 5 áreas funcionales más importantes de St. Athan son:

1) El Escuadrón de Operaciones, que consta de tripulaciones, control de tráfico aéreo, la unidad de control de aves y una sección contra incendios. Se realizan pruebas en vuelo de aviones Jaguar, Harrier, Sea Harrier, Hawk y Tornado.

2) El Ala de Planes, Programas y Presupuestos, que es, dentro de la Agencia de Defensa para Mantenimiento, el centro piloto

para la introducción de un sistema comercial conocido como FAMAS (Financial and Management Accounting System, Sistema de Contabilidad Financiera y de Gestión), que permite al establecimiento repartir adecuadamente sus costes y gastos generales, y obtener una mejor idea de sus verdaderos costes de producción. Esto permite a la agencia tratar los trabajos de mantenimiento de la misma manera que en la industria. En el año financiero 1993/94 la inversión presupuestaria total fue superior a los doscientos millones de libras esterlinas.

3) El Ala de Gestión de Personal Civil, que desarrolla la gestión de personal y la función de contratación para los 1.500 civiles integrados con el personal militar.

4) El Ala de Administración OC, dirige una amplia organización administrativa de tipo convencional, que apoya al resto del establecimiento.

5) La División de Ingeniería, que dispone de personal militar y civil totalmente integrado. Las funciones principales están centralizadas, incluyendo garantía de calidad, higiene y seguridad del trabajo, y protección ambiental. Por lo que se refiere a la garantía de calidad, el establecimiento pasó durante 1992 una evaluación externa bajo las normas ISO 9001, lo que la convierte en el primer establecimiento de la RAF en satisfacer esta norma.

En tiempo de paz, los papeles fundamentales desarrollados a través de estas actividades son:

- a) Adquisición experta, que suministra los conocimientos precisos para evaluar las ofertas de los contratistas sobre prestaciones, calidad y precio.
 - b) Capacidad de innovación, respecto al desarrollo de formas nuevas y más baratas de reparar el equipo.
-

- c) Reducción del riesgo, con relación a los posibles fallos de los proveedores industriales, que en situaciones extremas pueden dejar en tierra a una flota de aviones.
- d) Respuesta rápida en paz y guerra, lo que significa prácticamente que la rápida reacción del establecimiento debe satisfacer requisitos urgentes o prevenir la inmovilización de los aviones, particularmente para elementos que exijan unas técnicas especiales o unas dimensiones inusuales.

Debe observarse que la actitud en tiempo de paz es la preparación ideal para situaciones de crisis o de guerra, en que se hace necesaria la capacidad de lanzar aviones a primera línea desde los programas de mantenimiento y de almacenamiento, mientras se incorporan también ciertas modificaciones.

El Ala de Ingeniería de Apoyo y Abastecimiento se encarga de las funciones tradicionales de abastecimiento, administra y controla los «stocks» principales, recibe y entrega los equipos, lleva al día la información para la contabilidad pública, y apoya las propias necesidades del establecimiento. Además, mantiene y apoya equipos de apoyo en tierra, de comunicaciones y de ayudas de aproximación.

El Ala de Ingeniería Aeronáutica es la mayor de la División de Ingeniería. Aparte del puesto de mando, que coordina las actividades de vuelo e ingeniería, hay cinco escuadrones de producción:

- 1) El Escuadrón nº 1 dedicado a trabajos mayores de mantenimiento mayor del VC10.
 - 2) El Escuadrón nº 2 es responsable del programa de modificaciones del Tornado.
 - 3) El Escuadrón nº 3 es responsable del mantenimiento del Harrier y del Sea Harrier.
-

- 4) El Escuadrón nº 4 lleva a cabo los programas de modificaciones y revisiones del Hawk y del Jaguar.
- 5) El Escuadrón nº 5 es responsable de los programas de tercer escalón del Tornado GR1.

El Ala de Apoyo de Ingeniería Aeronáutica, AESW (Aircraft Engineering Support Wing), tiene cinco escuadrones. A continuación se exponen las principales tareas de cada uno de ellos:

- El Escuadrón nº 5 es el taller de producción que realiza trabajos complejos que requieren una amplia gama de maquinaria para fabricar componentes del avión y otros elementos. En tiempo de paz, los componentes que no pueden obtenerse de los proveedores comerciales usuales se fabrican allí, si el tiempo de entrega o el coste son inaceptables.
 - El Escuadrón de Talleres de Apoyo contiene varios talleres de segundo escalón que apoyan los trabajos de ingeniería del establecimiento. Se incluyen los de hidráulica/ruedas/neumáticos, aviónica y armamento, así como los de componentes de avión y todas las actividades de pintura de aviones. Las nuevas instalaciones de chorro rápido están entre las mejores de Europa.
 - La Autoridad de Diseño de Reparaciones de la RAF obtiene de las autoridades de diseño, la información para las reparaciones de todos los tipos de aviones en servicio. El establecimiento ha desarrollado su propia capacidad para diseñar y aprobar por sí mismo los proyectos de reparación de los aviones, encontrándose ahora reconocido de acuerdo con la normativa de defensa 05/123 del MOD. Esto se traduce en un importante beneficio para el servicio, con considerables ahorros tanto en coste como en tiempo.
-

- El Escuadrón de Apoyo a las Reparaciones emplea la mayor parte de su tiempo efectuando reparaciones de categoría 3 para todo tipo de aviones de ala fija de la Armada Real (Royal Navy, RN), y de la RAF en bases por todo el mundo, donde no resultaría beneficioso desde el punto de vista de coste/eficacia mantener el equipo necesario y la aptitud de la mano de obra para este nivel de trabajos.
- El Escuadrón de Almacenamiento y de Transporte tiene una doble función. Primero, en el establecimiento se almacenan muchos tipos de aviones diferentes, incluyendo un gran número de Tornado GR1. Segundo, el Escuadrón es responsable del transporte de todo el avión y de los componentes mayores, así como de proporcionar una respuesta inmediata por todo el mundo a los accidentes de los aviones de ala fija de la RAF y la RN.

El Ala de Mecánica y Revisiones Generales tiene cuatro escuadrones:

- 1) El puesto de mando, entre cuyas funciones está el suministrar el enlace con el cliente y capacidad para el desarrollo de tareas.
 - 2) El Escuadrón nº 7 suministra apoyo de tercer escalón a la totalidad de los componentes estructurales de los aviones de la RAF, tanto metálicos como de materiales compuestos, a los depósitos flexibles de combustible y a los materiales transparentes.
 - 3) El Escuadrón nº 8 tiene la tarea de reparar y reacondicionar los módulos de motor del Jaguar, Hawk y Tornado. Los trabajos del año financiero 1995 superaron los 1.200 módulos, representando un reparto de trabajo al 50% con Rolls-Royce. El compresor RB199HB representa un ejemplo típico del
-

trabajo realizado. Las bandas abrasibles montadas en los cárteres, que deben asegurar la estanqueidad en las puntas de los álabes del rotor, se retiran cuando están desgastadas mediante un proceso de limpieza enérgico, reponiéndolas mediante una pulverización metálica. Después de rectificar los álabes del rotor para restablecer los perfiles de las puntas, se mecaniza la banda abrasible hasta la dimensión precisa. Este tipo de proceso, junto con un ajuste de precisión, permite maximizar la duración de los álabes sin pérdida en las prestaciones del motor. Se han conseguido ahorros crecientes mediante la reevaluación de las normas de reparación, la obtención de licencias de los fabricantes y el desarrollo de las propias reparaciones. De esta manera, cada año se recuperan elementos que previamente se habían clasificado como desechables con un valor de varios millones de libras.

- 4) El Escuadrón nº 9 lleva a cabo la reparación y reacondicionamiento de componentes mecánicos, compartiendo el trabajo con la industria. La mayoría del trabajo se realiza sobre componentes complejos que necesitan costosas instalaciones de prueba. Aunque la inversión de capital es alta, los beneficios obtenidos de un menor tiempo de retorno y de una reducción de las existencias en «stock», son cada día más evidentes. Con una perspectiva más amplia, la naturaleza del trabajo ha cambiado en los últimos cinco años desde la realización de revisiones preventivas para casi todo el material, hasta la reparación posterior al fallo del noventa por ciento de las piezas, produciendo ahorros sustanciales en los costes de la mano de obra.

9.7.2. Política de reparación: vida fijada o según la condición

La autoridad de apoyo logístico es responsable del establecimiento de la política global de mantenimiento del avión, del armamento

o de los componentes. La mayoría de los fallos se producen de una forma aleatoria que no está en relación directa con el tiempo en servicio del componente considerado. Tales fallos sólo pueden atacarse sustituyendo los componentes a medida que se vuelven inservibles. Para algunos componentes, la probabilidad de fallo aumenta significativamente con el tiempo o el uso. En los sistemas aeronáuticos, los componentes se clasifican como funcionalmente significativos o no significativos. Si «las consecuencias de su fallo afectarían a la seguridad del avión, a su capacidad operativa o a la economía de su operación» el elemento se considera como funcionalmente significativo. La consecuencia es que tal componente puede exigir su sustitución o el desmontaje para su mantenimiento según pautas predeterminadas. Esto conduce a la adopción por parte de la RAF de una política basada en la vida para:

- a) componentes para los que las consideraciones de seguridad exigen que deben eliminarse los fallos en servicio o por lo menos minimizar su presentación, y
- b) componentes para los que una oportuna sustitución o desmontaje para mantenimiento aumentaría significativamente la disponibilidad del sistema y/o disminuiría el coste de mantenimiento.

La política basada en la vida es costosa, por lo que las autoridades de apoyo logístico sólo seleccionan aquellos componentes que tienen un modo de fallo que satisfaga todos los criterios siguientes:

- a) Se sabe o se tiene mucha certeza de que habrá un aumento notable en la probabilidad de fallo, una vez que el componente ha estado en servicio durante algún tiempo.
 - b) Los fallos incipientes no pueden detectarse mediante la vigilancia de la condición.
-

- c) El componente es funcionalmente significativo porque, o bien el modo de fallo tiene implicaciones operativas o de seguridad, o bien se justifica esta política debido a que la sustitución en un intervalo predeterminado ofrecería una mejora significativa en la disponibilidad del sistema o una disminución de los costes totales de mantenimiento.

La política basada en la vida es una opción muy cara, debido a que exige tareas de mantenimiento de componentes que pueden estar completamente funcionables y al propio coste de las actividades necesarias para vigilar y controlar los elementos en cuestión. Por consiguiente la autoridad de apoyo logístico revisa, en los momentos adecuados, la política de mantenimiento para este tipo de elementos. Para obtener una información completa del estado de un componente, puede recurrir a las instalaciones correspondientes de tercer escalón de la RAF o a la autoridad de diseño o al fabricante para que lleven a cabo un programa de muestreo a fin de determinar ciertos parámetros, como el tiempo medio entre fallos (MTBF), los modos de fallo, las tendencias de producción de fallo y el historial de mantenimiento del componente. Como ejemplo de un componente cuya política de mantenimiento se cambió como resultado de tal revisión, está el caso del actuador de un alerón de cola. Tenía asignada una vida de 900 horas hasta la revisión general y una duración total de 4.000 horas. Siguiendo un programa de muestreo la autoridad de apoyo logístico decidió cambiar la política de mantenimiento a una de «según la condición», pero todavía se mantuvo la duración total de 4.000 horas. Hasta ahora, el componente se ha utilizado de acuerdo con esta política durante ocho años sin experimentar fallos catastróficos del actuador.

9.7.3. Decisiones de reparación

Una vez que la autoridad de apoyo logístico decide para un cierto componente una política de mantenimiento del tipo primer escalón-segundo escalón-desechar o primer escalón-segundo escalón-reparar,

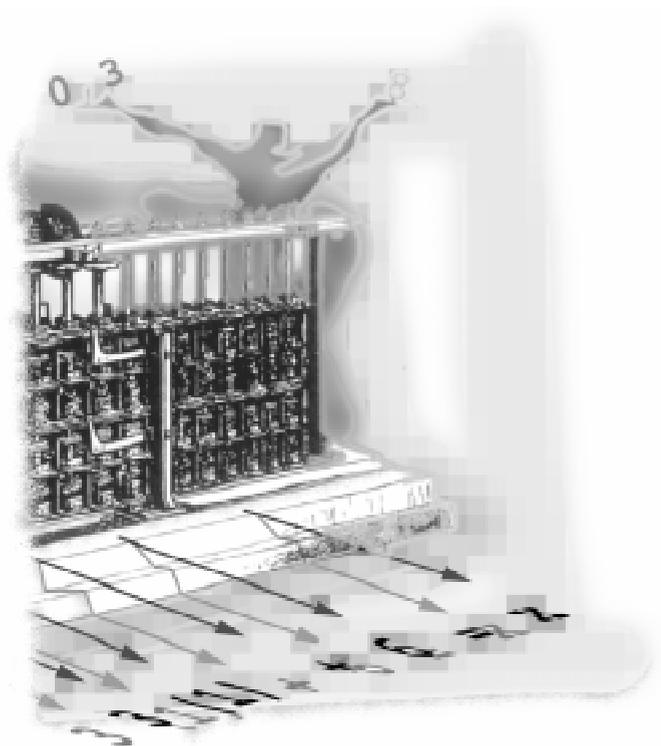
la siguiente decisión es si enviar el componente al 4º escalón para su reparación, o retenerlo en la organización de la RAF y enviarlo al establecimiento de 3º escalón, en St Athan, o en Sealand si se trata de aviónica y otros sistemas electrónicos, o repartir la tarea entre el 3º y 4º escalón. Durante este análisis se lleva a cabo una estimación detallada para ver qué repercusión en el coste tiene el desarrollo de la instalación de reparación o revisión general en la RAF. La evaluación de costes cubre áreas tales como equipo de prueba, equipo de procesos especiales, herramientas de especialista, mano de obra y material. Una parte importante del procedimiento de evaluación es la identificación de cualquier proceso especial para el que se obtendría un mejor valor de coste/eficacia si la instalación de 3º escalón realizara la reparación o revisión general que si se subcontratara ese elemento al 4º escalón.

9.7.4. Seguimiento de artículos

Se hace el seguimiento global de todos los artículos en el sistema informático de abastecimiento de la RAF (USAS). Esto permite a la autoridad de apoyo logístico y a las unidades usuarias conocer la localización y estado de utilidad de cada artículo: útil o reparable. En caso de que un componente se considere inútil, se registra en el USAS por la unidad usuaria, como una existencia reparable (R3/R4), significando que el elemento es reparable en 3º o 4º escalón. Si la decisión es mandarlo al 3º escalón, a la recepción en St. Athan, por ejemplo, el elemento se carga como artículo reparable - R3, registrándolo con su número de serie o su número de «stock» OTAN. Al recibirse el componente en uno de los escuadrones, se le asigna un número de trabajo específico dentro del propio sistema IT del establecimiento y se carga al escuadrón; al mismo tiempo, el ordenador del USAS se actualiza con el número de trabajo asignado, manteniendo así una visibilidad global. Durante su ciclo de reparación dentro del escuadrón, el componente está continuamente controlado y se conoce su estado de reparación. Además, el sistema IT identifica también si el

componente está en espera de repuestos, o pendiente de alguna investigación de naturaleza técnica. De esta manera, se mantiene la visibilidad constante del emplazamiento de los componentes y se identifican los repuestos necesarios. Al terminar la reparación, el elemento útil se descarga del escuadrón y se devuelve al ordenador del USAS como artículo útil, conservando siempre la visibilidad global.

Referencias



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

[2] Knezevic, J., Reliability and Maintenance: Fundamentals, Lecture Notes, School of Engineering, University of Exeter (Inglaterra), 1990.

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

[4] Mobley, R. K., The Horizons of Maintenance Management, Maintenance Handbook, 5ª edición, McGraw-Hill, Nueva York (EE.UU.), 1994.

[5] Jardine, A.K.S., Maintenance, Replacement, and Reliability, A Halsted Press Book, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1973.

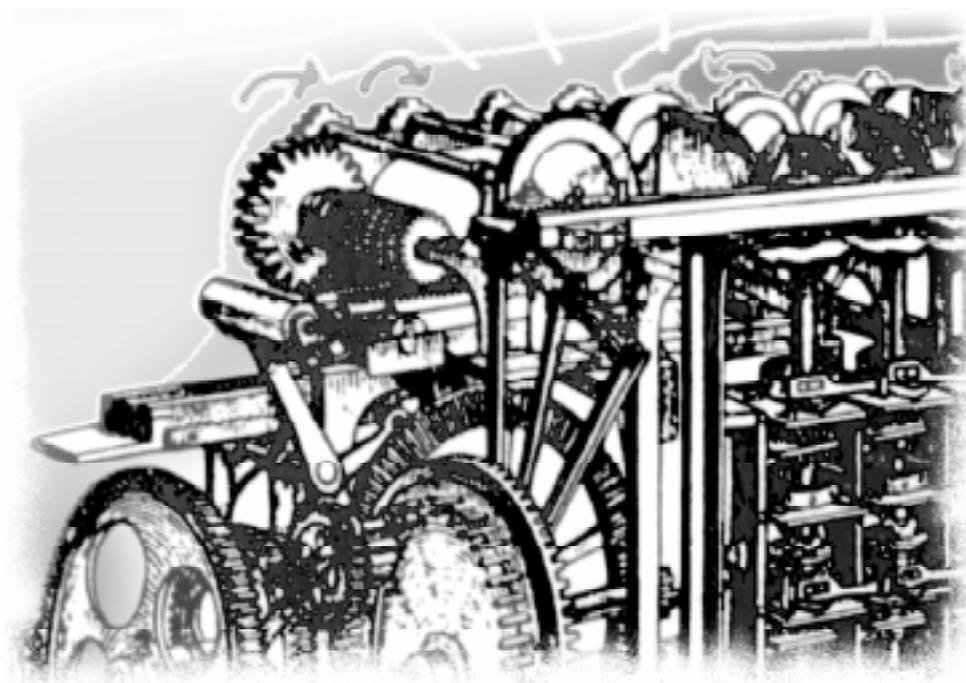
[6] Knezevic, J., Condition Parameter Based Approach to Calculation of Reliability Characteristics, Reliability Engineering, Vol. 19, Nº 1, Elsevier Applied Science, 1987.

[7] Kelly, A. & Harris M. J., Management of Industrial Maintenance, Butterworths Co., Inglaterra, 1978.

[8] Bisson, F., Managing the Production Process, Total Productive Maintenance Conference, MCE, Bruselas (Bélgica), abril 1992.

[9] Knezevic, J., Required Reliability Level as the Optimisation Criterion, Maintenance Management International, Elsevier, Vol. 6, Nº 4, págs. 249-256, 1987.

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.
- American Society of Metals:** - *Metals Handbook*, Non-Destructive Inspection and Quality Control, Vol. 11, 8ª edición, 1976.
- *Metals Handbook*, Failure Analysis and Prevention, Vol. 11, 9ª edición, 1986.
- Amster, S. J. & J. H. Hooper:** *Statistical Methods for Reliability Improvement*, AT & T Technical Journal, Vol. 66, Nº 2, 1986.
- Anderson, R. T. & L. Neri:** *Reliability-Centred Maintenance: Management and Engineering Methods*, Elsevier Science Publishers Ltd., Londres (Inglaterra), 1990.
- Archard, J. F.:** *Contact and Rubbling of Flat Surface*, Applied Physics, Vol. 24, págs. 981-988, 1953.
- Barlow, R. E. & F. Proschan:** *Statistical Theory of Reliability and Life Testing*, Holt, Rhinehart & Winston, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1975.
- Ben-Bassat, M. & M. Sella:** *Major Evaluation Criteria for Real Life Maintenance Expert System: The AITEST Experience*, Maintenance, Vol. 8, Nº 4, págs. 14-17, 1993.
- Blanchard, B. S., D. Verma & E. L. Peterson:** *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management*, John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.), 1995.
- Bland, R. J. & J. Knezevic:** *A practical application of a new method condition-based maintenance*, Journal, Maintenance Management International, Elsevier, Vol. 7, Nº 1, págs. 31-37, 1987.
- Bogdanoff, J. L. & F. Kozin:** - *A New Cumulative Damage Model-Part 4*, Trans. of the ASME, Vol. 47, págs. 40-44, 1980.
- *Probabilistic Models of Cumulative Damage*, John Wiley & Sons, 1985.
- Bowles, J. B. & C. E. Peláez:** *Application of Fuzzy Logic to Reliability Engineering*, Proc. of the IEEE, Vol. 83, Nº 3, págs. 435-449, 1995.
- Collacott, R. A.:** *Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring*, Chapman and Hall Ltd., 1977.
- Collins, J. A.:** - *Failure of Materials in Mechanical Design*, 2ª edición, John Wiley & Sons, Nueva York (EE.UU.), 1993.
- *Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.

-
- Cunningham, C. E. & W. Cox:** *Applied Maintainability Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1972.
- Davies, A.:** *Management Guide to Condition Monitoring in Manufacture*, edit, The Institution of Production Engineers, 1990.
- Dekker, P.:** *Applications of Maintenance Optimisation Models: A Review and Analysis*, Report 9228/A, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- El-Haram, M. & J. Knezevic:** - *The New Developments in Condition Based Approach to Reliability*, Proc. 10th International Logistics Congress, Exeter, U.K., 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.
- Engel, P. A.:** *Failure Models for Mechanical Wear Modes & Mechanisms*, IEEE, Transactions on Reliability, Vol. 42, N° 2, págs. 262-268, 1993.
- Geraerds, M. W. J.:** *Trends in Maintenance Strategies and Organization*, Maintenance philosophies-state of the art, 4th EFNMS Congress, Londres (Inglaterra), 1978.
- Gits, C. W.:** *On the Maintenance Concept for a Technical System: II. Literature Review*, Maintenance Management International, Vol. 6, págs. 181-196, 1986.
- Graham-Jones, P. L. & B. G. Mellor:** *Expert and Knowledge-Based Systems in Failure Analysis*, Engineering Failure Analysis, Vol. 2, N° 2, págs. 137-149, 1995.
- Grossman, G.:** *TPM at Renault*, Total Productive Maintenance Conference, MCE, Bruselas (Bélgica), abril 1992.
- Gujarati, D. N.:** *Basic Econometrics*, McGraw-Hill Book Co., 1988.
- Henshall, L. & J. Knezevic:** *Estimation of the Design Life for Notched Components Subjected to Creep Cracking Using a Condition Parameter Based Reliability Approach*, Proc. of the Conference «Materials and Engineering Design», Londres (Inglaterra), 9-13 mayo 1988.
- Hull, J. B. & V. B. John:** *Non-Destructive Testing*, Macmillan Education Ltd., Londres (Inglaterra), 1988.
- International Atomic Energy Agency:** IAEA Training Courses Series, Handbook on Safety Related Maintenance (draft), IAEA, Viena (Austria), 1993.
- Kelly, A.:** *Maintenance Planning and Control*, Butterworths Co., Inglaterra, 1984.
- Knezevic, J.:** - *Investigation of a Strategy for Control of Maintenance Processes in Engineering Systems Providing Required Reliability*, Ph.D. Thesis, Universidad de Belgrado, 1985.
-

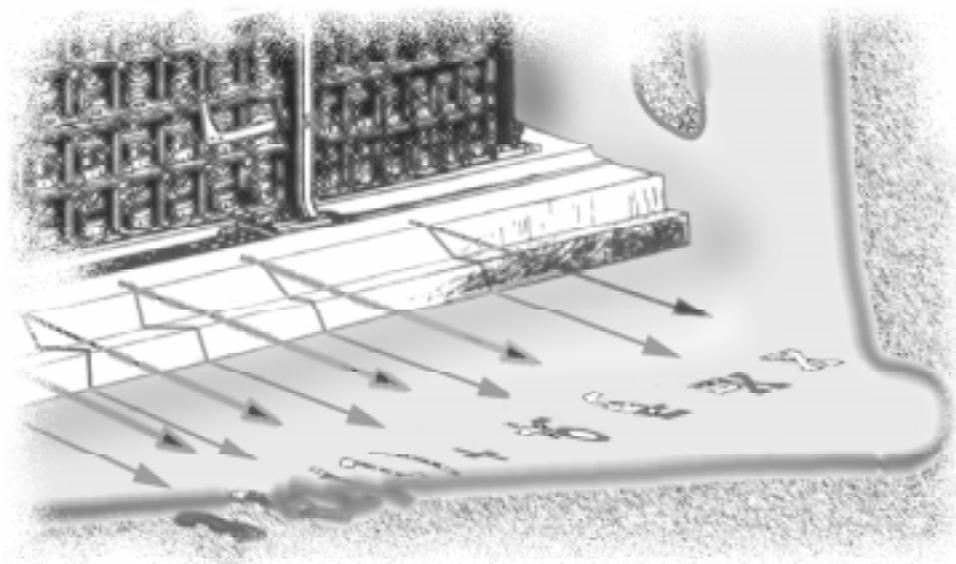
- *Methodology EXETER for Selecting and Optimal Part-Replacement Policy*,
Maintenance Management Int., Vol. 5, págs. 209-218, Elsevier Science Publishers, 1985.
- *On the Application of a Condition Parameter Based Reliability Approach to Automobile Maintenance*,
Proc. 4th International Conference on Automobile Reliability, Praga (Chequia), junio 1988.
- Kolmogorov, A. N.:** *Foundation of the Theory of Probability*,
Chelsea Publishing Company, Nueva York (EE.UU.), 1950.
- Kumar, A. &
R. K. Ragade:** *An Extended Reliability Evaluation Framework for Computer Systems Using Fuzzy Logic*,
Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium, págs. 517-522, 1994.
- Kuoppala, R. J.,
E. O. Jantunen &
P. A. Enwald:** *Condition Monitoring Methods for Rotating Machinery*,
págs. 175-198, Holmberg K. & Folkesson A. (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher Ltd., Inglaterra 1991.
- Lavalle, J. C.,
R. Collantes,
M. A. Sanz, &
R. Palacios:** *SEDIMAHE: An Expert System to Help the Maintenance of Machine Tools*,
Maintenance, Vol. 8, Nº 3, págs. 10-14, 1993.
- Majstorovic, V. &
V. Milacic:** *Expert System for Diagnosis and Maintenance*,
Maintenance, Vol. 5, Nº 3, págs. 19-22, 1990.
- Malik, M. A. K.:** *Reliable Preventive Maintenance Scheduling*,
AIIE Trans., Vol. 1, págs. 221-228, 1979.
- Mann, Jr. L.,
A. Saxena &
G. M. Knapp:** *Statistical-based or Condition-based Preventive Maintenance*,
Quality in Maintenance Engineering, Vol. 1, Nº 1, págs. 46-59, 1995.
- Mann, L.:** *Maintenance Management*,
Lexington Books, D.C. Heath & Co., Lexington, Massachusetts, U.S.A., 1976.
- Manson, S. S.:** *Metal Fatigue Damage Mechanism, Detection, Avoidance and Repair*,
American Society for Testing and Materials, 1971.
- Mobley, R. K.:** *An Introduction to Predictive Maintenance*,
Van Nostrand Reinhold, Nueva York (EE.UU.), 1990.
- Moore, D. F.:** *Principles and Applications of Tribology*,
Pergamon Press Ltd., 1975.
- Moss, M. A.:** *Designing for Minimal Maintenance Expense: The Practical Application of Reliability and Maintainability*,
Marcel Dekker, Inc., Nueva York (EE.UU.), 1985.
- Moubray, J.:** *Reliability-centred Maintenance-RCM II*,
Butterworth and Heinemann, Oxford (Inglaterra), 1991.

-
- Nakajima, S.:** - *TPM-Challenge to the Improvement of the Productivity by Small Group Activities*, Maintenance Management International, Nº 6, págs. 73-83, 1986.
- *Total Productive Maintenance (TPM)*, Productivity Press, Inc., Cambridge, Massachusetts 02140, U.S.A., 1988.
- *TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance*, Productivity Press, Inc., Cambridge, Massachusetts 02140, U.S.A., 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.
- Newborough, 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.
- Northcott, M.:** *Health Assessment of Royal Naval Diesel Engines Using Expert Systems Support for Oil Analysis*, Maintenance, Vol. 8, Nº 4, págs. 10-13, 1993.
- Nowlan, F. & H. F. Heap:** *Reliability Centered Maintenance*, National Technical Information Services, US Department of Commerce, Springfield, Virginia (EE.UU.), 1978.
- Patton, J. D.:** *Maintainability and Maintenance Management*, 2ª edición, 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. & Folkesson A. (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd., Inglaterra, 1991.
- Poppe, A.S.:** *Autonomous Maintenance, Autonomous Quality*, Total Productive Maintenance Conference, MCE, Bruselas (Bélgica), abril 1992.
- Pronikov, A.S.:** *Dependability and Durability of Engineering Products*, Butterworths, Londres (Inglaterra), 1973.
- Pulkkinen, U.:** *A Stochastic Model for Wear Prediction Through Condition Monitoring*, págs. 233-243, Holmberg, K. & Folkesson, A. (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd., Inglaterra, 1991.
- Rabinowicz, E.:** *Friction and Wear of Material*, John Wiley, Nueva York (EE.UU.), 1965.
- Setford, G.:** *Bearings Condition Monitoring*, Condition Measurement and Condition Control, Maintenance, Vol. 10, Nº 2, págs. 3-8, 1995.
-

- Sharma, T. C.,
W. Key,
L. J. Mancini, J. May,
J. E. Richardson &
G. Schaner:** *Next Generation Commercial Airlines: Reliability for Airlines Economics*, Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium, págs. 192-198, 1993.
- 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.
- Shooman, M. L.:** *Probabilistic Reliability: An engineering Approach*, McGraw-Hill, Nueva York (EE.UU.), 1964.
- Standtorv, H. &
M. Rausand:** *RCM-Closing the Loop between Design Reliability and Operational Reliability*, Maintenance Journal, Vol. 6, Nº 1, págs. 13-21, 1991.
- Sternstein, E. &
T. Gold:** *From Takeoff To Landing*, Pocket Books, Siomn & Schuster Inc., Nueva York (EE.UU.), 1991.
- Suzuki T.:** - *New Trends for TPM in Japan*, Total Productive Maintenance Conference, MCE, Bruselas (Bélgica), abril 1992.
- *New Directions for TPM*, Productivity Press, Cambridge, Massachusetts (EE.UU.).
- Tsang, A. H. C.:** *Condition-based Maintenance: Tools and decision making*, Quality in Maintenance Engineering, Vol. 1, Nº 3, págs. 3-17, 1995.
- Wetherill, G. B.:** *Elementary Statistical Methods*, Metune & Co. Ltd., Londres (Inglaterra), 1967.
- White, M. F.:** *Experiences from Condition Monitoring of Turbo-Compressors*, Condition Monitoring '87, Proc. International Conference on Condition Monitoring, págs. 641-660, Inglaterra, 1987.
- Williams, J. H.,
A. Davies &
P. R. Drake:** *Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics*, Chapman & Hall, 1994.
- 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.
- Wright, D. &
K. Y. Cai:** *Representing Uncertainty for Safety Critical Systems*, ESPRIT PDCS2 Project 6362, Draft Report, City University, Londres (Inglaterra), 1994.
- Yan, X. P.:** *Oil Monitoring Based Condition Maintenance Management*, Proc. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM '94, págs. 154-161, Nueva Delhi (India), 1994.
- *British Standard BS 3811, Glossary of Maintenance management terms in terotechnology*, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).
 - *British Standard BS 4778, Glossary of International terms, Section 3.2*, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).

- *British Standard BS 5760, Reliability of Systems, Equipment and Components*, British Standards Institution, Londres (Inglaterra).
 - *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. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD. Cualquier expresión de función de probabilidad que tenga por dominio un conjunto exhaustivo de sucesos mutuamente excluyentes.

4. ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS PARA LA SEGURIDAD. Aquellos elementos cuyo fallo es probable que tenga efectos peligrosos y que requieren un control especial para conseguir una probabilidad de fallo individual suficientemente baja.

5. ELEMENTOS SIGNIFICATIVOS PARA LA UTILIDAD. Aquellos elementos que no son críticos para la seguridad, pero cuyo fallo es probable que tenga efecto sobre la producción de utilidad, requiriendo por tanto un control para lograr los objetivos comerciales.

6. ESTIMADOR ADECUADO DE CONDICIÓN. Un parámetro observable que describe la condición del elemento en cada instante del tiempo de operación.

7. EXAMEN. Una tarea específica de mantenimiento condicional cuyo resultado es una descripción numérica de la condición del elemento en ese momento mediante el RCP.

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

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

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

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

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

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

14. 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.

15. INDICADOR ADECUADO DE CONDICIÓN. Un parámetro observable que indica la condición del elemento o sistema en el instante de la comprobación.

16. INSPECCIÓN. Una tarea específica de mantenimiento condicional cuyo resultado es un informe sobre la condición del

elemento, esto es, si su condición es satisfactoria o insatisfactoria, determinada de acuerdo con el RCI.

17. 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.

18. POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL FALLO. Política de mantenimiento fundada en llevar a cabo tareas de mantenimiento correctivo, después de que se ha producido un fallo, para recuperar la funcionalidad del elemento o sistema considerado.

19. POLÍTICA DE MANTENIMIENTO BASADA EN LA VIDA DEL SISTEMA. Tareas de mantenimiento preventivo ejecutadas a intervalos fijos que son función de la distribución de vida de los elementos considerados.

20. PROCESO DE MANTENIMIENTO. El conjunto de tareas de mantenimiento llevadas a cabo por el usuario, a fin de mantener la funcionalidad de un sistema durante su utilización.

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

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

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

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

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

26. 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.

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

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

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

30. 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.

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

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

33. TIEMPO MEDIO ENTRE FALLOS, $MTBF$. Esperanza matemática de la variable aleatoria TTF (Tiempo de Fallo).

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

35. TIEMPO MEDIO HASTA EL FALLO, *MTTF*. Esperanza matemática de la variable aleatoria *TTF* (Tiempo de Fallo).

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

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

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

MANTENIMIENTO

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