



Universidad Nacional de Educación a Distancia

TESIS DOCTORAL

UN MODELO MATEMÁTICO ÓPTIMO DE MANTENIMIENTO Y FIABILIDAD APLICADO A LA AVIACIÓN COMERCIAL

Juan Carlos Redondo Expósito

Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales

Ingeniero Aeronáutico

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA I

2.007



Universidad Nacional de Educación a Distancia

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA I
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

**UN MODELO MATEMÁTICO ÓPTIMO DE
MANTENIMIENTO Y FIABILIDAD APLICADO A
LA AVIACIÓN COMERCIAL**

Juan Carlos Redondo Expósito

Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales

Ingeniero Aeronáutico

Director de la Tesis:

Dr. D. Vicente Bargueño Fariñas

(UNED)

ÍNDICE GENERAL

1 Introducción

- 1.1 Motivación, 1
- 1.2 Objetivo, 1
- 1.3 Sinopsis, 2
- 1.4 Estructura de la Tesis, 10

2 Fiabilidad

- 2.1 Preámbulo, 13
- 2.2 Definición de fiabilidad, 14
- 2.3 Formulación, 16
- 2.4 Nota histórica, 19
- 2.5 Utilidad de la ingeniería de fiabilidad, 21

3 Mantenimiento

- 3.1 Funcionalidad y funcionabilidad, 25
- 3.2 Definición de mantenimiento, 27
- 3.3 Relación entre fiabilidad y mantenimiento, 27
- 3.4 Fiabilidad y mantenibilidad, 29
- 3.5 Mantenimiento y disponibilidad, 29
- 3.6 Mantenimiento y seguridad, 30
- 3.7 Mantenimiento y economía, 31
- 3.8 Duración de la tarea de mantenimiento, 34
- 3.9 Función de mantenibilidad, 35
- 3.10 Tiempo empleado en mantenimiento, 36
- 3.11 Duración esperada del mantenimiento, 37

4 Mantenimiento Correctivo

- 4.1 Definición, 39
- 4.2 Ventajas, 40
- 4.3 Inconvenientes, 41

4.4 Modelo de reparación ideal, 42

5 Mantenimiento Preventivo

- 5.1 Definición, 45
- 5.2 Ventajas, 47
- 5.3 Inconvenientes, 47
- 5.4 Modelo ideal de mantenimiento preventivo, 49
- 5.5 Mantenimiento preventivo y reparación ideal, 54

6 Mantenimiento por Potenciales

- 6.1 Definición, 57
- 6.2 Determinación del potencial desde la fiabilidad, 58
- 6.3 Determinación del potencial desde la economía, 62
- 6.4 Cálculo del MTBUR, 63
- 6.5 Sustitución por edad y sustitución por bloque, 65
- 6.6 Test de Barlett para el modelo negativo exponencial, 73
- 6.7 Consideraciones sobre la aplicación de la ley exponencial, 76
- 6.8 Previsión de repuestos, 78

7 Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad

- 7.1 Planteamiento inicial, 81
- 7.2 Análisis de modos y efectos de los fallos (FMEA), 88
- 7.3 Realización del FMEA, 89
- 7.4 Predicción de la fiabilidad, 90
- 7.5 El proceso FRACAS, 93
- 7.6 El proceso de mantenimiento en una compañía aérea, 95
 - 7.6.1 Trabajos programados y no programados, 95
 - 7.6.2 El caso de British Airways, 97

8 Mantenimiento Basado en el Examen de la Condición

- 8.1 Introducción, 101
- 8.2 El estimador de la condición (RCP), 102
- 8.3 Aspectos principales para el mantenimiento, 105

- 8.3.1 Comparación con los métodos tradicionales, 110
- 8.4 Una alternativa: la inspección programada, 113
 - 8.4.1 Análisis de un caso práctico, 115

9 Algoritmo para una Estrategia de Mantenimiento Basada en el Examen de la Condición

- 9.1 Introducción, 117
- 9.2 Enunciado de un caso práctico, 119
- 9.3 Identificación del estimador de condición (RCP), 121
- 9.4 Elección del estimador de mantenimiento (RCM), 122
- 9.5 Condiciones operativas en servicio, 122
- 9.6 Ensayo de la duración, 123
- 9.7 Algoritmo para el mantenimiento, 124
 - 9.7.1 Función de deterioro del elemento, 125
 - 9.7.2 Ley de fallo del dispositivo, 128
 - 9.7.3 Estimación de los parámetros de una distribución $N(\theta, \sigma)$, 129
 - 9.7.4 Comprobación de la bondad del ajuste, 132
 - 9.7.5. Funciones de densidad, distribución y fiabilidad, 135
 - 9.7.6. Operando con el programa SuAP, 136
 - 9.7.6.1 Datos de partida, 136
 - 9.7.6.2 Control del mantenimiento, 138
 - 9.7.6.3 Proceso de cálculo, 140
- 9.8 Resultados, 143

10 Tecnología Avanzada para el Mantenimiento

- 10.1 La vigilancia de la condición, 145
- 10.2 Técnicas de vigilancia de la condición, 146
 - 10.2.1 Vigilancia de las vibraciones, 147
 - 10.2.2 Vigilancia de la tribología, 148
 - 10.2.3 Vigilancia de las prestaciones, 149
 - 10.2.4 Inspección visual, 150
 - 10.2.5 Técnicas de ensayo no destructivo, 151

- 10.3 Localización de averías: sistemas digitales de diagnóstico, 153
- 10.4 Implicaciones del FMEA, 156
- 10.5 Equipo integrado de comprobación (BITE), 157
- 10.6 El concepto de bus de datos, 159
- 10.7 Aplicación del bus de datos al mantenimiento, 161

11 Conclusiones

- 11.1 Hipótesis de la investigación, 163
- 11.2 Líneas de investigación abiertas, 169

Bibliografía, 171

Apéndice A

- A.1 Distribución Exponencial, 180
- A.2 Distribución de Weibull, 181
- A.3 Distribución Normal, 184
- A.4 Distribución t de Student, 186
- A.5 Distribución Chi-cuadrado, 187

Apéndice B

- B.1 Ecuaciones del modelo, 188
- B.2 Regresión lineal, 191
- B.3 Regresión de polinomios, 195
- B.4 Regresión no lineal, 197
- B.5 Ajuste de curvas con Excel, 200

Apéndice C

- C.1 Descripción del cuadro de control del mantenimiento, 204

ÍNDICE de FIGURAS

- 1.1 Probabilidad condicional de las curvas de tasa de fallos, 6
- 1.2 Fallos relacionados con la edad, 7
- 3.1 Coste de la tarea de mantenimiento como variable aleatoria, 33
- 3.2 Medidas de mantenibilidad, 38
- 4.1 Diagrama de flujo del mantenimiento correctivo, 40
- 4.2 Densidad efectiva de fallos para un componente con reparación ideal, 43
- 5.1 Diagrama de flujo del mantenimiento preventivo, 46
- 5.2 Relación entre MTBM y MTTF, 48
- 5.3 Función de densidad con mantenimiento programado incorporado, 50
- 5.4 Funciones estadísticas sin el efecto del mantenimiento, 51
- 5.5 Funciones de densidad y riesgo con mantenimiento incluido, 52
- 7.1 Función de densidad mixta, 81
- 7.2 Componentes de un programa RCM, 85
- 7.3 Proceso de un análisis RCM, 87
- 8.1 Método RCP para fiabilidad, 105
- 8.2 Valores posibles del parámetro RCP, 106
- 8.3 Diagrama de flujo del mantenimiento basado en la condición, 109
- 8.4 Vida en servicio siguiendo una estrategia basada en la condición, 112
- 8.5 Diagrama de flujo de una política basada en la inspección, 114
- 9.1 Funcionamiento de un contactor, 119
- 9.2 Contactor real, 120
- 9.3 Curvas de regresión de la función de deterioro, 127
- 9.4 Funciones de fiabilidad y no-fiabilidad (distribución normal), 136
- 10.1 Arquitectura funcional de una prueba en laboratorio, 157
- 10.2 Arquitectura de un equipo automático de prueba, 158
- 10.3 Esquema funcional de un bus de datos, 159
- 10.4 Estructura y componentes de un bus de baja velocidad, 160
- 10.5 Estructura y componentes de un bus de alta velocidad, 160
- 11.1 TBO en caso de tasa de fallo constante, 166
- A.1 Curvas de densidad, fiabilidad y tasa de fallo de la distribución exponencial, 180
- A.2 Curva de la bañera, 180

- A.3 Curvas de densidad, fiabilidad y tasa de fallo de la distribución Weibull, 183
- A.4 Curvas de densidad, fiabilidad y tasa de fallo de la distribución normal, 185
- C.1 Descripción del cuadro de control, 204

Í N D I C E d e T A B L A S

- 3.1 Costes para B-747 (121 aviones) y B-757 (62 aviones), 34
- 3.2 Función $M(t)$ para distribuciones teóricas conocidas, 36
- 3.3 Tiempo medio de mantenimiento para distribuciones conocidas, 37
- 5.1 Tipología de mantenimiento preventivo en la industria aeronáutica, 47
- 6.1 Errores tipos I y II, 74
- 6.2 Intervalos correspondientes a 3 niveles de significación (χ^2), 76
- 7.1 Formato FMEA para componentes electrónicos, 90
- 8.1 Parámetros de Weibull para los mecanismos examinados, 115
- 8.2 Intervalos de inspección de los mecanismos, 116
- 9.1 Matriz de condición para 10 juegos de contactos, 124
- 9.2 Tiempos hasta el fallo (obtenidos de la tabla 9.1), 130
- 10.1 Análisis de fallos detectados mediante un sistema digital de diagnóstico, 155
- B.5 Funciones de Excel que relacionan los ajustes por regresión de datos, 201

LISTA de ACRÓNIMOS

ATE	Automatic Test Equipment
BC	Bus Controller
BIT	Built in Test
BITE	Built in Test Equipment
BM	Bus Monitor
CEO	Chief Executive Officer
CMR	Cost of Maintenance Resources
CMT	Cost of Maintenance Task
DATAC	Digital Autonomous Terminal Access Communication
DMT	Duration of Maintenance Task
DMTp	Duration of Elapsed Maintenance Time
DoD	Department of Defense
EADS	European Aeronautics and Space Company
EOL	Enhanced Operative Life
FAA	Federal Aviation Agency
FF.AA.	Fuerzas Armadas
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
FRACAS	Failure Reporting Analysis and Corrective Action System
FTA	Failure Tree Analysis
HCP	Hourly Cost of Personnel
HS	High Speed
IATA	International Air Transport Association
IB	Inspection Based
IFR	Increasing Failure Rating
IMRS	Integrated Monitoring and Recording System
INS	Inertial Navigation System
I/O	Inputs/outputs
ITA	Integrated Test Adaptor
LRI	Line Replaceable Item
LRU	Line Replaceable Unit
LS	Low Speed

MDP	Maintenance Data Panel
MTBF	Mean Time Between Failures
MTBR	Mean Time Between Removals
MTBUR	Mean Time Between Unscheduled Removals
MTIR	Mean Time to Item Removal
MTTF	Mean Time To Failure
MTTM	Mean Time To Maintenance
MTTR	Mean Time To Repair
MUL	Mean Useful Life
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBU	New Better than Used
NWU	New Worse than Used
RCI	Relevant Condition Inspection
RCM	Reliability Centered Maintenance
RCP	Relevant Condition Parameter
RCFA	Root Cause Failure Analysis
RMP	Relevant Maintenance Parameter
RMT	Reliability, Maintainability & Testability
RT	Remote Terminal
SPS	Service Propulsion System
STTE	Special To Test Equipment
SuAP	Support Analysis Program
TBO	Time Between Overhauls
TE	Time to Exam
TI	Time to Inspection

AGRADECIMIENTOS

La investigación es una actividad solitaria, aunque se realice en equipo. Implica horas incontables de lectura y escritura, análisis y reescritura, hasta que el trabajo es finalmente completado. No obstante, también supone un esfuerzo conjunto porque la investigación no se concibe sin el continuo apoyo de expertos, colegas y amigos.

Agradezco al Dr. D. Vicente Barqueño Fariñas su constante atención e interés en mi trabajo e ideas. Su revisión del manuscrito, comentarios y sugerencias, han contribuido a un resultado mucho mejor del que hubiese obtenido sin su ayuda.

En el departamento de Matemática Aplicada I también encontré a una persona atenta y siempre dispuesta a prestar su ayuda. Gracias, María Jesús.

En EADS trabaja un colega y amigo que me ayudó de forma desinteresada; me refiero a Jorge Gual Aznar.

Finalmente, un entrañable recuerdo a mi familia. Sin su comprensión, apoyo y tiempo que me han dedicado, no hubiese podido alcanzar mis metas. Nunca flaquearon en su estímulo o respeto a mi trabajo, a pesar de que mis libros y ordenador a menudo competían con ellos por mi tiempo. Por ello, estoy agradecido cada día de mi vida.

Juan Carlos Redondo Expósito

Enero 2.007

A mi hija Carla, mi Princesa.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

“Él dio al hombre el habla, y el habla creó el pensamiento, que es una medida del universo.”

Shelley¹

1.1 MOTIVACIÓN

El tema elegido para la tesis doctoral representa para este doctorando un triple interés: psicológico, profesional y social.

Psicológico, porque la investigación científica reclama que se realice con verdadera pasión y total entrega, lo que probablemente no ocurriría si se es consciente de que el tema elegido es banal e intrascendente. A lo largo del trabajo se pondrá de manifiesto la fundamental importancia de la fiabilidad de los complicados equipos y sistemas actuales y la trascendencia de una acertada política de mantenimiento.

Profesional, porque es lógico y aconsejable que exista una concordancia entre el tema elegido y la orientación profesional. En este caso, mi labor como ingeniero aeronáutico en EADS aporta la experiencia necesaria para afrontar con garantías la investigación. Además, mi formación en ciencias económicas añade al estudio un enfoque complementario.

El interés social, la consideración de su posible utilidad para la comunidad, queda patente por el protagonismo tecnológico de este medio de transporte.

1.2 OBJETIVO

Este trabajo intenta responder a la necesidad de políticas de mantenimiento alternativas a las que tradicionalmente se han venido poniendo en práctica en las aerolíneas.

¹ Prometeo liberado.

Todo lo que rodea al mundo de la aviación es caro, tanto los recursos humanos como los técnicos. Nos encontramos inmersos en una guerra de tarifas que hace peligrar la supervivencia de muchas empresas dedicadas a la aviación comercial. La estrategia de reducción de costes ha obligado a la autoridad encargada de velar por la seguridad del transporte aéreo a que dirija su atención a los procesos de mantenimiento de estas compañías, ya que una relajación en estas actividades, con el fin de reducir costes, conduciría a una mejor cuenta de resultados, muy probablemente a costa de una menor seguridad de los usuarios.

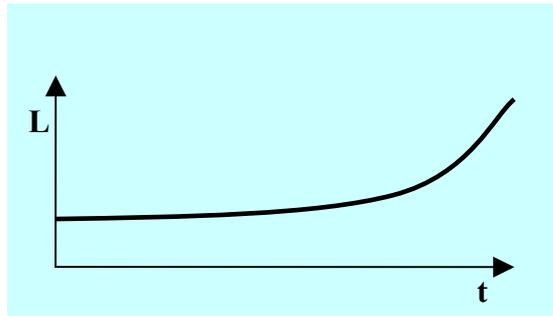
Abordaremos el problema de diseñar programas de mantenimiento de aeronaves, con el objetivo de asegurar al máximo la fiabilidad (y, por lo tanto, la seguridad) al menor coste posible.

1.3 SINOPSIS

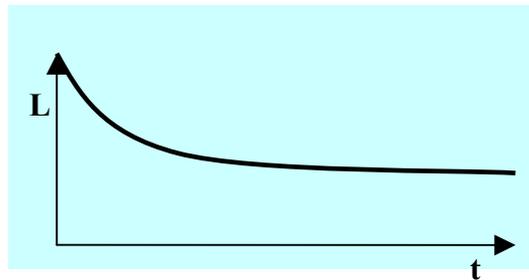
Hasta la década de los sesenta, el mantenimiento programado en las compañías aéreas estaba basado en el concepto de que cada elemento tenía una “edad adecuada” en la que éste precisaba una revisión general completa para garantizar la seguridad y fiabilidad operativa. Sin embargo, la FAA, frustrada por su incapacidad para controlar las tasas de fallo de ciertos tipos de motores, estableció un grupo de trabajo con el fin de investigar las capacidades del mantenimiento preventivo, que condujo a una extensa investigación de cómo fallan los equipos y, en particular, a estudios de evolución de la fiabilidad con la edad y determinación de las condiciones que deben existir para que el mantenimiento programado sea eficaz.

Se identificaron 6 modelos de fallos, representando la probabilidad condicional de fallo en función de la edad, para una amplia variedad de elementos eléctricos y mecánicos.

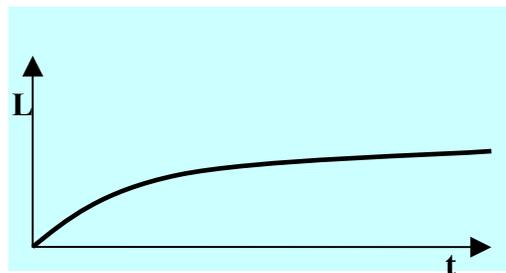
TIPO A: Probabilidad de fallo constante o ligeramente creciente, seguida de una región cóncava pronunciada. Se puede fijar una edad límite: típica curva de un motor.



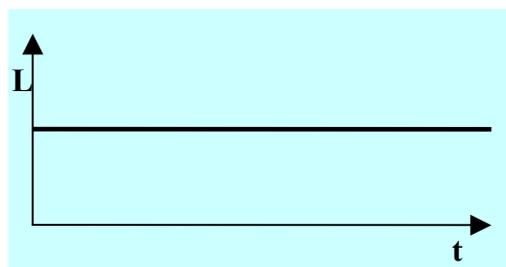
TIPO A: Fallos iniciales o infantiles, seguidos de una probabilidad de fallo constante o ligeramente creciente: típica de equipos electrónicos (falta de envejecimiento de los componentes de una tarjeta, por ejemplo)



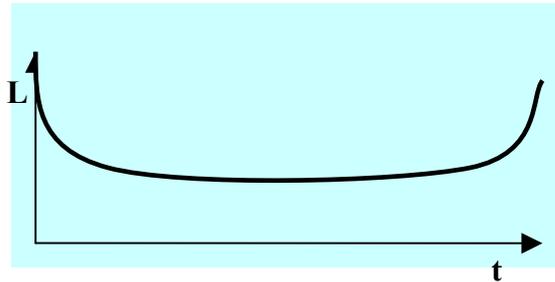
TIPO B: Baja probabilidad de fallo cuando el elemento es nuevo o recién revisado, seguido por un rápido crecimiento hasta alcanzar un nivel relativamente constante.



TIPO C: Probabilidad de fallo relativamente constante a cualquier edad: ley exponencial (tasa de fallos constante)



TIPO E: La conocida como “curva de la bañera”.



La primera etapa, de fallos iniciales o infantiles, corresponde generalmente a la existencia de dispositivos defectuosos con una tasa de fallo superior a la normal, que están incluidos entre los dispositivos normales. Para describir el período infantil, hay que emplear una función con tasa de fallo decreciente; determinados casos de las distribuciones Gamma y de Weibull se ajustan a esta condición. Utilizaremos, por ejemplo, la *función de densidad de Weibull*:

$$f_1(t) = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{t}{50}\right)^{-0,5} \cdot e^{-\left(\frac{t}{50}\right)^{0,5}}$$

La segunda etapa, de operación normal o de fallos constantes (también llamada de fallos aleatorios), es debida normalmente a operaciones superiores a las proyectadas. Para la vida útil, con tasa de fallo constante, es forzoso emplear una *función de densidad exponencial* como la siguiente:

$$f_2(t) = \frac{1}{100000} \cdot e^{-\frac{t}{100000}}$$

La tercera etapa, denominada fallos de desgaste o envejecimiento, es debida a la superación de la vida prevista del componente cuando empiezan a aparecer fallos de degradación como consecuencia del desgaste. Se recomienda fijar una edad límite. El período de desgaste, caracterizado por una tasa de fallo creciente, exige una densidad en forma de campana, como son las normales y ciertos casos de la de Weibull. Empleamos la *función de densidad normal*:

$$f_3(t) = \frac{1}{1000\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-10000}{1000}\right)^2}$$

La *función de densidad total* tomará la forma:

$$f(t) = a \cdot f_1(t) + b \cdot f_2(t) + c \cdot f_3(t)$$

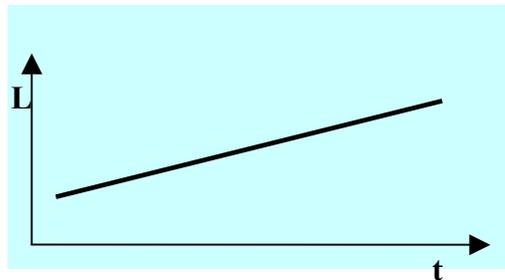
Los coeficientes a, b y c son, respectivamente, las probabilidades de que el fallo sea infantil, por azar y por desgaste, por lo que:

$$a + b + c = 1$$

Con ello se cumple también la condición:

$$\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt = 1$$

TIPO F: La probabilidad de fallo aumenta gradualmente, sin llegar a un extremo (curva pronunciada) Normalmente no se fija una edad límite (ejemplo típico: motores de turbina)



Los tipos A y E son típicos de elementos simples o compuestos de una sola pieza, como neumáticos, álabes de compresores, frenos y componentes estructurales. Los elementos más complejos siguen las curvas B, C, D y F.

La diferencia entre los dos grupos tiene importantes implicaciones para el mantenimiento. El primero de ellos muestra una relación directa entre fiabilidad y edad. Esto es particularmente cierto donde factores como la fatiga del material o el desgaste mecánico están presentes o donde los elementos son designados como consumibles (vida corta o predecible) En estos casos la fijación de una edad límite basada en el

tiempo de operación o ciclos de esfuerzo puede ser efectiva en la mejora de la fiabilidad total del sistema complejo del que forma parte.

Los sistemas complejos presentan a menudo fallos infantiles después de haber mantenido una tasa de fallo constante o ligeramente creciente. En estos casos, las reparaciones programadas incrementan la tasa de fallo en sistemas estables.

El porcentaje de equipos asociados a cada modelo se determinó por separado en tres estudios, indicándose el resultado a continuación.

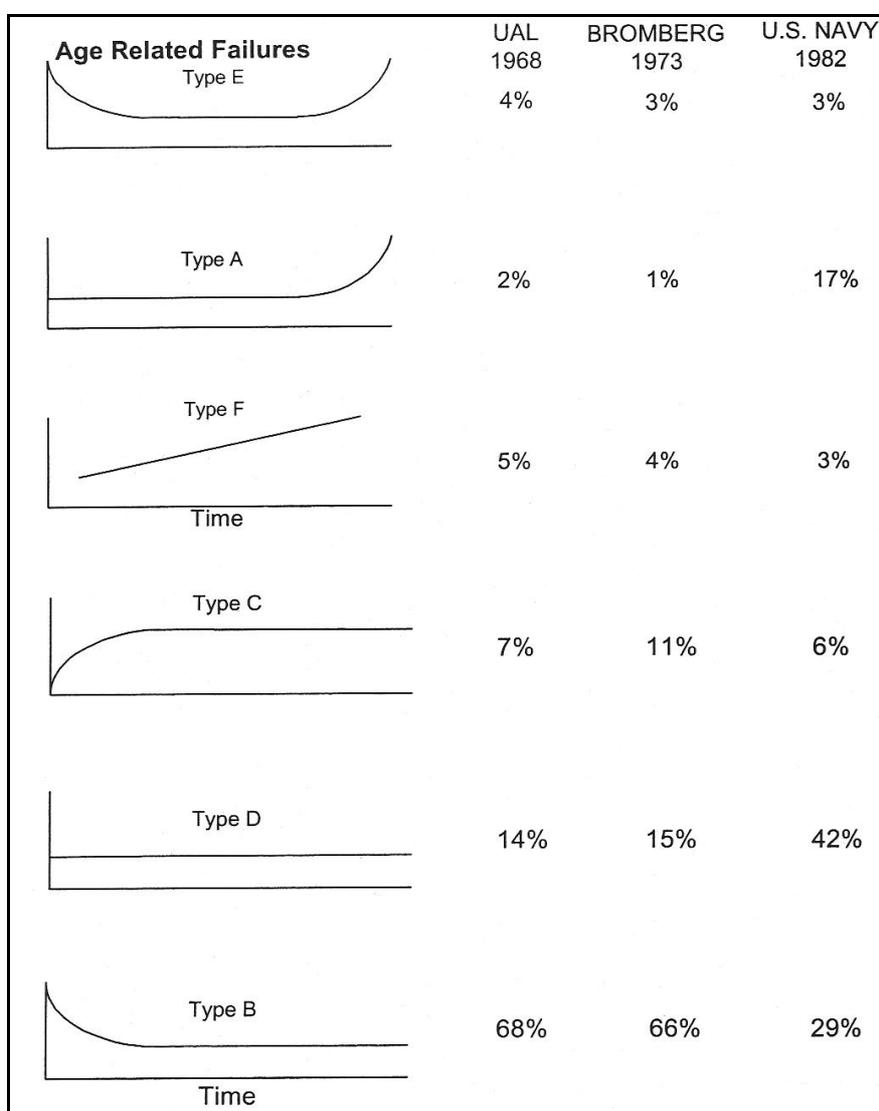


Fig.1.1. Probabilidad condicional de las curvas de tasa de fallos

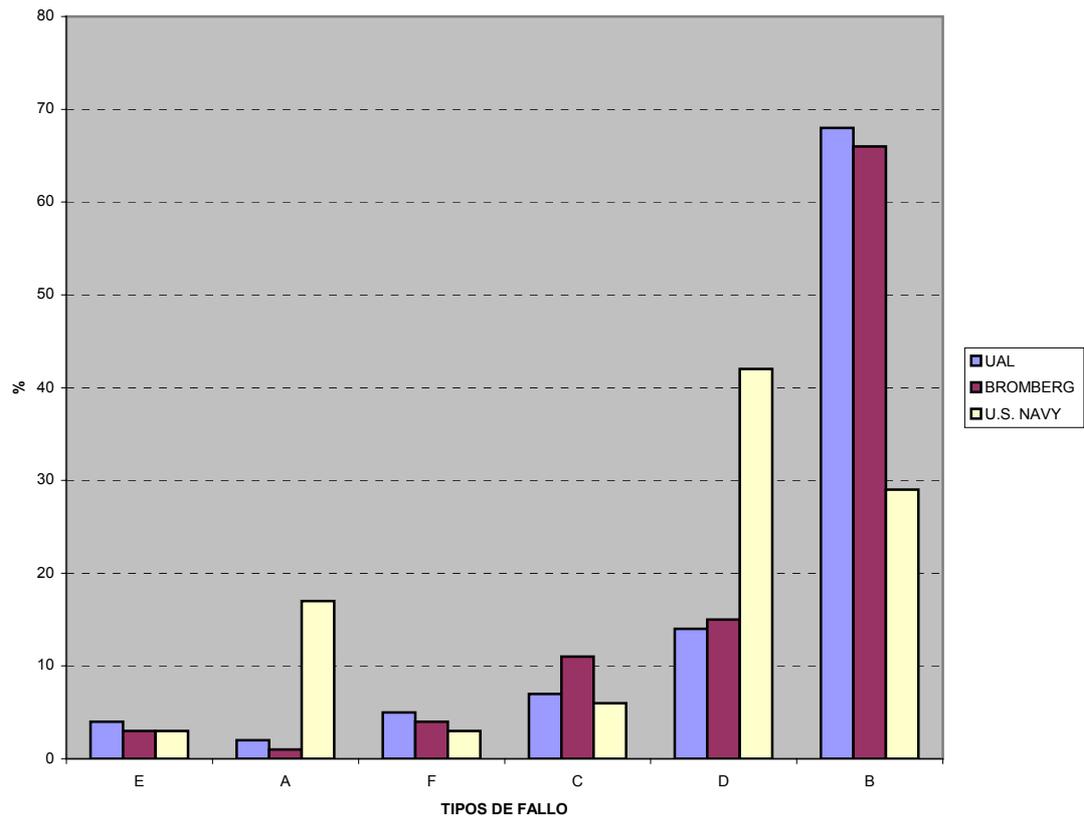


Fig. 1.2. Fallos relacionados con la edad

Si nos fijamos en el resultado de los mismos, el hallazgo más sorprendente es la frecuencia con que cada uno de estos modelos se presentaba en la aviación civil. Se demostró que la mayor parte de los elementos siguen los modelos B y D:

$$\text{UAL} = 14\% + 68\% = 82\%$$

$$\text{Bromberg} = 15\% + 66\% = 81\%$$

$$\text{US Navy} = 42\% + 29\% = 71\%$$

Así, esta conclusión contradecía la creencia de que, a medida que el equipo envejece, es más probable que falle; creencia que condujo a la idea de que, cuanto más a menudo se hiciera la revisión general, más protección contra fallos habría. Los trabajos demostraron que esto es raramente cierto y, más aún, que las revisiones programadas pueden, como se ha indicado en el párrafo precedente, aumentar la producción de fallos, introduciendo “fallos de rodaje” en sistemas que en otro caso serían estables.

El análisis de la política de mantenimiento en las líneas aéreas a finales de los 60 y principios de los 70 condujo al desarrollo de RCM. Los principios de esta técnica se recogieron en el libro de *Nowlan & Heap*, titulado *Reliability Centered Maintenance*. **El trabajo demostró que no existía una fuerte correlación entre edad y tasa de fallo y que la premisa del mantenimiento basado en la edad del producto era incorrecta en la mayoría de ellos.** Estudios adicionales del Departamento de Defensa de los EE.UU. y varias agencias nucleares confirmaron las ideas de estos autores.

No obstante, desde 1.960 hasta finales de la década de los ochenta, el mantenimiento preventivo tradicional fue la técnica más utilizada por las organizaciones dedicadas al mantenimiento. Se basaba en dos principios:

- ☞ La elevada correlación existente entre *tiempo* \Leftrightarrow *tasa de fallo*;
- ☞ La probabilidad de fallo de los componentes individuales y los equipos puede ser determinada estadísticamente y así, los elementos pueden ser reemplazados con antelación a su fallo.

Durante los últimos veinte años, muchas organizaciones industriales han reconocido los inconvenientes de estas prácticas; por consiguiente, la necesidad de proporcionar seguridad y de reducir el coste de mantenimiento ha llevado a un interés creciente en el desarrollo de políticas alternativas. De todas ellas, la que parece ser más eficaz para minimizar las limitaciones de las tareas de mantenimiento existentes es la **política de mantenimiento basada en la condición**. Este procedimiento de mantenimiento admite que el objetivo básico del mismo es el cambio en la condición y/o 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 década de los noventa significó la extensión del uso de microprocesadores, tecnología que hará posible conocer la condición de los equipos/sistemas en todo momento. La consecuencia fue que las estimaciones de fallo basadas en el tiempo comienzan a dejar de ser utilizadas.

El nuevo método se distinguirá por tres características clave:

- Reconoce que la fiabilidad inherente de cualquier elemento viene determinada por su diseño y fabricación y que ninguna forma de mantenimiento puede llevar la fiabilidad más allá de la inherente en el diseño;
- Reconoce que las consecuencias de los fallos son bastante más importantes que sus características técnicas. Una revisión de las consecuencias de los fallos dirige la atención a los fallos que afectan más a la seguridad y prestaciones del elemento;
- Incorpora modelos de fallo de equipos, en un algoritmo de decisión para la selección de tareas de mantenimiento preventivo, o de las acciones que deben ejecutarse si no se encuentra ninguna tarea apropiada.

La ventaja de este procedimiento es que proporciona una mejor utilización del elemento considerado que en el caso de la aplicación del simple mantenimiento preventivo, satisfaciendo el nivel requerido de seguridad o utilidad. **Los beneficios de la vigilancia de la condición pueden resumirse en:**

- Detección, lo más pronto posible, del deterioro en la condición y/o prestaciones de un elemento o sistema;
- Reducción del tiempo de inmovilización de los sistemas, ya que los técnicos 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, con la consecuencia lógica de la reducción de costes de ciclo de vida;
- Mejora de la seguridad, ya que las técnicas de vigilancia permiten al usuario detener el sistema antes de que se produzca un fallo;
- Aumento de la disponibilidad, al ser posible mantener los sistemas funcionando durante más tiempo.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El estudio se proyecta en 11 capítulos que conducen de forma paulatina al lector a la solución que, ineludiblemente, la realidad impone al problema bajo análisis.

El *capítulo 1*, en el que nos encontramos, nos avanza qué vamos a estudiar (objetivo de nuestro esfuerzo) y cuál es el estado del arte de la materia (orígenes y evolución)

El *capítulo 2* explica qué es la fiabilidad y hace hincapié en la importancia de este concepto. El texto comienza con un caso real que pondrá de manifiesto la utilidad de esta disciplina, y continúa con un repaso de expresiones matemáticas básicas que se utilizarán en otros capítulos.

El *capítulo 3* introduce el concepto de mantenimiento, subrayando su relación con la fiabilidad. Por otra parte, aborda la conexión de aquél con la disponibilidad, seguridad y economía, aspecto básico para la supervivencia de cualquier empresa.

A partir de ahí, se exponen con espíritu crítico las distintas estrategias de mantenimiento posibles, cuyo objetivo es proporcionar seguridad y reducir el coste de las distintas operaciones; el recorrido finalizará con la que el autor de este trabajo ha calificado como la más eficiente.

El *capítulo 4* aborda el mantenimiento correctivo, que se caracteriza por lo tardío de su manifestación: sus acciones tienen lugar sólo cuando se produce un fallo. También se presenta un modelo de reparación ideal.

El *capítulo 5* presenta el mantenimiento preventivo, aquél que tiene por finalidad prevenir la ocurrencia de fallos que aún no se han producido. Tanto las inspecciones como las acciones de rutina se ajustan a un programa, por lo que al mantenimiento preventivo se le conoce también por mantenimiento programado. Esta técnica aprovecha la experiencia acumulada (estadística de fallos) para identificar un modelo de degradación, aplicar acciones específicas de mantenimiento y que el ítem vuelva a un nivel deseable de actuación. Se presenta un modelo ideal de mantenimiento preventivo.

El *capítulo 6* analiza el mantenimiento por potenciales. Fue la filosofía de mantenimiento preventivo generalmente aceptada en aviación comercial y militar hasta hace unos años. El potencial establecido para un componente o equipo es el límite de tiempo entre revisiones generales. Se expresa por lo general en horas de vuelo, aunque puede hacer referencia a funcionamiento en tierra o tiempo de calendario. En este capítulo nos detendremos a considerar la validez de la ley exponencial como hipótesis de distribución de tiempo hasta el fallo.

El *capítulo 7* estudia el mantenimiento centrado en la fiabilidad. Conocido por su acrónimo inglés RCM, es un método que pone gran énfasis en mejorar la fiabilidad del equipo principalmente a través de la retroalimentación de la experiencia alcanzada durante el mantenimiento. Esta información es un instrumento para mejorar de manera continua la especificación de los equipos; la mejora de fiabilidad alcanzada conducirá a la reducción de la tasa de fallos y, por ende, a una mayor disponibilidad y menores costes de mantenimiento. Se basa en dos pilares:

- Identificación de los modos de fallo y cálculo de las tasas de fallo;
- Empleo de las distintas técnicas de mantenimiento de manera integrada, seleccionando en cada momento la más apropiada.

El *capítulo 8* aborda la técnica conocida por “monitorización de la condición”, basada en un nuevo enfoque de la fiabilidad y formando parte del programa RCM. El mantenimiento condicional 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 el control de ciertos parámetros sería posible identificar el momento más conveniente en que se deben realizar las tareas de mantenimiento preventivo, garantizando la seguridad y un mejor aprovechamiento de la vida útil del elemento, cumpliendo así los objetivos de eficiencia técnica y económica.

El *capítulo 9* constituye el núcleo de la investigación por el original algoritmo que presenta. Partiendo de una serie histórica representativa de la degradación de un

componente, se desarrolla un modelo matemático basado en el examen de la condición, cuya utilidad no se limita al sector aeronáutico. La novedad reside en la creación de un programa, como aplicación del estudio anterior, que optimiza los trabajos de mantenimiento y la fiabilidad de un sistema.

El *capítulo 10* pondrá de manifiesto la utilidad, en el ámbito del mantenimiento, de las tecnologías de la información como herramienta de captura, procesamiento de datos y ayuda en la toma de decisiones. Desde un enfoque multidisciplinar, esto es, empleando conceptos, métodos y técnicas provenientes de áreas de conocimiento como la física, la química, la matemática, la informática, la electrónica, etc., podemos lograr que sea el propio sistema quien nos requiera la solución de mantenimiento más eficaz. Repasaremos la última tecnología puesta al servicio del mantenimiento.

Tras la lectura de los capítulos 9 y 10 distinguiremos la diferencia entre examen y vigilancia (monitorización) de la condición.

El *capítulo 11* sintetizará las conclusiones de la investigación y planteará desarrollos futuros basados en la tesis presentada.

Se han incluido *tres apéndices*: el primero de ellos recoge información (fórmulas, tablas) de las distribuciones estadísticas empleadas en la obra; el segundo analiza el modelo matemático utilizado en el capítulo 9, en especial el método de los mínimos cuadrados en las técnicas de regresión; el tercero es una breve descripción de los controles del **programa SuAP (Support Analysis Program), original del autor de esta tesis.**

Gran parte de la literatura especializada está escrita en lengua inglesa. El uso extendido de este idioma en el lenguaje técnico nos obliga a utilizar, en ciertos momentos, la terminología original. Además, en el índice se incluye un apartado con la lista de acrónimos utilizados en esta obra.

Para alcanzar la meta de utilidad, se han incluido en el texto algunos ejemplos.

Capítulo II

FIABILIDAD

“Una vez experimentada la sensación de volar, se hace imposible caminar sin la mirada puesta en el cielo, porque allí has estado y allí quieres volver.”

Leonardo da Vinci

2.1 PREÁMBULO

Cuando el día 21 de diciembre de 1968 a las 11 horas 12 minutos la tercera etapa del gigantesco cohete Saturno V se separó de la cápsula Apollo 8, los astronautas Borman, Lovell y Anders, camino de la Luna, se encontraron sujetos a una vital dependencia de un motor cohete relativamente pequeño, su SPS. Los 9.300 kg. de empuje de este cohete, de la Aerojet General Corp., tenían que actuar en determinados momentos, con una duración total nominal de combustión de 12,5 minutos. Aparte de efectuar las correcciones de rumbo necesarias durante los viajes de ida y vuelta, el SPS, siempre mediante breves períodos de funcionamiento, debería primero poner el Apollo 8 en órbita lunar, luego hacer la órbita circular y finalmente sacar la nave de la órbita lunar lanzándola hacia la Tierra. En la maniobra de reajuste de la órbita lunar, un fallo del SPS podría estrellar el Apollo 8 contra la superficie de la Luna, mientras que un arranque frustrado para volver a la Tierra dejaría a tres seres humanos perdidos en la órbita lunar.

El SPS funcionó perfectamente cada vez que hizo falta. Realmente, las probabilidades de que así ocurriera se estimaban muy elevadas antes de la aventura. Cinco años de ensayos de fiabilidad con cohetes SPS, incluyendo unos 3.200 arranques sin avería y las experiencias en vuelo de los Apollo 6 y Apollo 7 eran la base de tal esperanza. Fue un espléndido trabajo de ingeniería conseguir un sistema casi desprovisto de componentes duplicados y dotado, no obstante, de tan elevada fiabilidad (probabilidad de éxito)

El 11 de abril de 1.970, a las 14 horas 13 minutos, se inició el vuelo del Apollo 13. El día 13, a las 22:08 horas, una de las dos botellas de oxígeno del Módulo de Servicio

(precisamente el que contiene al SPS) explotó. Apollo 13 estaba a más de 300.000 Km. de la Tierra. “*Houston, tenemos un problema*”, dijo lacónicamente Lovell, comandante del vuelo. El oxígeno contenido en las dos botellas del Módulo de Servicio se destina, por una parte, a la respiración y, por otra, a producir energía eléctrica por reacción con hidrógeno en tres células de combustible, dos de las cuales fueron afectadas por la explosión. La segunda botella de oxígeno comenzó a perder. El paso de oxígeno a la restante célula de combustible fue cortado por los astronautas por orden del director de vuelo en Houston, tratando de conservar oxígeno para respirar. Sin resultado. La presión se iba a cero. Ni energía eléctrica ni oxígeno. El relato de la operación de rescate sería largo². Se usaron procedimientos de emergencia previstos y se inventaron otros. El Módulo Lunar fue utilizado en “Lifeboat Mode” (como bote salvavidas), procedimiento muchas veces ensayado en simuladores en tierra. Su cohete de descenso sustituyó al SPS (cuyo estado se ignoraba) para devolver a la Tierra al módulo de mando con Lovell, Haise y Swigert sanos y salvos.

Los vuelos espaciales tripulados subrayan la importancia de la fiabilidad de una manera dramática, tremendamente espectacular. Este episodio real, inspiración de guionistas de Hollywood, despierta el interés hacia esta especialidad.

2.2 DEFINICIÓN DE FIABILIDAD

En sentido coloquial, la palabra fiable se utiliza para calificar a las personas que cumplen con sus compromisos; también se utiliza para describir equipos u otros objetos inanimados que funcionen correctamente.

El concepto es claro pero no particularmente preciso. Por el contrario, la palabra fiabilidad tiene una definición técnica precisa y no totalmente equivalente, a saber:

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

² Se recomienda el artículo ‘*Four days of Peril between Earth and Moon*’. *Time*, 27 de abril de 1.970.

En esta definición advertimos los siguientes puntos importantes:

La fiabilidad es una probabilidad. La especificación de un tiempo dado y de unas condiciones de empleo no basta para conocer con antelación de forma determinística la vida de buen funcionamiento de un dispositivo. Ocurre que el dispositivo nunca nos es totalmente conocido; hasta los productos fabricados con máximas garantías en cuanto a materiales, procesos y control de calidad exhiben cierta variación en su capacidad de supervivencia. Aún suponiendo que las condiciones de funcionamiento fueran rigurosamente idénticas, los tiempos de funcionamiento satisfactorio de los dispositivos de un mismo lote de fabricación presentarán una apreciable dispersión.

Por **funcionamiento satisfactorio** se entiende el cumplimiento de unas actuaciones especificadas. Al cese indebido de este funcionamiento satisfactorio se le denomina fallo.

La fiabilidad, según la definición, es función del tiempo. Para ciertos dispositivos, el tiempo no es lo que mejor mide la exposición al fallo, siendo más conveniente emplear como variable independiente el número de ciclos de funcionamiento, por ejemplo. No obstante, en la generalidad de los casos, el tiempo es la magnitud adecuada y las demás medidas de exposición al fallo suelen poder traducirse a tiempo.

Naturalmente, **la probabilidad de supervivencia de un dispositivo depende de las condiciones de funcionamiento.** Si no fijamos éstas, el concepto de fiabilidad carece de sentido. Pero las condiciones de funcionamiento habitualmente definidas no suelen cubrir todos los factores capaces de producir fallos. Por ejemplo, sin salirse de los límites especificados para un motor de aviación (régimen, temperaturas, presiones), dicho motor puede ser utilizado de formas muy diferentes (despegues más o menos frecuentes según la longitud de las etapas; elevación diferente de los aeropuertos sobre el nivel del mar; condiciones ambientales variables de temperatura, humedad, atmósfera corrosiva y otros factores menos evidentes) Por lo tanto, si pretendemos reducir la dispersión de los datos estadísticos sobre fallos de un componente o sistema a fin de poder hacer predicciones útiles, deberemos especificar con el máximo detalle posible las

condiciones ambientales internas y externas (respectivamente, ambiente inducido y ambiente natural) Esto, desgraciadamente, nos obligará a descartar de la muestra todas las observaciones que no correspondan a estas condiciones de empleo más excluyentes.

2.3 FORMULACIÓN

Partimos de la hipótesis de que el tiempo hasta el fallo de un dispositivo es una variable aleatoria, a la que llamaremos τ , que puede tomar cualquier valor real t desde 0 a ∞ . Si $F(t)$ es la función de distribución y $f(t)$ la función de densidad de τ , tendremos:

$$F(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t f(x) \cdot dx$$
$$F(0) = 0; F(\infty) = 1$$

- $F(t)$ es la probabilidad de que el dispositivo falle no después del instante t , es decir, de que $\tau \leq t$, por lo que se llama también *función de no-fiabilidad*;
- La probabilidad complementaria de ésta, es decir, la probabilidad de que el fallo se produzca después de t es la *función de fiabilidad*:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t) = \int_t^{\infty} f(x) \cdot dx$$
$$R(0) = 1; R(\infty) = 0$$

además:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

- Vida media:

$$\theta = E(\tau) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt$$

La esperanza matemática del tiempo hasta el fallo se llama *vida media o tiempo hasta el fallo* (MTTF)

- Tasa de fallo:

Se denomina *tasa media de fallo* en el intervalo $(t, t + \Delta t)$ al cociente entre la probabilidad de que un dispositivo superviviente en el instante t falle en el intervalo $(t, t + \Delta t)$, y la longitud del intervalo Δt . En una población de dispositivos nominalmente idénticos, la proporción esperada de supervivientes en el instante t será $R(t)$, y la probabilidad de que un dispositivo superviviente en el instante t falle en el intervalo $(t, t + \Delta t)$ será una probabilidad condicional que se expresa así:

$$P(t < \tau \leq t + \Delta t | \tau > t) = \frac{P(t < \tau \leq t + \Delta t)}{P(\tau > t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

con lo que al dividir por la longitud Δt , se obtiene la *tasa media de fallo* en $(t, t + \Delta t)$:

$$z(t, \Delta t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)}$$

Se denomina *tasa instantánea de fallo*, o simplemente *tasa de fallo*, en el instante t , al límite de $z(t, \Delta t)$ cuando Δt tiende a cero. Tendremos:

$$\begin{aligned} z(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} z(t, \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} = \frac{1}{R(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} = \\ &= \frac{1}{R(t)} \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{d}{dt} \ln R(t) = -\frac{1}{R(t)} f(t) = -\frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned}$$

Esta expresión pone de manifiesto que la *tasa de fallo es la densidad de probabilidad de fallo en t condicionada a no haber fallado antes de t* . La tasa de fallo es, por tanto, *una medida de la variación de la fiabilidad en el tiempo*.

Integrando en la expresión: $z(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t)$, tenemos:

$$\ln R(t) = -\int_0^t z(x) dx$$

de donde:

- Fiabilidad en función de la tasa de fallo:

$$R(t) = e^{-\int_0^t z(x) dx}$$

- Vida media en función de la fiabilidad:

Se puede calcular la vida media a partir de $R(t)$ en vez de utilizar la función de densidad de fallos. Para ello integraremos por partes la expresión de la vida media:

$$\theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt = -\int_0^{\infty} t dR(t) = -|tR(t)|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Puesto que para $t=0$, $tR(t)=0$, el primer sumando valdrá $-\lim_{t \rightarrow \infty} [tR(t)]$, límite indeterminado al que aplicamos la regla de L'Hôpital para obtener:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [tR(t)] = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{R(t)^{-1}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{R(t)^{-2} f(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{R(t)}{z(t)} = 0$$

ya que $z(t)$ es un infinitésimo de orden inferior a $R(t)$, y $z(t)$ es no-decreciente; además, $R(t)^{-2} f(t)$ es positivo. Por tanto, podemos escribir:

$$MTTF = \theta = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

2.4 NOTA HISTÓRICA

La fiabilidad es un concepto que surge, principalmente, a raíz de la complicación de los dispositivos modernos. El hacha de mano de Sílex u obsidiana del Paleolítico Inferior poseía una fiabilidad 1, es decir, éxito seguro, sin fallo, si se utilizaba competentemente -hoy diríamos “según especificaciones de empleo”-. La balista romana tendría sus averías, el Ford modelo T muchas más y los equipos electrónicos modernos presentan una variedad tremenda de modos de fallo.

El concepto de fiabilidad, tal como hoy se entiende, se ha formado a través de una serie de vicisitudes.

En primer lugar, los constructores y usuarios de material aeronáutico se preocuparon de la seguridad de las aeronaves entendida como probabilidad de no-ocurrencia de fallos que dieran lugar a accidentes. Los cálculos de seguridad realizados para aviones polimotores capaces de volar con uno o más motores parados son un ejemplo de esta atención. Esto ocurría antes de la Segunda Guerra Mundial.

En segundo lugar, *Robert Lusser*, que trabajaba en las armas de represalia alemanas durante la guerra, estudió la fiabilidad de la bomba volante V-1 y es considerado autor de la popular “regla del producto”.

La Guerra de Corea provocó una grave preocupación del departamento de defensa americano en lo referente al equipo electrónico militar. Los fallos de dicho equipo, aparte de significar una pérdida de efectividad, constituían un quebranto económico enorme. Se calculó que un dólar de equipo electrónico adquirido entrañaba dos dólares anuales de mantenimiento. Se procedió a una serie de estudios de la fiabilidad del equipo electrónico militar que culminaron en el conocido informe AGREE (1.957)

En los años cincuenta se realizan en los EE.UU. numerosos estudios de fiabilidad. Las compras de equipo electrónico por las fuerzas armadas estuvieron condicionadas a la elaboración de especificaciones de fiabilidad. Estas especificaciones fueron sustituidas en 1.965 por la norma MIL-STD-785, que marcaba los requisitos a que deberían ajustarse los programas de fiabilidad en los contratos de sistemas y equipos.

El efecto de exigir contractualmente al proveedor una serie de requisitos de fiabilidad se hizo patente. Por ejemplo, el equipo de navegación TACAN³ AN/ARN-21 fue adquirido para los aviones militares americanos sin especificación de fiabilidad en sus modelos A y B. El tiempo medio entre fallos de estos equipos era de 17,5 horas. Para la adquisición del modelo C, se especificó que el tiempo medio entre fallos no debería ser inferior a 150 horas. Con este requisito, la USAF se ahorró 118,5 millones de dólares anuales de apoyo logístico (para 16.000 equipos), resultando incidentalmente que el precio de adquisición del modelo C era 300 dólares menor que el de los modelos A y B. Menores costes, mejores actuaciones y mayor fiabilidad.

Este importante movimiento de los años cincuenta dio lugar a los primeros compendios de datos de tasas de fallo para la predicción de fiabilidad en equipos electrónicos (como el *RADC Reliability Notebook* en 1.959 y el MIL-HDBK-217, 1.962) Las empresas electrónicas y aeroespaciales redactaron sus manuales de fiabilidad para uso de sus ingenieros (Motorola, 1.955; Boeing, 1.957; etc.) Comenzaron a celebrarse simposios anuales patrocinados por diversas asociaciones profesionales y organismos oficiales.

Los primeros libros sobre fiabilidad datan de los primeros años sesenta (*Chorafas*, 1.960; *Bazovsky*, 1.961; *Lloyd y Lipow*, 1.962; *Calabro*, 1.962; etc.) Durante los años cincuenta, la fiabilidad fue casi exclusivamente norteamericana, electrónica, aeroespacial y militar. En los años sesenta se fue extendiendo a otras geografías y tecnologías.

Hoy, la fiabilidad es un parámetro de diseño al que se concede justificadamente la máxima importancia por la inevitable probabilidad de fallo de componentes y sistemas. Las bases estadísticas han permitido construir modelos matemáticos para el estudio de la fiabilidad de componentes y sistemas, es decir: llegar a una ecuación o sistema de ecuaciones que refleje satisfactoriamente el fenómeno que se estudia. Por otra parte, RMT (*Reliability, Maintainability & Testability*) es un parámetro a tener en cuenta en la identificación de riesgos durante el programa de desarrollo de una aeronave (*Reliability Growth Plan*)

³ 'Tactical Air Navigation', Instrumento de ayuda a la navegación.

2.5 UTILIDAD DE LA INGENIERÍA DE FIABILIDAD

Esta especialidad se ocupa del estudio de la longevidad y fallo de los equipos. Durante la investigación de las causas por las que los dispositivos envejecen y fallan, se aplican principios científicos y matemáticos. Una mayor comprensión de los fallos de los dispositivos ayudará a identificar las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos para aumentar su vida o, por lo menos, limitar las consecuencias adversas de sus fallos.

Reconocemos que los artículos manufacturados tienen vidas finitas y que un mejor diseño de los productos implica, con frecuencia, unas vidas funcionales más largas. Asimismo, somos conscientes de las consecuencias catastróficas de los fallos en algunos equipos. Fallos de fatiga en el fuselaje de un avión, los accidentes de los reactores nucleares de *Three Mile Island* y *Chernobil*, los accidentes de los transbordadores espaciales, son ejemplos muy conocidos de fallos catastróficos de sistemas. Todos nosotros hemos experimentado fallos de sistemas en menor escala, como el de un electrodoméstico, o el fallo de una bombilla.

Existen algunas diferencias importantes entre los ejemplos mencionados anteriormente. Comparemos dos casos extremos: el fallo de una bombilla y el accidente de *Three Mile Island*; éste fue causado por un fallo de un componente físico del equipo, pero también estuvo influenciado por la respuesta humana al fallo del componente y por los protocolos de actuación establecidos. Por el contrario, el fallo de una bombilla y sus consecuencias normalmente no están relacionados con decisiones y rendimientos humanos. Esto nos conduce a concluir que existen muchos productos y sistemas modernos cuyo funcionamiento operativo depende de la efectividad conjunta de los factores siguientes:

- El equipo físico (hardware);
- Los operadores humanos;
- El software;
- Los protocolos de gestión.

Es razonable y prudente la evaluación de todos estos factores en el estudio del comportamiento de los sistemas. Enumeremos las ventajas que reporta el estudio de la fiabilidad:

1/ La duración de un dispositivo, como indicamos al comienzo del epígrafe, está determinada por su diseño. Los métodos modernos de diseño están basados generalmente en descripciones científicas y sobre todo matemáticas de los requerimientos y del rendimiento. La fiabilidad es una de las características del rendimiento de un sistema que se trata analíticamente en el proceso de diseño. La precisión en la evaluación de la fiabilidad de un diseño propuesto depende del conocimiento relativo al proceso de los fallos del producto;

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

3/ La prevención de accidentes es fundamental. La fiabilidad es claramente un factor esencial en la seguridad de un producto.

En síntesis, para lograr los objetivos de un rendimiento funcional adecuado, limitación de los costes del ciclo de vida y seguridad, la fase de diseño es el momento en que puede lograrse una influencia importante sobre los mismos.

Un par de ejemplos tomados del mundo del automóvil serán suficientes para poner de manifiesto la importancia de la fiabilidad:

→ Dos roturas en el semieje trasero, que transmite potencia a las ruedas propulsoras, obligaron a los dos pilotos del equipo Renault a retirarse de una carrera de Fórmula 1 en el circuito de Indianápolis. El patrón del equipo declaró que revisarían el diseño, ya que *“la fiabilidad es la clave del éxito”*;

→ Recientemente, el fabricante de la marca Mercedes ha declarado que volverá a apostar por la sencillez (la filosofía norteamericana de “*Keep it simple*”) en el diseño de las funciones electrónicas de sus modelos para “*superar a BMW y Audi en fiabilidad*”. La marca alemana ha eliminado de sus vehículos 600 funciones electrónicas, ya que el elevado número de componentes electrónicos necesarios era responsable de la mayoría de los fallos que aquejaron a los vehículos Mercedes Benz entre los años 2.001 y 2.003, con el consiguiente coste de reparación a cargo del fabricante y la pérdida de reputación de la marca.

La razón de estos fallos hay que buscarla en la política de reducción de costes de la compañía: la subcontratación⁴ de la producción de piezas y en el hecho de que no todos los fabricantes tenían estándares de calidad tan estrictos como los de la compañía de *Stuttgart*. El problema se ha resuelto exportando técnicos a sus proveedores de componentes con el fin de garantizar la calidad y fiabilidad de los mismos.

La interacción entre fiabilidad y economía⁵ se produce en todos los aspectos de la Ingeniería. La modelización y análisis de esta relación resulta bastante compleja debido a la necesidad de cuantificar el coste del fallo, que debería incluir tanto el equivalente monetario de aspectos no cuantificables en estos términos, como el coste incurrido en la mejora de la fiabilidad.

El fallo de un equipo está asociado a las consecuencias indeseables que pueden ser traducidas a términos económicos. Por ejemplo, el coste de un día de inactividad en una central nuclear puede alcanzar la cifra de 1.000.000 \$ aún si el reactor no sufre daño alguno y no se ha producido fuga de radioactividad. En caso de accidentes más graves, como el ocurrido en *Chernobyl* (antigua URSS) o la planta química de *Bhopal* (India), el coste total asociado al fallo es incalculable y sus efectos perduran durante años.

Mejorar la fiabilidad de un sistema cuesta dinero y se justifica económicamente si la disminución esperada del coste debido al fallo es, al menos, igual al aumento de coste debido a la mejora de fiabilidad. En el pasado, sólo las industrias de alta tecnología (básicamente la industria aeroespacial y de defensa) se preocupaban de este aspecto; sin

⁴ En terminología del mundo empresarial, “*outsourcing*”

⁵ Engineering Reliability. Fundamentals and Applications (capítulo 9)

embargo, hoy en día la alta tecnología está presente también en la vida cotidiana. **La necesidad de mantener altos niveles de productividad y competitividad en los mercados internacionales, hace que el esfuerzo en mejorar la fiabilidad se convierta en una necesidad estratégica.**

Capítulo III

MANTENIMIENTO

“El avión no es más que un montón de barras, cables y telas, una herramienta para aprender sobre el cielo y sobre la clase de persona que soy, cuando vuelo. Un avión significa libertad, juego, el poder de entender y demostrar que conoces; esas cosas no son destructivas.”

Richard Bach⁶

3.1 FUNCIONALIDAD Y FUNCIONABILIDAD

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

Pero no sólo se espera de un sistema dado que realice una función especificada, sino también que satisfaga unas prestaciones especificadas. Por tanto, un hervidor que necesite, por ejemplo, 45 minutos para calentar un litro de agua hasta que hierva, no ofrecerá una prestación satisfactoria para ciertos usuarios (demasiado tiempo de espera). La expresión “prestación satisfactoria” es una descripción común para los requisitos que el sistema deberá satisfacer mientras realice la función especificada.

En la mayoría de las ocasiones, los requisitos de prestaciones estarán relacionados con el tamaño, volumen, forma, capacidad, caudal, velocidad, aceleración y muchas otras características físicas y operativas. La mayoría son numéricamente cuantificables, pero quedan otras que sólo se pueden describir de forma cualitativa. En cualquier caso, deberán estar bien definidas y requeridas.

⁶ Piloto y novelista, famoso por su novela ‘Jonathan Livingston Seagull’.

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

Por consiguiente, para la satisfacción de necesidades se deben reunir los aspectos de funcionalidad, prestaciones y condiciones operativas a fin de obtener una imagen completa del sistema que satisfaga la necesidad. De esta forma, aparece el concepto de **funcionabilidad** como mecanismo de unión de estos tres aspectos, definiéndolo como:

La capacidad inherente de un ítem para desempeñar una función requerida con unas prestaciones concretas, cuando es utilizado según se especifica.

En la definición anterior, la palabra inherente sirve para recalcar que todas las decisiones relacionadas con la funcionabilidad de un sistema se toman en la fase de diseño. Por ejemplo, un vehículo motorizado *funcionable* es aquél que desempeña una función de transporte satisfaciendo unas prestaciones especificadas como: velocidad, consumo de combustible y aceite, aceleración, carga (número de pasajeros y equipaje), comodidad y muchas otras características, cuando es utilizado bajo condiciones operativas especificadas (tipo de superficie de rodadura, configuración del terreno, temperatura exterior, octanaje del combustible, etc.)

Leyendo con detenimiento la definición, resulta evidente que **hay una diferencia significativa entre funcionalidad y funcionabilidad** de un sistema en consideración. **La primera está relacionada puramente con la función desempeñada, mientras que la segunda toma en consideración el nivel de prestaciones obtenido.** Por ejemplo, con el discurrir del tiempo, la mayoría de los motores consumen más cantidad de combustible que cuando entraron en servicio. Por consiguiente, aunque los vehículos con motores usados desempeñan aún la función de transporte, el nivel de prestaciones obtenido (consumo de combustible y aceite, velocidad máxima y demás) no estará a la altura del nivel de un motor nuevo.

3.2 DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO

A pesar de que un sistema sea *funcionable* al comienzo de su vida operativa, todo usuario es consciente de que, independientemente de la perfección del diseño de un sistema, de la tecnología de su producción o de los materiales empleados en su fabricación, durante su vida operativa se producirán unos cambios irreversibles.

Estos cambios son el 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, provocando un cambio en el sistema a consecuencia del cual se modificarán sus características de actuación. La desviación de esas características respecto a los valores especificados se considera un fallo del sistema.

Hay multitud de sistemas creados por el hombre cuya *funcionabilidad* debe ser conservada por el usuario a lo largo de su utilización. El proceso de **mantenimiento** se define como:

El conjunto de tareas de mantenimiento realizadas por el usuario para mantener la funcionabilidad del sistema durante su vida operativa.

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.

3.3 RELACIÓN ENTRE FIABILIDAD Y MANTENIMIENTO

La fiabilidad de un equipo o sistema mantenible es función de la política de mantenimiento que se le aplique y del grado de perfección con que se realicen las acciones de mantenimiento correspondientes.

Hay dos categorías básicas de mantenimiento:

- Preventivo (planificado);
- Correctivo (forzado)

El primero de ellos se lleva a cabo a intervalos constantes de tiempo, aun si el sistema todavía trabaja satisfactoriamente. Tal proceso prolonga la vida de los componentes, reduciendo el número de fallos e incrementando el MTTF del sistema. Por otra parte, para componentes con tasa de fallos creciente, el mantenimiento preventivo periódico incrementa el tiempo medio hasta el fallo, resultando funciones de densidad de fallos exponenciales.

El mantenimiento correctivo sigue a los fallos en servicio; en otras palabras, no se hace nada hasta que el sistema falla. Tan pronto como éste ocurre, se efectúa una sustitución, ajuste o reparación de componentes para restaurar el sistema a la operación normal.

En el caso de sistemas con redundancia en paralelo, todos los componentes deben fallar para que el sistema falle. El fallo de uno de ellos no será detectado y corregido a menos que se haya previsto inspecciones periódicas y mantenimiento preventivo. Es bastante obvio que el MTTF será mayor si el número de inspecciones periódicas aumenta; por el contrario, si el mantenimiento no se realiza adecuadamente, es posible que el MTTF sea menor que el valor teórico calculado para el sistema.

El mantenimiento puede variar desde la simple reparación de averías hasta un cuidadoso programa de eliminación de los efectos del desgaste para mantener una tasa de fallo lo más reducida posible. Cualquier acción de mantenimiento correctivo o preventivo puede, por su parte, inducir fallos, por incorrecta ejecución o introducción de un componente con defectos de origen.

La fiabilidad es un atributo de diseño, no haciendo el mantenimiento más que evitar en lo posible su degradación.

3.4 FIABILIDAD Y MANTENIBILIDAD

Fiabilidad y mantenibilidad son consideradas a menudo disciplinas complementarias. Para comprender la razón, consideremos la ecuación que define la **disponibilidad inherente (A_i)**; *refleja el porcentaje de tiempo que un producto estaría disponible si no se produjeran retrasos debido a tareas de mantenimiento, recepción de suministros, etc., es decir, a problemas no relacionados con el diseño:*

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

Si el producto no fallase nunca, el MTBF sería ∞ y $A_i = 100\%$; por otra parte, si no llevase ningún tiempo la reparación, MTTR sería cero y de nuevo la disponibilidad sería del 100%. Un determinado nivel de disponibilidad puede ser alcanzado con diferentes valores de *fiabilidad* (MTBF) y *mantenibilidad* (MTTR)

Cuando la fiabilidad decrece, se necesita mejorar la mantenibilidad para lograr la misma disponibilidad y viceversa. Esta relación complementaria es importante porque significa que, si alcanzar un determinado nivel de fiabilidad fuese demasiado costoso o técnicamente difícil, es posible alcanzar una disponibilidad dada incrementando los requerimientos de mantenibilidad y viceversa.

3.5 MANTENIMIENTO Y DISPONIBILIDAD

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

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 fabricar las cosas extremadamente fiables y, en consecuencia, costosas. El segundo es suministrar un sistema que, cuando falle, sea fácil de recuperar. De esta forma, si todo lo fabricado es muy fiable y todo es fácil de reparar, el fabricante obtiene un sistema muy eficaz, pero que pocos pueden permitirse comprar.

Entonces, le pregunta es: ¿cuánto se necesita la utilidad del sistema y cuánto está uno dispuesto a pagar por ella?

El mantenimiento ha de llevarse a cabo durante los tiempos de inmovilización programados, bien durante paradas cortas entre ciclos de operación (vuelos, viajes, cargas o descargas, etc.), durante una parada nocturna o en paradas más prolongadas. Valga como ejemplo de la importancia de este proceso lo siguiente:

El periódico británico *Daily Mail* informaba el 13 de diciembre de 1.990, 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 emplea en mantenimiento 8 años de los 22 de su vida media y sólo la mitad de los restantes 14 años se utiliza en la mar*”.

3.6 MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD

La ejecución de cualquier tarea de mantenimiento está asociada con un cierto riesgo, tanto por la realización incorrecta de una tarea de mantenimiento específica, como por lo que se refiere a las consecuencias que su implementación puede acarrear en otro componente del sistema, esto es, la posibilidad de inducir un fallo en el sistema durante el mantenimiento.

Sirvan los siguientes ejemplos como ilustración de lo expuesto:

- En Chicago, un motor de un DC-10 se desprendió debido a una fatiga en una fijación de motor agrietada, producida a causa de un método incorrecto de izado. Tras el accidente, el avión impactó sobre su cola después del despegue y se estrelló en un aparcamiento de caravanas, resultando muertos los 272 ocupantes y 2 personas en tierra;
- 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, 7 de los cuales obligaron a efectuar aterrizajes no programados. Fue un típico caso de desidia y autosuficiencia del personal de mantenimiento.

3.7 MANTENIMIENTO Y ECONOMÍA

La realización de cualquier tarea de mantenimiento está asociada a unos costes, tanto en términos de recursos de mantenimiento, como de los costes de las consecuencias de no tener el sistema disponible para la operación. Por lo tanto, **los departamentos de mantenimiento son uno de los mayores centros de coste**, que suponen a la industria millones de euros cada año, habiéndose convertido así en un factor crítico en la ecuación de rentabilidad de muchas compañías.

Los costes pueden clasificarse en varias categorías:

COSTES FIJOS y VARIABLES:

Los *costes fijos* son aquellos que se producen sin tener en cuenta el número de tareas de mantenimiento realizadas (p.e., 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 en 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 a la mano de obra y material empleado.

COSTES DIRECTOS e INDIRECTOS:

Los *costes directos* son aquellos que pueden atribuirse claramente a cada tarea. Los costes directos de material y mano de obra se denominan también costes de producción.

El *coste directo asociado con cada tarea de mantenimiento*, CMT, está relacionado con el *coste de los recursos de mantenimiento*, CMR, utilizados directamente durante la ejecución de la tarea:

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

C_s = Coste de los repuestos (stock)

C_m = Coste del material

C_p = Coste del personal

C_{te} = Coste de las herramientas y equipo

C_f = Coste de las instalaciones (fijos)

C_d = Coste de los datos técnicos

Es necesario recalcar que el tipo y cantidad de todos los recursos de mantenimiento son consecuencia del diseño del elemento o sistema y se estudian durante el análisis de mantenibilidad⁷ del proceso de diseño. El *coste del personal* ligado a una tarea de mantenimiento específico es función de las siguientes variables:

$$C_p = f (DMT_p , HCP)$$

siendo:

DMT_p: representa el tiempo empleado en mantenimiento para el que se finalizará un porcentaje dado de las tareas de mantenimiento consideradas.

HCP: representa el valor monetario del coste horario del personal empleado en la ejecución de una tarea específica de mantenimiento.

Por lo tanto, la expresión general del *coste de cada tarea de mantenimiento* depende de los valores porcentuales de la variable aleatoria DMT:

$$CMT_p = C_s + C_m + C_{te} + C_f + (DMT_p \times HCP) \quad (3.1)$$

⁷ Mantenibilidad: es la característica inherente de un elemento asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria según se especifica.

donde las expresiones porcentuales de la duración de las tareas de mantenimiento vienen definidas completamente por las distribuciones teóricas disponibles.

La representación gráfica de la ecuación (3.1) es la siguiente:

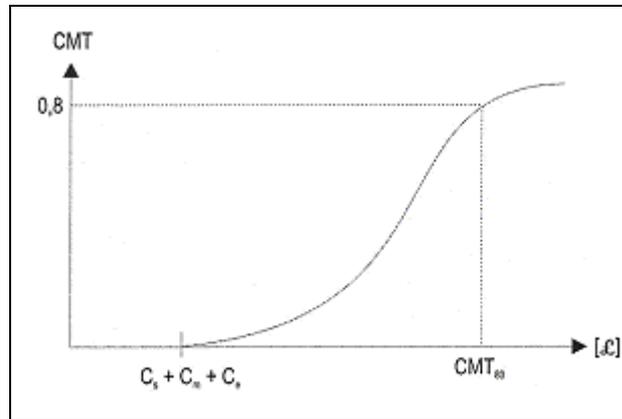


Fig.3.1 Coste de la tarea de mantenimiento como variable aleatoria

Por otro lado, los *costes indirectos* son difíciles de asignar a actividades particulares. Si la actividad de mantenimiento encaja en este tipo, la contabilidad asigna una cantidad proporcional de los costes a los productos fabricados o servicios realizados. Como métodos corrientes para la distribución podemos citar:

- La cantidad por hora de mano de obra directa;
- Un porcentaje del coste de mano de obra directa;
- Un porcentaje del coste de producción (material directo + mano de obra directa)

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, estos costes son no recurrentes a lo largo de la vida del elemento.

COSTE de OPORTUNIDAD:

El mantenimiento acarrea costes, pero las consecuencias que florecen al no efectuar el mantenimiento dan lugar a 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 que más tarde abordaremos. Sirva el siguiente ejemplo como muestra de la importancia de los costes de mantenimiento:

Dos tipos de aviones que se han utilizado ampliamente en la industria de líneas aéreas son el *Boeing 747* (entró en servicio en 1.970) y el *Boeing 757* (éste en 1.982) 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.

A continuación se detallan los costes de ambos aviones para los cuatro operadores más importantes de los EE.UU. (*Northwest, Pan American, Trans World y United Airlines*) en el año 1.986.

<i>Categoría de Coste</i>	<i>B-747</i>	<i>%</i>	<i>B-757</i>	<i>%</i>
<i>Tripulación</i>	787	17	504	23
<i>Combustible</i>	2.030	44	720	32
<i>Depreciación y alquileres</i>	672	14	596	27
<i>Total Mantenimiento</i>	1.117	24	377	17
<i>Otros</i>	36	1	31	1
<i>TOTAL</i>	4.642	100	2.228	100

Tabla 3.1. Costes para B-747 (121 aviones) y B-757 (62 aviones)

3.8 DURACIÓN DE LA TAREA DE MANTENIMIENTO

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

Factores personales:

Representan la influencia de la habilidad, motivación, experiencia, actitud, capacidad física, formación y otras características relacionadas con el personal implicado.

Factores condicionales:

Representan la influencia del entorno operativo y las consecuencias que ha producido el fallo en la forma, geometría y demás características del elemento o sistema sometido a mantenimiento.

Factores de entorno:

Reflejan la influencia de aspectos como temperatura, humedad, ruido, iluminación, etc., en el personal de mantenimiento durante la ejecución de la tarea.

Consecuentemente, la única forma de evaluar el impacto de todos estos factores sobre la duración de las tareas de mantenimiento, consiste en utilizar 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 y su distribución de probabilidad.

En los siguientes apartados estudiaremos las características más usadas para su descripción cuantitativa.

3.9 FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD

Conocida por $M(t)$, es la función de distribución de la variable aleatoria DMT. Representa la probabilidad de que la tarea de mantenimiento considerada se realice satisfactoriamente en un tiempo especificado t (tiempo de ineptitud total dado), o antes.

$$M(t) = P(DMT \leq t) = \int_0^t m(t) \cdot dt$$

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

La *tabla 3.3.* muestra $M(t)$ para algunas distribuciones conocidas, donde A_m , B_m y C_m son los parámetros de escala, forma y origen de la distribución de probabilidad; Φ es la *función normal de Laplace*, cuyo valor puede encontrarse fácilmente en la literatura de fiabilidad y mantenibilidad⁸.

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 3.2. Función $M(t)$ para distribuciones teóricas conocidas

3.10 TIEMPO EMPLEADO EN MANTENIMIENTO

Simbolizado por DMT_p , *representa el tiempo empleado en terminar un porcentaje dado de las tareas de mantenimiento consideradas.* Es la abscisa del punto cuya ordenada presenta un porcentaje de recuperación dado.

⁸ Knezevic, J, *Reliability, Maintainability & Supportability Engineering –A Probabilistic Approach*, pág.292, Mc Graw Hill, Londres ,1.993.

El más utilizado es el tiempo DMT_{90} , que representa la duración del tiempo de recuperación para el que el 90% de los trabajos de mantenimiento han finalizado.

$$DMT_{90} = t \rightarrow M(t) = P(DMT \leq t) = \int_0^t m(t) \cdot dt = 0,9$$

En contratos para el sector de defensa, el valor numérico de DMT_{95} se adopta como tiempo máximo de reparación, representándose por M_{max} .

3.11 DURACIÓN ESPERADA DEL MANTENIMIENTO

Conocida como MDMT, representa la esperanza de la variable aleatoria DMT. Matemáticamente:

$$MDMT = E(DMT) = \int_0^t t \cdot m(t) \cdot dt$$

La tabla adjunta muestra la duración esperada del tiempo de mantenimiento para varias distribuciones conocidas, donde Γ es el símbolo de la función gamma.

Distribución	Expresión
Exponencial	A_m
Normal	A_m
Lognormal	$\exp(A_m + 0,5 \cdot B_m^2)$
Weibull	$A_m \cdot \Gamma(1 + 1/B_m)$

Tabla 3.3. Tiempo medio de mantenimiento para distribuciones conocidas

La representación gráfica de una hipotética función de mantenibilidad sería la siguiente:

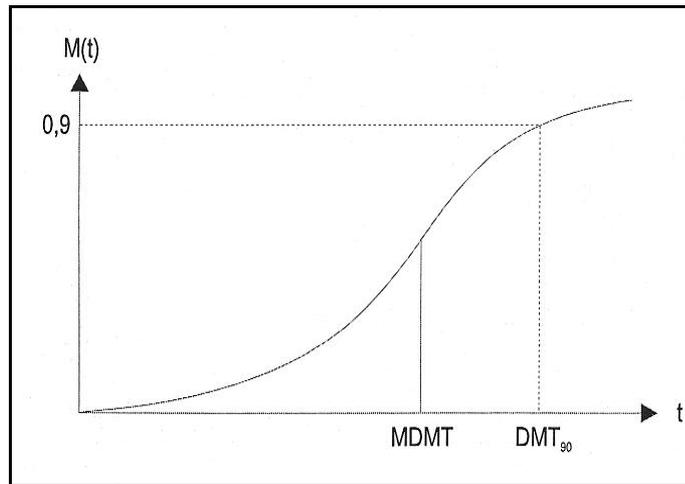


Fig.3.2. Medidas de mantenibilidad

Capítulo IV

MANTENIMIENTO CORRECTIVO

“He dicho a menudo que el atractivo de volar es el atractivo de la belleza; que la razón de volar es la apelación a la estética.”

Amelia Earhart⁹

4.1 DEFINICIÓN

En el mantenimiento correctivo *se reparan o sustituyen los dispositivos fallados a fin de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema considerado*, por lo que también se conoce como mantenimiento por reparación; sus acciones tienen lugar sólo cuando se produce un fallo.

Por lo general, esta política se aplica a elementos cuya pérdida de funcionabilidad no repercute en la seguridad del usuario y/o del entorno, o en las consecuencias económicas del fallo.

Las actividades de mantenimiento correctivo son los trabajos que se realizan con intención de recuperar la funcionalidad del elemento o sistema, tras la pérdida de su capacidad para realizar la función o las prestaciones que se requieren. La **duración total** se desglosa de la siguiente manera:

$\Sigma DMT^c = \text{Detección del fallo} + \text{localización del fallo} + \text{desmontaje} + \text{recuperación ó sustitución} + \text{montaje} + \text{pruebas} + \text{verificación}$

El esquema del proceso de este tipo de mantenimiento es muy sencillo:

⁹ Fue la primera mujer en volar sobre el Océano Atlántico en solitario (20 de mayo de 1.932)

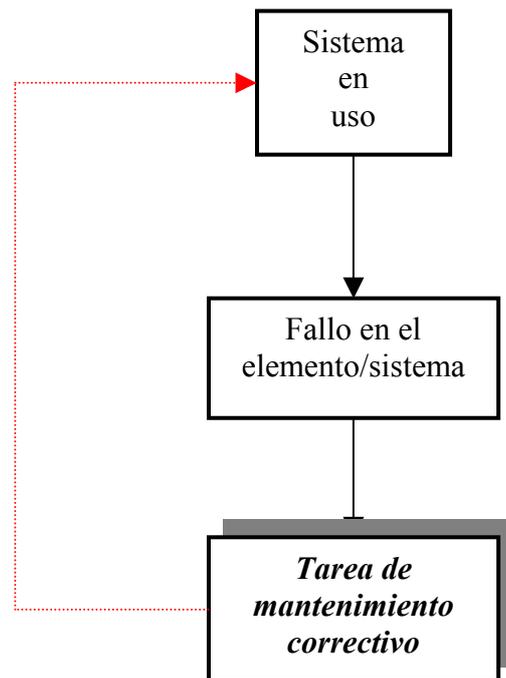


Fig.4.1. Diagrama de flujo del mantenimiento correctivo

4.2 VENTAJAS

El principal atractivo de este tipo 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* (MTTM) es idéntico al *tiempo medio hasta el fallo* (MTTF). En consecuencia, el *coeficiente de utilización de los elementos considerados*, CU, valdrá siempre 1.

$$CU = \frac{MTTM}{MTTF} = 1$$

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

donde:

R(t) = Función de fiabilidad

siendo:

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

$f(t)$ representa la función de densidad de la variable aleatoria conocida como *tiempo hasta el fallo* (TTF)

Dado que los fallos están perfectamente definidos, no hay necesidad de disponer de instrumentación dedicada a testing, ni de personal especialmente adiestrado en esta materia.

4.3 INCONVENIENTES

Podemos resumirlos en dos puntos:

- ✓ El fallo de un elemento puede a su vez acarrear daños a otros elementos del sistema o al sistema mismo (impacto en la seguridad) Los análisis de los costes de mantenimiento han demostrado que una reparación realizada tras un fallo, será normalmente 3 ó 4 veces más cara que si se hubieran realizado tareas de mantenimiento preventivo¹⁰;
- ✓ 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,...) Esto supone una mayor cantidad de inventario (repuestos) si se quiere minimizar el tiempo de reposición.

Por tanto, el mantenimiento correctivo puede llegar a ser más costoso, debido al coste directo de recuperación de la funcionalidad del sistema y al coste indirecto incurrido como resultado de la pérdida de producción, prestigio e incluso vidas.

¹⁰ Mobley, R.K., 'The Horizons of Maintenance Management', Maintenance Handbook, 5ª Edición, Mc. Graw-Hill, New York, 1.994.

4.4 MODELO DE REPARACIÓN IDEAL

La reparación ideal presupone dos condiciones:

- 1/ La duración de la tarea de reparación después de cada fallo es muy pequeña si se compara con el tiempo entre fallos (se puede asumir que es igual a 0);
- 2/ Tras la reparación, el componente es restaurado a la condición de “como nuevo”.

Un buen ejemplo de reparación ideal es la sustitución de un componente fallado por uno nuevo, empleando en la operación un tiempo considerado despreciable.

Hay una diferencia fundamental entre una reparación ideal y un mantenimiento programado ideal: mientras el segundo tiene lugar a intervalos predeterminados durante los cuales el componente está todavía en condiciones de operar, la reparación ideal siempre sigue a un fallo y el momento en el que éste se produce es aleatorio.

Asumiremos que el *tiempo de vida* (T) del componente es una variable aleatoria continua con la siguiente función de densidad:

$$f_T(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[t < T \leq (t + \Delta t)]$$

La función de densidad denominada “*tiempo hasta el primer fallo*” es igual a ésta, es decir: $f_1(t) = f_T(t)$

La cuestión que se nos plantea es: ¿cuál será la función de densidad $f_2(t)$, esto es, *tiempo hasta el segundo fallo*?

Supondremos ahora que el primer fallo ocurre en las proximidades de τ . Entonces, la *probabilidad de un segundo fallo* en $(t, t + \Delta t)$, $t > \tau$, para un τ dado, es:

$$f_2(t) \cdot \Delta t = [f_1(\tau) \nabla \tau] \cdot [f_1(t - \tau) \Delta t]$$

puesto que la *duración de la segunda vida útil* es $(t - \tau)$ En el límite, considerando todos los posibles valores de τ menores que t , obtenemos:

$$f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) \cdot f_1(t - \tau) \cdot d\tau$$

Argumentos similares nos conducen a la función de densidad para la variable aleatoria continua denominada “*tiempo total hasta el k-ésimo fallo*”:

$$f_k(t) = \int_0^t f_{k-1}(\tau) \cdot f_1(t - \tau) \cdot d\tau ; \quad k \geq 2$$

Cuando se consideran todos los fallos - 1º, 2º, 3º, etc.- la probabilidad de que ocurra algún fallo en $(t, t + \Delta t)$ es la suma de las probabilidades de que ocurra un primero, segundo, tercero, etc., fallo en el intervalo considerado.

Sea $L(t)$ la *función de densidad de que ocurra algún fallo con reparación ideal*. Entonces:

$$L(t) \cdot \Delta t = \text{Probabilidad de que ocurra algún fallo en } (t, t + \Delta t)$$

$$L(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P[\text{algún fallo en } (t, t + \Delta t)] = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t)$$

ó, también:

$$L(t) = f_1(t) + \sum_{k=2}^{\infty} \int_0^t f_{k-1}(\tau) \cdot f_1(t - \tau) \cdot d\tau \tag{4.1}$$

La *fig. 4.2.* ilustra la naturaleza de $f_k(t)$ para $k = 1, 2, 3, \dots$ y $L(t)$. La altura se corresponde con el valor de k ; la anchura y oscilación es la forma de $f_k(t)$, indicando una acumulación de incertidumbres previas a los momentos de fallo.

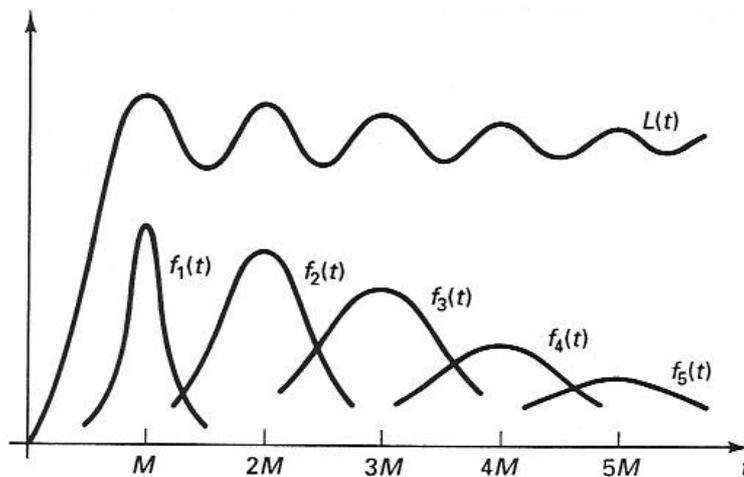


Fig. 4.2. Densidad efectiva de fallos para un componente con reparación ideal

Caso especial:

Si el tiempo entre fallos se distribuye exponencialmente, entonces $f_k(t)$ sigue la distribución *Erlangian*, que es igual a la distribución *gamma* con un valor entero de β . Llegaremos a esa conclusión mediante el cálculo siguiente:

$$f_1(t) = f_\tau(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

$$f_2(t) = \int_0^t (\lambda \cdot e^{-\lambda \tau}) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda(t-\tau)} \cdot d\tau = \lambda^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda t}$$

$$f_3(t) = \int_0^t (\lambda^2 \cdot \tau \cdot e^{-\lambda \tau}) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda(t-\tau)} \cdot d\tau = \lambda^3 \cdot \frac{t^2}{2} \cdot e^{-\lambda t}$$

El modelo puede ser ahora reconocido, por lo que:

$$f_k(t) = \lambda^k \cdot \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} \cdot e^{-\lambda t}$$

que es una distribución gamma con:

$$\beta = k, \quad \alpha = \frac{1}{\lambda}$$

La función de densidad $L(t)$, que indica la *probabilidad de fallo en caso de reparación ideal*, es:

$$L(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) = (\lambda \cdot e^{-\lambda t}) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\lambda \cdot t)^{k-1}}{(k-1)!} = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \cdot e^{\lambda t}$$

luego:

$$L(t) = \lambda$$

Conclusión:

Como cabría esperar, la densidad de fallos para un componente con una esperanza de vida distribuida exponencialmente y con reparación ideal, es constante e igual a λ , el inverso de su esperanza de vida media; λ es la tasa constante de fallos.

Capítulo V

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

“Para cualquiera de nosotros es bastante duro planificar el curso de una acción y ceñirse a él, particularmente si contrariamos con ello a alguno de nuestros amigos; pero es doblemente duro para un aviador permanecer en Tierra esperando el momento de volver a volar.”

Glenn Curtis¹¹

5.1 DEFINICIÓN

Este tipo de mantenimiento, *tiene por finalidad prevenir la ocurrencia de fallos que aún no se han producido*. Sus acciones son de 2 tipos principales:

- Acciones de prevención de fallos incipientes detectados por inspección;
- Acciones de rutina, como atenciones de lubricación, reapriete, reglaje, etc., de las partes que lo requieran y reposición de dispositivos susceptibles al desgaste a intervalos preestablecidos.

Tanto las inspecciones como las acciones de rutina se ajustan a un programa, por lo que **al mantenimiento preventivo se le conoce también por mantenimiento programado**. Esta técnica aplica la experiencia acumulada (estadística de fallos) a la identificación de un modelo de degradación con el fin de aplicar acciones específicas de mantenimiento y que el ítem vuelva a un nivel deseable de actuación.

El *tiempo para efectuar el mantenimiento*, T_p , 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.

Este mantenimiento puede aplicarse a ítems que cumplan alguno de los siguientes requisitos:

¹¹ Fue pionero en diseñar aviones y motores a finales del siglo XIX.

- Al realizar la tarea se reduce la probabilidad de fallos futuros;
- El coste total de aplicar este mantenimiento es sustancialmente menor que el de optar por el mantenimiento correctivo;
- La observación de la condición del elemento no es técnicamente factible o es económicamente inaceptable.

Las tareas de mantenimiento preventivo se realizan para reducir la probabilidad de fallo del ítem o para maximizar el beneficio operativo. Una tarea típica de este tipo de mantenimiento consta de las siguientes actividades:

$$\Sigma DMT^p = \text{desmontaje} + \text{recuperación o sustitución} + \text{montaje} + \text{pruebas} + \text{verificación}$$

Conviene subrayar que estas tareas se realizan a intervalos fijos, como por ejemplo, cada 3.000 horas de operación o 500 aterrizajes, al margen de la condición real del ítem.

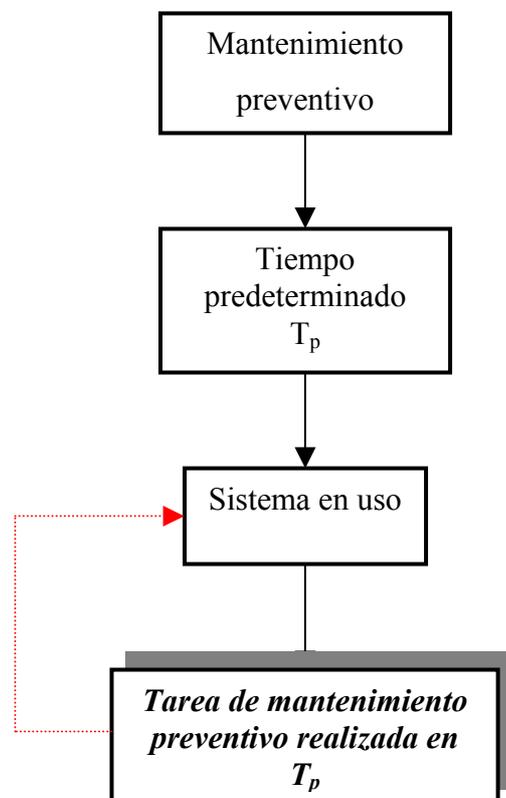


Fig.5.1. Diagrama de flujo del mantenimiento preventivo

En la tabla adjunta se presenta un ejemplo típico de tipos y frecuencias de tareas de mantenimiento preventivo llevado a cabo por una mayoría de operadores de aviones comerciales de gran tamaño¹².

TIPO	Frecuencia (horas de vuelo)	Duración (días empleados)
<i>Revisión mayor</i>	18.000	25 – 30
<i>Revisión intermedia</i>	4.500	9
<i>Revisión de servicio</i>	800 – 3.000	1-2
<i>Revisión en línea de vuelo</i>	125 – 500	0,3

Tabla 5.1. Tipología de mantenimiento preventivo en la industria aeronáutica

5.2 VENTAJAS

Una de las principales ventajas de esta política de mantenimiento estriba en 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 es la de evitar la producción de fallos que, en algunos casos, pueden tener consecuencias catastróficas para el usuario o explotador y para el entorno; el intervalo entre fallos es mayor aplicando esta estrategia de mantenimiento.

5.3 INCONVENIENTES

A pesar de las ventajas presentadas en el párrafo anterior, el mantenimiento preventivo tiene inconvenientes que deben reconocerse y minimizarse. El más significativo de todos ellos es que éste puede ser poco rentable, ya que **la mayoría de los elementos se**

¹² *Aviation Week & Space Technology* (ed. Mc. Graw-Hill)

reemplazan prematuramente, independientemente de su estado. Tradicionalmente, esta técnica se ha basado en la tasa de fallos y su recíproco, el *tiempo medio entre fallos* (MTBF); se asume que estas variables pueden ser determinadas estadísticamente y, por ello, un elemento puede ser reemplazado antes de que falle. La principal debilidad de esta hipótesis es que la tasa de fallos es un promedio; debido a ello, si se selecciona un período de tiempo específico para llevar a cabo el mantenimiento en un componente con un patrón de fallo aleatorio, muy probablemente resulte ineficaz. Para determinados ítems, aunque el fallo esté relacionado con la edad, la probabilidad de que ocurra no experimenta cambios bruscos, por lo que la hipótesis de un punto de inflexión en la gráfica queda descartada (cambio brusco de pendiente en la curva)

El *coeficiente de utilización* del elemento o sistema considerado, CU, definido como:

$$CU^p = \frac{MTTM}{MTTF} \ll 1$$

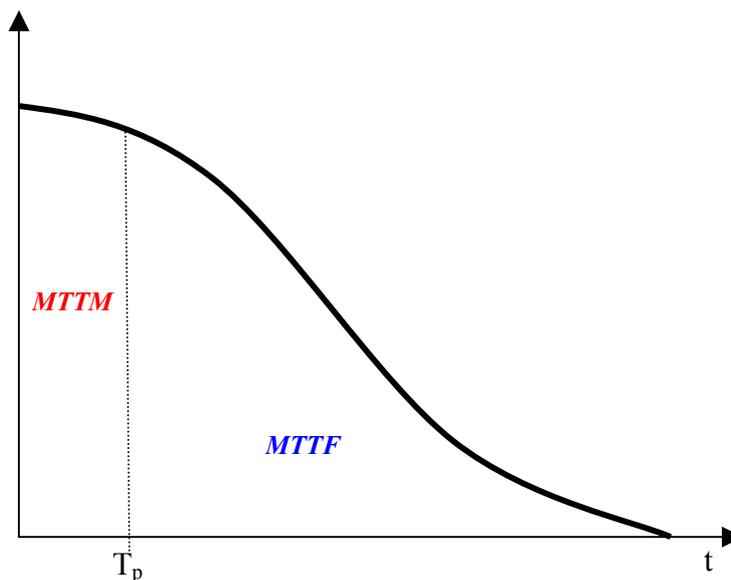


Fig. 5.2. Relación entre MTM y MTTF

En esta expresión, MTM es el tiempo medio hasta el mantenimiento, que se define como:

$$MTM = \int_0^{T_p} DMT \cdot dt \ll MTTF$$

Otra desventaja es que una incorrecta ejecución de las tareas de mantenimiento crea a menudo más problemas que si el mantenimiento no hubiera sido realizado; más aún, aunque los trabajos se hubiesen ejecutado de acuerdo a los procedimientos establecidos, las estadísticas muestran que si aquellos consistieron en retornar el equipo a la condición de “nuevo”, en el 72% de las ocasiones¹³ estas acciones provocarán “mortalidad infantil”¹⁴ en estos elementos.

5.4 MODELO IDEAL DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Consideremos un componente no reparable pero susceptible de mantenimiento preventivo; éste se considerará “ideal” en el caso de que conlleve un tiempo mucho menor al intervalo entre mantenimientos y si el componente es restaurado a la condición “como nuevo”. Aunque el componente no sea reparable y se deseché una vez falle, la justificación del mantenimiento preventivo es prolongar la vida útil del mismo y posponer su fallo.

Si el componente presenta probabilidad de fallo constante, su tiempo hasta el fallo sigue una distribución exponencial. En este caso, el mantenimiento preventivo es irrelevante.

Si el componente presenta una probabilidad de fallo decreciente, significa que mejora a medida que el tiempo avanza, por lo que el mantenimiento preventivo sería desaconsejable.

El mantenimiento preventivo es útil sólo si el componente presenta una probabilidad de fallo creciente. Como la mayoría de componentes mecánicos pertenecen a esta categoría, el resto del epígrafe asume que los componentes tienen riesgo de fallo creciente.

Sea,

$$f_T(t) = \text{función densidad de fallos}$$

$$T_M = \text{intervalo de tiempo fijo entre tareas de manten.}$$

¹³ *NASA Reliability Centered Building & Equipment Acceptance Guide*, January 2001.

¹⁴ Definida como fallos a muy temprana edad debidos a nueva instalación o restauración por mantenimiento preventivo.

$$f_1(t) = \begin{cases} f_T(t) & \text{para } 0 < t \leq T_M \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$R(t)$ = función de fiabilidad del componente

entonces, la función de densidad del componente, después de considerar el mantenimiento, se puede escribir de la siguiente manera:

$$f_T^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f_1(t - kT_M) R^k(T_M) \quad (5.1)$$

Una función típica se muestra en la *figura 5.3*. El eje de abscisas (escala de tiempo) se ha dividido en segmentos iguales de duración T_M . La función $f_T^*(t)$ en cada segmento representa una gráfica a escala de la función dibujada en el intervalo anterior, con un *factor de escala* igual a $R(T_M)$; este factor es igual a la fracción de componentes que llegará al siguiente período (intervalo entre mantenimientos)

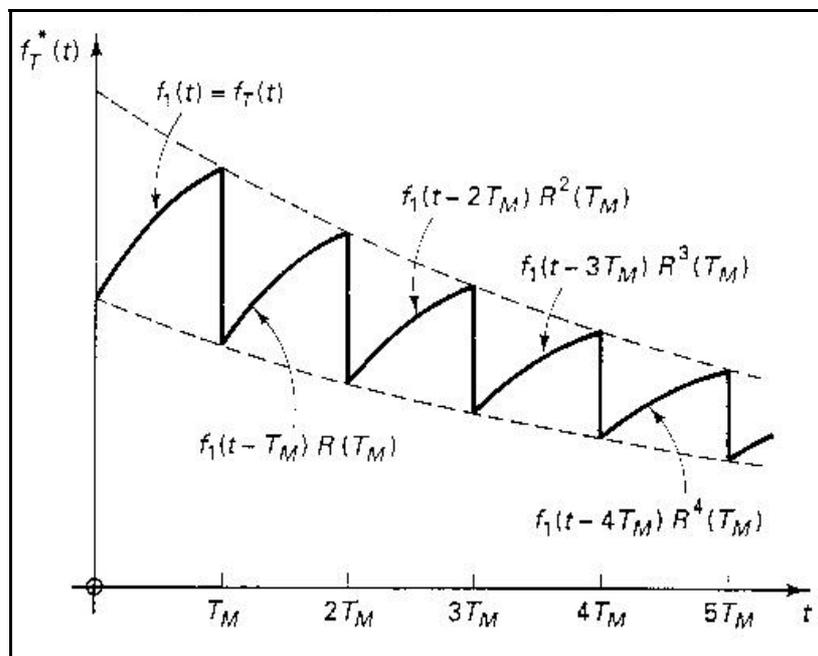


Fig. 5.3. Función de densidad con mantenimiento programado incorporado

Un examen detenido de la figura muestra que las funciones de densidad de la vida útil de componentes con mantenimiento preventivo muestran una tendencia exponencial. **El efecto del mantenimiento preventivo periódico es alterar la función de densidad de**

fallos de su forma original a una de carácter exponencial. Esta alteración es una de las justificaciones del extendido uso de las distribuciones exponenciales para modelizar la duración de los componentes. Sin el adecuado mantenimiento preventivo periódico, tal asunción no sería posible.

Es importante reseñar que en la *ecuación 5.1*, $k = 0$ se debe utilizar sólo entre: $t = 0$ y $t = T_M$; $k = 1$ entre: $t = T_M$; $t = 2T_M$, y así sucesivamente. Por ejemplo, consideremos un componente con una vida útil distribuida uniformemente:

$$f(t) = 0,25 \text{ años}^{-1}; 0 < t \leq 4 \text{ años}$$

El componente soporta un mantenimiento (ideal) con frecuencia 1 vez al año. **Calcularemos la función de densidad modificada cuando el efecto del mantenimiento es tenido en cuenta.** La *figura 5.4* muestra las funciones de densidad, distribución, fiabilidad y probabilidad de fallo para el componente sin considerar el efecto del mantenimiento.

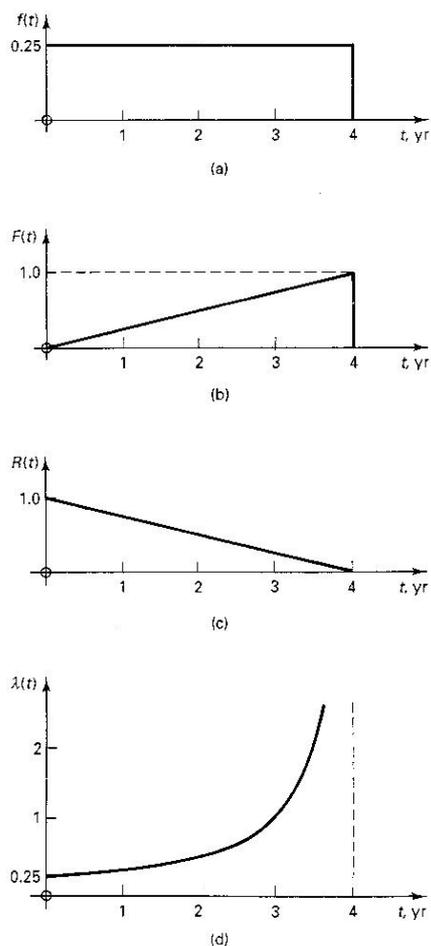


Fig.5.4. Funciones estadísticas sin el efecto del mantenimiento

$$F(t) = 0,25t \quad ; \quad 0 < t \leq 4$$

$$R(t) = 1 - 0,25t \quad ; \quad 0 < t \leq 4$$

$$\lambda(t) = \frac{0,25}{1 - 0,25t} = \frac{1}{4 - t} \quad ; \quad 0 < t < 4$$

El MTTF sin mantenimiento es igual a:

$$MTTF = \int_0^4 R(t) \cdot dt = \int_0^4 (1 - 0,25t) \cdot dt = \int_0^4 dt - 0,25 \int_0^4 t \cdot dt = 4 - 0,25 \left(\frac{t^2}{2} \Big|_0^4 \right) = 4 - 0,25 \left(\frac{4^2}{2} \right) = 2 \text{ años}$$

como $T_M = 1 \text{ año} \implies R(T_M) = 0,75$

Ahora, haciendo uso de la ecuación 5.1, obtenemos que:

$$f_T^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (0,25) \cdot (0,75)^k$$

Esta función y la correspondiente $\lambda^*(t)$ se muestran en la figura 5.5.

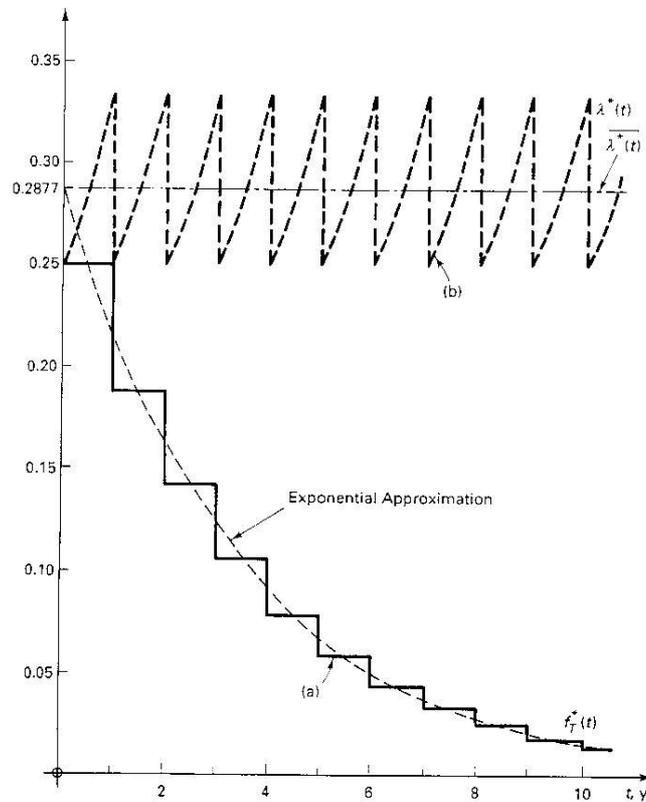


Fig.5.5. Funciones de densidad y riesgo con mantenimiento incluido

El valor medio de $\lambda^*(t)$ sería:

$$\bar{\lambda}^*(t) = \frac{1}{1} \int_0^1 \frac{dt}{4-t} = \int_3^4 \frac{d\xi}{\xi}, \quad \text{con el cambio de variable } \xi = 4-t$$

luego:

$$d\xi = -dt$$

$$\bar{\lambda}^*(t) = \int_4^3 -\frac{d\xi}{\xi} = -L\xi \Big|_4^3 = -L3 + L4 = 0,2877$$

Conclusión:

El mantenimiento periódico ha reemplazado la función de densidad original $f(t)$ por otra con una tendencia exponencial, como muestra la *figura 5.3* -aproximación exponencial a $f_T^*(t)$ -. Basándonos en este razonamiento, el MTTF es, debido al efecto del mantenimiento, igual a $\frac{1}{0,2877}$, esto es, 3,476 años, lo que representa un significativo incremento desde el valor de 2 años sin mantenimiento.

Nota: el valor exacto de MTTF, con mantenimiento incluido, es:

$$MTTF^* = \int_0^{\infty} t \cdot f_T^*(t) \cdot dt = \frac{1}{8} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (0,75)^k \cdot (2k+1) = 3,5 \text{ años}$$

Volviendo ahora al problema planteado, **si se llevase a cabo un mantenimiento correctivo con reparación ideal después de cada fallo**¹⁵, las sucesivas funciones de densidad se calcularían de la forma siguiente:

$$f_1(t) = f_T(t) = 0,25$$

¹⁵ Ver capítulo 4, apartado 4.

$$f_2(t) = \int_0^t (0,25) \cdot (0,25) \cdot d\tau = \left(\frac{1}{4}\right)^2 \cdot t$$

$$f_3(t) = \int_0^t \left(\frac{1}{4}\right)^2 \cdot \tau \cdot \left(\frac{1}{4}\right) \cdot d\tau = \left(\frac{1}{4}\right)^3 \cdot \left(\frac{t^2}{2}\right)$$

•
•
•

$$f_k(t) = \left(\frac{1}{4}\right)^k \cdot \left[\frac{t^{k-1}}{(k-1)!}\right]$$

por lo tanto:

$$L(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) = \left(\frac{1}{4}\right) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{t}{4}\right)^{k-1}}{(k-1)!}$$

ó:

$$L(t) = 0,25 \cdot e^{\left(\frac{t}{4}\right)}$$

5.5 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y REPARACIÓN IDEAL

Anteriormente vimos que, **para componentes con funciones de densidad de fallo crecientes, el mantenimiento preventivo periódico** (conocido también por mantenimiento programado) **incrementa el MTTF y presentan funciones de densidad de fallos con tendencia exponencial. Si además se incluye la posibilidad de reparación ideal, el resultado neto sería la reducción de la frecuencia de reparaciones.**

Asumiendo que el mantenimiento se realiza a intervalos T_M , la *frecuencia de reparación* f_R será igual a la *densidad media de fallos* en T_M . Esto es:

$$f_R = \frac{1}{T_M} \cdot \int_0^{T_M} L(t) \cdot dt$$

siendo:

$$L(t) = f_1(t) + \sum_{k=2}^{\infty} \int_0^t f_{k-1}(\tau) \cdot f_1(t-\tau) \cdot d\tau \quad (\text{ver ecuación 4.1})$$

cuando la frecuencia de mantenimiento aumenta, T_M disminuye y también lo hace f_R . En otras palabras, el MTTF, que es igual al recíproco de f_R , aumenta. Si éste no fuera el caso, el mantenimiento no sería de utilidad.

Volviendo al ejemplo:

Si el componente estuviera sujeto a mantenimiento preventivo a intervalos T_M y, además, se le practicara reparación ideal, obtendríamos:

$$f_R = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} 0,25 \cdot e^{\frac{t}{4}} \cdot dt$$

ó:

$$f_R = \left(\frac{1}{T_M} \right) \cdot \left[e^{\left(\frac{T_M}{4} \right)} - 1 \right]$$

que, para $T_M = 1$ año :

$$f_R = e^{\frac{1}{4}} - 1 = 0,284 \text{ por año}$$

Conclusión:

Si no sometiéramos al componente a mantenimiento preventivo, con sólo reparación ideal, la función de densidad original sería válida y, por lo tanto, el MTTF sería de 2 años:

$$MTTF = \int_0^4 R(t) \cdot dt = 2$$

De aquí concluimos que la frecuencia de reparación será:

$$f_R = \frac{1}{MTTF} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ por año}$$

Claramente, **el mantenimiento programado realizado una vez al año reduce la frecuencia de reparación** (de fallo) desde $\boxed{0,5}$ a $\boxed{0,284}$ por año.

Capítulo VI

MANTENIMIENTO POR POTENCIALES

“Eres puesto a prueba de vez en cuando por tormentas, niebla y nieve. En esa situación, piensas en aquellos que la padecieron antes que tú y te dices: si ellos pudieron hacerlo, Yo puedo hacerlo.”

*Antoine de Saint Exupéry*¹⁶

6.1 DEFINICIÓN

Fue la filosofía de mantenimiento preventivo generalmente aceptada en aviación comercial y militar hasta hace unos años. **El potencial establecido para un componente o equipo es el límite de tiempo entre revisiones generales.** Se expresa por lo general en horas de vuelo, aunque puede hacer referencia a funcionamiento en tierra o tiempo de calendario.

El mantenimiento por potenciales se basa en suponer conocido el punto en que el desgaste comienza a suponer un riesgo de fallo. Naturalmente, los dispositivos que sólo sufren fallos por azar durante su vida de servicio no deben afectarse a un potencial, ya que una revisión no reduciría su tasa de fallo. Por ejemplo, la distribución de fallos de un sistema serie de bloques exponenciales tiene una tasa de fallo constante e igual a la suma de tasas de fallo de sus bloques:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$
$$R_s(t) = e^{-\left(\sum \lambda_i\right) \cdot t}$$

siendo:

$R_s = \text{Fiabilidad}$

¹⁶ ‘Wind, Sand and Stars’, 1939.

Si todos los bloques son idénticos, con tasa de fallo λ ,

$$\lambda_s = n \cdot \lambda$$
$$R_s(t) = e^{-n \cdot \lambda \cdot t}$$
$$\theta_s = \frac{1}{n \cdot \lambda} = \frac{\theta}{n}$$

$\theta_s =$ Vida media del sistema

Un sistema de este tipo debe mantenerse exclusivamente por reparación (mantenimiento correctivo), pues su tasa de fallo no puede reducirse sin modificar el diseño o utilizar componentes más fiables.

Para los dispositivos que sufren desgaste y fallan principalmente por esta razón, la determinación de un potencial es un medio de limitar la tasa de fallo. El problema estriba en fijar el potencial.

6.2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DESDE LA FIABILIDAD

Suponiendo que conocemos la distribución de fallos por desgaste de un dispositivo y que dicha distribución es aproximadamente normal, con media θ y desviación típica σ , un método de determinación del potencial T puede ser tomar:

$$T = \theta - K \cdot \sigma$$

Dando a K un valor igual a 3, 4 ó el que se considere necesario para limitar la influencia del desgaste. Este es un método que ignora los factores económicos, siendo la fiabilidad (y la seguridad) la única consideración. Este *tiempo entre revisiones generales*, generalmente conocido en las líneas aéreas como TBO, no coincide en la práctica con el

tiempo medio entre remociones¹⁷, MTBR, por causa de las remociones prematuras (no programadas) provocadas por fallos o síntomas de fallo incipiente.

El tiempo medio entre remociones es fácil de calcular teniendo en cuenta que los ítems que llegan sin fallo al tiempo de revisión T se remueven precisamente entonces, mientras que los demás han sido removidos tras producirse el fallo:

$$MTBR = T \cdot R(T) + \int_0^T t \cdot f(t) \cdot dt \quad (6.1)$$

Antes de desarrollar esta expresión, recordaremos el significado del término “vida media”.

Entre los parámetros de la distribución de fallos de un dispositivo destaca por su importancia la esperanza matemática (momento de primer orden respecto del origen) de τ :

$$\theta = E(\tau) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt$$

τ : variable aleatoria que define el tiempo hasta el fallo de un dispositivo;

$f(t)$: función de densidad de τ .

Recordemos que la esperanza matemática del tiempo hasta el fallo se denomina “vida media o tiempo medio hasta el fallo, MTTF”.

En determinadas condiciones, conviene calcular la vida media a partir de la *fiabilidad*¹⁸ $R(t)$, en vez de utilizar la *función de densidad de fallos*, $f(t)$, sabiendo que:

$$F(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t f(x) \cdot dx$$

¹⁷ Utilizamos la palabra *remoción* en lugar de *desmontaje* para distinguir entre separar el ítem completo del sistema y despiezar el ítem.

¹⁸ $R(t)$: probabilidad de que el fallo se produzca después de t ; Función de fiabilidad.

$$R(t) = 1 - F(t) = P(\tau > t)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Para ello, integraremos por partes como sigue:

$$\theta = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = -\int_0^{\infty} t \cdot dR(t) = -[t \cdot R(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

Puesto que para $t = 0 \implies t \cdot R(t) = 0$, el primer sumando valdrá:

$$-\lim_{t \rightarrow \infty} [t \cdot R(t)]$$

límite indeterminado al que aplicamos la regla de L'Hôpital:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [t \cdot R(t)] = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{R^{-1}(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R^{-2}(t) \cdot f(t)} \quad (6.2)$$

Sabemos que la tasa de fallo en t es igual a:

$$Z(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

La tasa de fallo es una medida de la variación de la fiabilidad en el tiempo; es la densidad de probabilidad de fallo en t condicionada a no haber fallado antes de t .

Sustituyendo en (6.2) nos queda:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R^{-2}(t) \cdot f(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{R(t)}{Z(t)}$$

Este límite es nulo siempre que $Z(t)$ no tienda a cero, o sea, un infinitésimo de orden inferior a $R(t)$. Como en los casos usuales $Z(t)$ es no decreciente, esto se verifica. Por tanto, podemos escribir:

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (6.3)$$

Continuando con la *ecuación (6.1)*, ahora estamos en disposición de llegar al siguiente resultado:

$$MTBR = T \cdot R(T) - \int_0^T t \cdot dR(t) = T \cdot R(T) - \left[t \cdot R(t) \right]_0^T + \int_0^T R(t) dt = \int_0^T R(t) dt \quad (6.4)$$

Expresión muy análoga a (6.3) y, como aquélla, fácil de recordar.

Veamos el siguiente ejemplo:

Consideremos un motor de reacción sujeto a un TBO de 6.000 horas. Suponemos que las revisiones generales y otras acciones menores de mantenimiento preventivo, realizadas éstas sin necesidad de desmontar el motor del avión, evitan totalmente el efecto del desgaste. Por lo tanto, los fallos serán todos por azar. Suponemos también que la tasa de fallo (contando sólo los fallos que exigen remoción por revisión general o parcial) es de 1 fallo por cada 1.000 horas. **Calcularemos el tiempo medio entre remociones, MTBR.**

Para un dispositivo sin taras iniciales y aún no afectado por el desgaste, es correcto en teoría suponer que su tasa de fallo es constante, esto es, $z(t) = \lambda$ (constante)

La aplicabilidad de la ley exponencial ha sido muy discutida. **Para fallar exponencialmente, un dispositivo ha de ser insensible a la edad y al uso.** Cualquier sollicitación que no llegue a producirle un fallo debe dejarlo como estaba. Si no ha fallado, debe ser tan bueno como cuando estaba nuevo.

Introduciendo valores en la expresión (6.4), con $\lambda = (10.000)^{-1}$ nos queda:

$$MTBR = \int_0^{6000} e^{-\lambda t} \cdot dt = -\frac{1}{\lambda} \cdot \int_0^{6000} e^{-\lambda t} \cdot (-\lambda) \cdot dt = -\frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda t} \Big|_0^{6000} = -\frac{1}{\lambda} (e^{-0,6} - 1) = 10000 \cdot (1 - e^{-0,6}) = 45119h$$

El MTBR estará en función del valor de la tasa de fallo λ , dato de partida junto al TBO.

Vemos que antes de la revisión general (6.000 horas) y debido a fallos o síntomas de fallo incipiente, deberemos practicar remociones, en un tiempo medio de algo más de 4.500 horas. Todo ello con la hipótesis de partida de tasa de fallo constante (ley exponencial)

6.3 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DESDE LA ECONOMÍA

Cuando la consideración dominante es la economía, **se puede hacer un modelo para determinar el TBO a base de hacer mínimo el coste horario medio causado por reposiciones programadas y no programadas**. Uno de estos modelos es el contenido en ARINC¹⁹.

El coste horario medio multiplicado por el MTBR será la esperanza matemática de coste de una reposición (que puede ser programada o por fallo)

$$C(t) \cdot \int_0^T R(t) \cdot dt = K_1 \cdot [1 - R(T)] + K_2 \cdot R(T) \quad (6.5)$$

siendo:

C (T) =	Coste horario medio
K ₁ =	Coste total de un fallo en servicio
[1-R (t)] =	Probabilidad de fallo, o no fiabilidad
K ₂ =	Coste total de una reposición programada
R(t) =	Fiabilidad del componente

En algunos casos vale la pena sustituir un dispositivo que funciona antes de que falle. En general, el motivo por el que se sustituye un dispositivo que funciona es que el coste de hacerlo es pequeño en comparación con el coste de responder a un fallo que ocurra durante el funcionamiento del dispositivo, esto es:

¹⁹ ARINC Research Corporation, 1.964, 'Reliability Engineering', W. H. Von Alven, ed., Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

$$K_1 \gg K_2$$

despejando $C(T)$ de la ecuación (6.5) resulta:

$$C(T) = \frac{K_1 - (K_1 - K_2) \cdot R(T)}{\int_0^T R(t) \cdot dt} \quad (6.6)$$

Evidentemente, si el coste de un fallo en servicio, k_1 , no es mayor que el de una reposición programada, k_2 , no interesa económicamente fijar un potencial, sino dejar que el dispositivo funcione hasta el fallo.

La ecuación (6.6) exige conocer la distribución de fallos, luego para cada caso particular habrá que hallar el mínimo $C(t)$ con la ayuda de un ordenador o empleando métodos aproximados en general.

$$T = \text{TBO} = \text{Límite de tiempo entre revisiones generales}$$

6.4 CÁLCULO DEL MTBUR

Suponiendo que, del modo que sea, hemos fijado para nuestro dispositivo un potencial T , nos interesa conocer el *tiempo medio entre remociones no programadas*, MTBUR. Evidentemente, esta expresión representará la vida media correspondiente a la siguiente densidad de fallos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f_r(t) = f(t)} \quad \text{para } 0 < t \leq T, \quad (6.7) \\ \text{con } f(t) \text{ como función de densidad de la variable aleatoria } \tau \text{ (tiempo hasta el fallo), siendo} \\ \text{su función de distribución:} \\ \\ F(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t f(x) \cdot dx \\ \\ F(0) = 0 \\ F(\infty) = 1 \\ \\ = \mathbf{R(T) \cdot f(t - T)} \quad \text{para } T < t \leq 2T \\ = \mathbf{[R(T)]^k \cdot f(t - kT)} \quad \text{para } kT < t \leq (k+1)T \end{array} \right.$$

Nótese que en cada intervalo entre dos revisiones generales consecutivas, la *densidad de probabilidad de fallo* es el producto de la probabilidad de que no hayan fallado los k dispositivos empleados hasta kT , por la densidad de probabilidad de fallo correspondiente al $(k+1)$ -ésimo dispositivo que comenzó a funcionar en el instante kT .

El MTBUR se deduce de la expresión (6.7) como *esperanza matemática del tiempo hasta el fallo*:

$$\begin{aligned}
 MTBUR = & \int_0^{\infty} t \cdot f_r(t) \cdot dt = \int_0^T t \cdot f(t) \cdot dt + \int_T^{2T} t \cdot R(T) \cdot f(t-T) \cdot dt + \\
 & \dots + \int_{kT}^{(k+1)T} t [R(T)]^k \cdot f(t-kT) \cdot dt + \dots
 \end{aligned}$$

operando adecuadamente, llegamos a la expresión:

$$MTBUR = \frac{\int_0^T t \cdot f(t) \cdot dt + T \cdot R(T)}{1 - R(T)}$$

teniendo en cuenta la fórmula (6.4), podemos escribir:

$$MTBUR = \frac{\int_0^T R(t) \cdot dt}{1 - R(T)} = \frac{MTBR}{1 - R(T)} \tag{6.8}$$

ecuación que relaciona el tiempo medio entre remociones no programadas, MTBUR, con el tiempo medio entre remociones programadas y no programadas. **Si el mantenimiento preventivo es eficaz, el MTBUR será más largo que la vida media del dispositivo; esto es, se sustituirá antes de que falle.**

$$MTBUR > \theta$$

En el caso de distribución de fallos exponencial, la expresión (6.8) nos dará:

$$MTBUR = \frac{\int_0^T e^{-\lambda t} \cdot dt}{1 - e^{-\lambda T}}$$

ya que:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

nos queda:

$$\begin{aligned} MTBUR &= \int_0^T e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} \cdot \int_0^T e^{-\lambda t} \cdot (-\lambda) \cdot dt = -\frac{1}{\lambda} \cdot (e^{-\lambda t}) \Big|_0^T = \\ &= -\frac{1}{\lambda} \cdot [e^{-\lambda T} - 1] = (1 - e^{-\lambda T}) \cdot \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

luego:

$$MTBUR = \frac{1}{\lambda}$$

recordemos que en el caso de la distribución exponencial, la vida media es igual a:

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda}$$

por lo tanto:

$$MTBUR = \frac{1}{\lambda} = \theta$$

Lo que nos vuelve a decir que, **si el dispositivo tiene tasa de fallo constante, fijar un potencial sólo sirve para perder tiempo y dinero, puesto que seguiremos teniendo la misma tasa de fallo.**

6.5 SUSTITUCIÓN POR EDAD Y SUSTITUCIÓN POR BLOQUE

Partiendo de la premisa de que en algunos casos vale la pena sustituir un dispositivo que funciona antes de que falle, ya que el coste de hacerlo es pequeño en comparación con

el coste de responder a un fallo que ocurra durante el funcionamiento del dispositivo, históricamente se han definido estos dos tipos de políticas de mantenimiento preventivo.

Una política de sustitución por edad implica el cambio de un dispositivo por otro nuevo, siempre que el dispositivo falle o alcance la edad establecida τ_a .

Con la sustitución en bloque, el dispositivo en funcionamiento se sustituye en tiempos espaciados uniformemente $\tau_b, 2 \tau_b, 3 \tau_b, \dots$ independientemente de su edad en dichos instantes de tiempo. En este caso, τ_b se denomina “el tiempo de la política”.

Los valores óptimos de τ_b pueden ser determinados analizando los modelos apropiados de costes. Esto se muestra más adelante. Primero examinaremos las relaciones entre los dos procedimientos y los patrones generales de comportamiento.

Comencemos por definir una notación conveniente y una relación de ordenación entre las funciones de distribución. Específicamente, supongamos que:

$N_a(t, \tau_a)$ = Número de fallos en $[0, t]$ en un procedimiento de sustitución por edad, con edad de sustitución τ_a .

$N_b(t, \tau_b)$ = Número de fallos en $[0, t]$ en un procedimiento de sustitución por edad, con edad de sustitución τ_b .

$N(t)$ = Número de renovaciones (fallos) en el proceso de renovación cuando no se realizan sustituciones preventivas.

Ahora, para comparar estas cantidades, definamos una relación estocástica de ordenación, de la forma siguiente:

Una variable aleatoria X es estocásticamente mayor o igual a la variable aleatoria Y :

$$X \stackrel{st}{\geq} Y$$

si:

$$P[X > Z] \geq P[Y > Z], \quad \forall Z$$

Esta definición se utiliza ampliamente, pero es de alguna forma anti-intuitiva, ya que implica que:

$$X \stackrel{st}{\geq} Y \quad \text{cuando} \quad F_x(z) \leq G_y(z), \quad \forall Z$$

La interpretación adecuada es que la distribución de X tiene su masa concentrada en los valores más altos de la variable aleatoria, al contrario que sucede con la distribución Y. También se puede demostrar que para todos los valores:

$$t \geq 0 \quad \text{y} \quad \tau_a \geq 0, \quad N(t) \stackrel{st}{\geq} N_a(t, \tau_a)$$

Siempre que se cumpla la condición:

$$F(t) = NBU^{20}$$

Una distribución de vida F(t) se dice que es “*Nueva Mejor que Usada*”, NBU, si:

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

Esta condición implica que la probabilidad condicional de supervivencia de un dispositivo de edad X es menor o igual que la probabilidad correspondiente de un dispositivo nuevo. Es decir:

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

de forma que una copia nueva del dispositivo tiene una mayor fiabilidad que otra usada.

²⁰ Función de no fiabilidad: $F(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t f(x) dx$

Una implicación importante de este resultado ($F(t) = \text{NBU}$) es que, para dispositivos NBU, el mantenimiento preventivo reduce estocásticamente el número de fallos que ocurren en cualquier intervalo. Por esta razón, el mantenimiento preventivo se utiliza habitualmente con dispositivos que tienen distribuciones de vida que son elementos de la clase de distribuciones NBU.

Supongamos que $r_a(t, \tau_a)$ representa el número de sustituciones de dispositivos en $[0, t]$ de acuerdo con una política de sustitución por edad, con edad de sustitución τ_a y que $r_b(t, \tau_b)$ es el número de sustituciones de dispositivos en $[0, t]$ de acuerdo con una política de sustitución en bloque con intervalo τ_b . La distinción entre fallos y sustituciones es que las sustituciones incluyen tanto a los dispositivos cambiados debido a fallos como a los reemplazados preventivamente antes del fallo. Entonces, para todos los valores $t > 0$ y para cualquier tiempo común de procedimiento $\tau > 0$:

a) $r_a(t, \tau) \leq r_b(t, \tau)$

b) si $F(t)$ presenta una tasa de fallo creciente (es decir, es IFR), entonces:

$$r_a(t, \tau) \geq r_b(t, \tau)$$

Por lo tanto, por cada distribución de duración de vida, la sustitución por edad resulta estocásticamente en menos sustituciones que la sustitución en bloque.

$$r_a \leq r_b$$

No obstante, para distribuciones de vida IFR (tasa de fallos decreciente), la sustitución por edad resulta estocásticamente en un número mayor de fallos.

COSTES:

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

1er caso:

Supongamos que es posible identificar los costes de una sustitución planificada y de los fallos y que estas cantidades se representan respectivamente por C_1 y C_2 . Entonces, un modelo de costes para el uso de una estrategia de sustitución en bloque sería:

$$E[C(\tau_b)] = \frac{C_1 + C_2 \cdot M_F(\tau_b)}{\tau_b} \quad \Rightarrow \quad \text{FUNCION ESPERADA DE COSTE}$$

donde:

$C_1 =$ coste de prevención.

$C_2 =$ coste de reparación.

El modelo calcula el coste por unidad de tiempo asociado por el uso de una estrategia de sustitución en bloque con un tiempo de política τ_b .

$M_F(\tau_b)$ es el número esperado de fallos durante un intervalo de longitud fija $[0, \tau_b]$ y cada fallo de este tipo resulta en coste igual a C_2 . Al final del intervalo de sustitución en bloque, el dispositivo se sustituye a un coste igual a C_1 y la longitud del intervalo es τ_b . Nótese que el modelo no implica una hipótesis relativa a la forma de distribución de vida, $F(t)$, sino que está basado en una hipótesis de la sustitución instantánea del dispositivo por una copia idéntica.

Los métodos convencionales de optimización permiten el cálculo de un valor óptimo para τ_b .

La derivada para la *función esperada de coste* es:

$$\frac{d}{d\tau_b} E[C(\tau_b)] = \frac{C_2 \cdot \tau_b \cdot \frac{d}{d\tau_b} M_F(\tau_b) - C_1 - C_2 \cdot M_F(\tau_b)}{\tau_b^2} = 0$$

de forma que el valor óptimo de τ_b es aquél para el cual:

$$\tau_b \frac{d}{d\tau_b} M_F(\tau_b) - M_F(\tau_b) = \frac{C_1}{C_2}$$

Intuitivamente, es atractivo que el tiempo de la política dependa de la relación entre los costes de prevención y reparación. Para el caso específico en que $F(t)$ es exponencial (tasa de fallos constante), esta ecuación no tiene solución para:

$$M_F(t) = \lambda \cdot t$$

de forma que la condición sobre la derivada se transforma en:

$$\lambda \cdot \tau_b - \lambda \cdot \tau_b = \frac{C_1}{C_2} = 0$$

Este resultado indica apropiadamente que, puesto que no se produce una mejora en el comportamiento de riesgo o de fallos como resultado de realizar sustituciones preventivas en dispositivos con distribuciones de vida exponenciales, no se debe realizar en estos dispositivos un mantenimiento preventivo.

Se llega directamente a la misma conclusión sustituyendo λt por $M_F(t)$ en la función esperada de coste:

$$E[C(\tau_b)] = \frac{C_1}{\tau_b} + C_2 \cdot \lambda$$

$$\frac{d}{d\tau_b} E[C(\tau_b)] = -\frac{C_1}{\tau_b^2} = 0$$

Es un mínimo para $\tau_b = \infty$. El dispositivo sería “*Nuevo Peor que Usado*”, NWU.

2º caso:

Para una política de sustitución por edad τ_a , una sustitución planificada tiene lugar cuando un dispositivo sobrevive hasta una edad, τ_a , y una sustitución no planificada ocurre cuando el dispositivo falla antes de τ_a . Considerando cada sustitución de un dispositivo como el fin de un ciclo de funcionamiento, el *coste del ciclo* es:

$$C_T(\tau_a) = C_1 \cdot \bar{F}(\tau_a) + C_2 \cdot F(\tau_a)$$

donde:

$$\bar{F} = \text{función de fiabilidad}$$

y la *duración esperada de cada ciclo* es:

$$E(T) = \tau_a \cdot \bar{F}(\tau_a) + \int_0^{\tau_a} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt$$

de forma que el *coste esperado por unidad de tiempo* es:

$$E[C(\tau_a)] = \frac{C_1 \cdot \bar{F}(\tau_a) + C_2 \cdot F(\tau_a)}{\int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt}$$

La ecuación de la solución basada en una derivada es:

$$\frac{dE[C(\tau_a)]}{d\tau_a} = \frac{[-C_1 f(\tau_a) + C_2 f(\tau_a)] \cdot \int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) dt - [C_1 \bar{F}(\tau_a) + C_2 F(\tau_a)] \cdot \bar{F}(\tau_a)}{\left[\int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt \right]^2} = 0$$

cuya condición resultante óptima es:

$$\bar{F}(\tau_a) + Z(\tau_a) \cdot \int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt = \frac{C_2}{C_2 - C_1}$$

con:

$$Z(t) = \frac{f(t)}{\bar{F}(t)} \Rightarrow \text{TASA DE FALLO}$$

También aquí la solución tiene el atractivo intuitivo de que la longitud del intervalo de sustitución (τ_a) depende directamente de la relación de costes de reparación.

Nótese además que la condición de la derivada segunda es:

$$\frac{(C_2 - C_1) \cdot \frac{d}{d\tau_a} f(\tau_a) \int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt + [(C_2 - C_1) \cdot F(\tau_a) + C_1] \cdot f(\tau_a)}{\left[\int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt \right]^2} = 0$$

y puesto que:

$$\frac{d}{d\tau_a} f(\tau_a) = \bar{F}(\tau_a) \cdot \left[\frac{d}{d\tau_a} \cdot Z(\tau_a) - 1 \right]$$

sustituyendo nos queda:

$$\frac{(C_2 - C_1) \cdot \bar{F}(\tau_a) \cdot \left(\frac{d}{d\tau_a} Z(\tau_a) - 1 \right)}{\int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt} + E[C(\tau_a)] \cdot \frac{f(\tau_a)}{\int_0^{\tau_a} \bar{F}(t) \cdot dt} = 0$$

Lo cual implica que la política óptima de sustitución por edad ocurre en el límite del dominio posible, de forma que no debe realizarse un mantenimiento preventivo.

Una vez más, la solución analítica confirma que el mantenimiento preventivo sólo es útil cuando los nuevos dispositivos proporcionan una ventaja clara sobre los ya existentes.

6.6 TEST DE BARLETT PARA EL MODELO NEGATIVO EXPONENCIAL

Cuando se trata de determinar la distribución que sigue la variable aleatoria “tiempo al fallo” de un dispositivo se recurre a la observación de una serie de sus valores y con la ayuda de métodos de estimación se calculan los valores de los parámetros de la distribución que mejor representa las observaciones realizadas.

La aplicación de los métodos cuantitativos de estimación puede ir precedida de un análisis cualitativo, del tipo de la transformada del tiempo total de prueba, que dé una idea del comportamiento de la tasa de fallos del dispositivo considerado. Sin embargo, es frecuente que el fabricante o usuario de un dispositivo tenga experiencia en dispositivos similares, de los que ya conozca sus características de fiabilidad. Puede ocurrir, en este caso, que el fabricante o usuario tenga motivos para pensar que la distribución del tiempo al fallo del nuevo dispositivo va a ser una determinada. Existe una alternativa a la realización de la transformada del tiempo total de prueba que requiere aún menos esfuerzo, que consiste en el establecimiento de una hipótesis y su posterior validación o rechazo mediante la realización de un test estadístico. En concreto, vamos a considerar el *test de Barlett* para la distribución negativa exponencial²¹.

Supongamos que generamos r observaciones de tiempo al fallo de una población de elementos idénticos. Pensamos (por experiencia acumulada con dispositivos similares) que la distribución de sus tiempos al fallo sigue una ley negativa exponencial y queremos contrastar dicha hipótesis. Es decir,

H_0 = la distribución de vida del dispositivo es negativa exponencial;

H_1 = la distribución de vida del dispositivo no es negativa exponencial.

²¹ Ver apartado A.1. del apéndice

En función de qué hipótesis establezcamos y cual sea la verdadera distribución de vida del dispositivo estudiado, se pueden dar los dos tipos de error mostrados a continuación:

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> Realidad </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> Hipótesis </div>	H ₀	H ₁
H ₀	---	Error tipo II
H ₁	Error tipo I	---

Tabla 6.1. Errores tipos I y II

El error tipo I, también representado como α , es la *probabilidad de rechazar la hipótesis H₀, siendo realmente válida*; se le conoce también como “nivel de significación”.

El error tipo II, también representado como β , es la *probabilidad de aceptar la hipótesis H₀, siendo realmente falsa*.

El estadístico del *test de Barlett* para la hipótesis H₀ (distribución de vida negativa exponencial) es:

$$B_r = \frac{2r \left[\text{Ln} \left(\frac{t_r}{r} \right) - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \text{Ln}(x_i) \right]}{1 + \frac{r+1}{6r}}$$

donde x_i es el i-ésimo tiempo al fallo observado, y:

$$t_r = \sum_{i=1}^r x_i$$

si B_r está incluido en el intervalo:

$$\left[\chi^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2}, r-1 \right), \chi^2 \left(\frac{\alpha}{2}, r-1 \right) \right]$$

entonces la estimación de que se trata de una ley negativa exponencial es aceptable con un nivel de significación de α ; de lo contrario, la hipótesis de distribución negativa exponencial debe ser rechazada.

Veamos un ejemplo:

Consideremos los siguientes tiempos hasta el fallo de una población de elementos idénticos, para los que se supone una distribución negativa exponencial:

21.2	0.1	15.3	5.8	26.7	2.1	4.3	7.3	11.3	7.5
14.1	32.1	2.8	6.7	16.9	17.6	12.6	2.3	7.7	4.5

Para las anteriores observaciones el estadístico de *Barlett* es:

$$B_{20} = \frac{2 \cdot (20) \cdot \left[\text{Ln} \left(\frac{218.9}{20} \right) - \frac{1}{20} (38.80) \right]}{1 + \frac{21}{120}} = 15.42$$

y, para un nivel de significación de $\alpha = 0.1$ (esto es, de un 10%), se obtiene²²:

$$\chi^2_{0.95,19} = 10.12$$

$$\chi^2_{0.05,19} = 30.14$$

Por estar 15.42 comprendido en el intervalo [10.12, 30.14] se acepta la hipótesis de distribución negativa exponencial de los tiempos al fallo.

A mayor probabilidad de rechazar la hipótesis correcta, más estrecho debe ser el intervalo resultante. La tabla (6.2) muestra los extremos de los intervalos correspondientes a tres niveles de significación.

²² Ver apartado A.5. del apéndice (distribución ji -dos)

	$\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}, r-1}$	$\chi^2_{\frac{\alpha}{2}, r-1}$
0.1	10.117	30.114
0.2	11.651	27.204
0.4	13.716	23.900

Tabla 6.2. Intervalos correspondientes a 3 niveles de significación (χ^2)

6.7 CONSIDERACIONES SOBRE LA APLICACIÓN DE LA LEY EXPONENCIAL

Los datos de fiabilidad más abundantes son los de componentes electrónicos. Tanto estos datos como los menos abundantes de componentes mecánicos, hidráulicos, eléctricos, etc., suelen presentarse en forma de tasas de fallo constantes, lo que implica aceptar la hipótesis exponencial.

Para aquellos componentes electrónicos que tienen una vida útil corta (la tasa de fallo comienza a crecer relativamente pronto, si no desde el principio, por efecto del desgaste) la hipótesis exponencial sólo puede admitirse condicionada a un adecuado mantenimiento preventivo. Este es el caso también de los componentes no electrónicos sensibles al desgaste cuyos datos se nos presentan como tasas de fallo constantes.

Incluso para componentes con tasa de fallo creciente desde el principio con pendiente cada vez mayor, como es el caso de la ley de *Weibull* para $\beta > 2$:

$$Z(t) = \frac{\beta}{\eta \cdot \beta} \cdot (t - \gamma)^{\beta-1}$$

cabe considerar una tasa de fallo constante equivalente para un período limitado. Este período será el tiempo entre reposiciones, establecido para impedir un desgaste excesivo. En estos casos, el uso de la ley exponencial será pesimista, pues la curva:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

crece más rápidamente al principio que las curvas de fiabilidad de las densidades acampanadas, ya que su derivada para $t = 0$ es $(-\lambda)$ y en el caso de la ley de *Weibull* es nula.

Nota:

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

para el caso frecuente en que $\gamma = 0$ (es decir, hay probabilidad de fallo desde $t = 0$) y para el valor particular de $\eta = 1$:

$$R(t) = e^{-t^\beta}$$

$$R'(t) = e^{-t^\beta} \cdot (-\beta) \cdot t^{\beta-1}$$

$$\text{para } t = 0 \rightarrow R'(0) = 0$$

Así pues, las tasas de fallo constantes $Z(t) = \lambda$, dadas para muchos componentes de pronto envejecimiento, son artificiales, pero pueden ser útiles. Estas tasas de fallo deberán ser acompañadas siempre del período de validez. Esta tasa de fallo constante equivalente a $\bar{\lambda}$ se obtiene de ensayos y viene dada por la condición de igualdad de proporción de supervivientes al término del período de reposición T:

$$e^{-\bar{\lambda} \cdot T} = e^{-\int_0^T Z(t) \cdot dt}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T Z(t) \cdot dt$$

donde $Z(t)$ es la verdadera tasa de fallo (creciente) del componente. Adviértase que no es igual a la tasa de fallo media para el período $(0, T)$, aunque se aproxima mucho para pequeños valores de $Z(t)$ y T.

Nota aclaratoria:

En una población de dispositivos nominalmente idénticos, la proporción esperada de supervivientes en el instante t será $R(t)$. La probabilidad de que un dispositivo superviviente en t falle en el intervalo $(t, t + \Delta t)$ es una probabilidad condicional que se expresa así:

$$P(t < \tau \leq t + \Delta t | \tau > t) = \frac{P(t < \tau \leq t + \Delta t)}{P(\tau > t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)}$$

Este valor, dividido por la longitud Δt del intervalo, se denomina “*tasa media de fallo*” en $(t, t + \Delta t)$:

$$Z(t, \Delta t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)}$$

6.8 PREVISIÓN DE REPUESTOS

Las previsiones logísticas requieren una predicción de necesidades de repuestos en la que se tendrán en cuenta las reposiciones por límite de tiempo y los fallos esperados en servicio. En el caso de componentes con tasa de fallo constante, el número de repuestos necesarios por fallo en servicio puede estimarse para un período determinado con el nivel de confianza que se desee mediante la distribución de *Poisson*, caso particular de la binomial cuando la probabilidad de que ocurra el fallo es muy pequeña y el tiempo de funcionamiento es muy grande, caso habitual de la industria aeronáutica.

Ejemplo:

Se prevé que determinado componente de un sistema va a fallar siguiendo una tasa de fallo constante igual a $\lambda = 200$ fallos/ 10^6 horas. Suponiendo que el sistema contiene 10 componentes y debe funcionar 1.000 h/año, calcular el número de repuestos necesario para cubrir las necesidades de un período de 3 años con un nivel de confianza del 90 %.

En 3 años, el *tiempo de funcionamiento* de los 10 componentes debe ser:

$$3 \times 10.000 \times 10 = 30.000 \text{ h}$$

El *número esperado de fallos* será:

$$M = \lambda \times t = 200 \times 30.000 \times 10^{-6} = 6 \text{ fallos}$$

La *probabilidad de tener "r ó menos fallos"* será, haciendo uso de la distribución de *Poisson*:

$$F(r) = P(\rho \leq r) = e^{-m} \cdot \sum_{i=0}^r \frac{m^i}{i!} = \sum_{i=0}^r \frac{e^{-6} \cdot 6^i}{i!} = 0.9$$

Para averiguar el número r que hace esta probabilidad igual a 0,9 se busca en una tabla de la distribución de *Poisson*, obteniendo:

$$P(\rho \leq 9) = 0.916 \cong 0.9$$

por lo que el número de repuestos será 9.

El proceso de *Poisson*, cuando el suceso es un fallo de un dispositivo reparable, nos describe el caso exponencial. En efecto, la probabilidad de que no ocurra ningún fallo en un intervalo t se obtiene, haciendo $r = 0$, de:

$$P_r(t) = \frac{e^{-\lambda \cdot t} \cdot (\lambda \cdot t)^r}{r!}$$

que es la *probabilidad de que no ocurra ningún fallo en un intervalo de duración t* ,

$$P_0(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

Expresión que coincide con la *fiabilidad de un dispositivo que falle sólo por azar*, cuya expresión es la siguiente:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

que es la *fiabilidad en el caso de distribución exponencial*.

Esto indica que, para que los fallos se presenten poissonianamente, el dispositivo sólo puede tener dos estados:

- no fallado (tan bueno como nuevo)
- fallado

En el proceso sólo hemos contado el tiempo de funcionamiento, suponiendo que la reparación es instantánea. Es decir, si lo aplicásemos a un avión sólo contaríamos las horas de vuelo, que es lo habitual.

Capítulo VII

MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA FIABILIDAD

“El curso del vuelo fue excesivamente errático, parcialmente debido a la irregularidad del aire y otro tanto por la falta de experiencia a la hora de manejar esta máquina.”

Orville Wright

7.1 PLANTEAMIENTO INICIAL

Como vimos en el capítulo anterior, la política de mantenimiento seguida hasta hace unos años por las aerolíneas establecía potenciales para los ítems de tasa de fallo creciente (para tasas de fallo constante no tenía sentido) excepto en los casos en que el estado o condición del ítem se podía apreciar claramente en cualquier momento. Es evidente que la reposición según condición debe aprovechar la vida útil de cada ítem particular mucho mejor que una regla estadística con fuerte coeficiente de seguridad del tipo $\Rightarrow T = \theta - K \cdot \sigma$

Lo ideal sería no sustituir el ítem hasta momentos antes de que fuera a fallar y hacer esto con absoluta seguridad. Lo que irrita a los responsables de mantenimiento es fijar un TBO de 6.000 horas para un ítem con vida media de desgaste muy superior, desperdiciando la mayor parte del área bajo la curva de densidad.

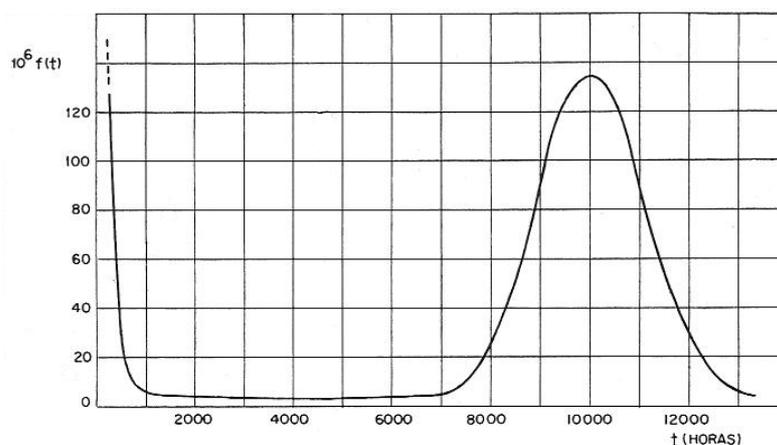


Fig. 7.1. Función de densidad mixta

Con harta frecuencia se comprueba en una revisión general que la unidad revisada, que funcionó perfectamente T horas (el potencial fijado), presenta todos los síntomas de seguir haciéndolo durante mucho más tiempo. Hay opiniones según las cuales un sustancial período de buen funcionamiento es la mejor garantía de un comportamiento análogo en el futuro. Al mismo tiempo, voces más prudentes hacen notar la dificultad, o imposibilidad en ciertos casos, de controlar el “desgaste invisible”.

En el trabajo de *F.S.Nowlan*, de United Airlines, titulado *Review of “On Condition” Philosophies From a Planning and Operacional Viewpoint, Post-Present-Future*, presentado en la 15th Reunión del Subcomité de Planificación y Control de Producción de la IATA (Belgrado, octubre 1.969), se leen cosas que no por sorprendentes son menos convincentes, como una clara exposición de las razones por las que **sólo en relativamente pocos casos (muchos menos de los que se creía tradicionalmente) existe un TBO óptimo.**

Las tres condiciones necesarias para que un TBO sea eficaz son:

- 1/ Existe un punto en el tiempo en que la tasa de fallo comienza a aumentar rápidamente;
- 2/ Una gran parte de las unidades sobreviven hasta ese punto, convirtiéndose en candidatos al fallo si se las deja en servicio más tiempo;
- 3/ La revisión general consigue realmente “poner a cero horas” las unidades.

Según *Nowlan*, la experiencia de *United Airlines* muestra que la mayoría de los componentes no cumplen las condiciones expuestas.

Se sabe que la fiabilidad es un atributo de diseño, evitando el mantenimiento en lo posible su degradación. Esto explica que el número de propuestas de modificación del diseño como consecuencia de la observación de modos de fallos reiterativos sea muy grande.

Conocida por su acrónimo inglés RCM, *la política de mantenimiento centrada en la fiabilidad tiene como principio el empleo de varias técnicas de una manera integrada con el objetivo de incrementar la probabilidad de que un elemento funcione de la manera requerida durante su ciclo de vida definido por el diseño, de tal forma que precise un mínimo de mantenimiento. La meta de esta estrategia es que la funcionabilidad se mantenga, con la fiabilidad y disponibilidad prevista, al mínimo coste posible.*

RCM se desarrolló en la industria aeronáutica para determinar las políticas de mantenimiento programado de los aviones civiles. Desde entonces se ha adaptado para las industrias de fabricación y transformación.

La aplicación de este método se basa en el principio de que no se realizará ninguna tarea de mantenimiento preventivo hasta que se pueda justificar²³, por lo que se reduce drásticamente la demanda de ejecución de tareas de mantenimiento preventivo para la mayoría de los elementos del sistema.

Los análisis RCM pueden dividirse en dos pasos principales:

- Estudios FMEA (*Proactive Maintenance*) Es el elemento básico²⁴ de la filosofía RCM ya que conduce a un completo entendimiento de los modos de fallo asociados a un elemento/sistema y al preciso conocimiento de los efectos o consecuencias del suceso;
- Aplicación de procesos lógicos de análisis en cada elemento crítico para la seguridad, a fin de seleccionar la combinación óptima de tareas de mantenimiento.

Esta técnica es útil para tomar decisiones sobre si se necesita o no un mantenimiento preventivo, o sobre si se basará en el tiempo o en la condición. Por consiguiente, el objetivo consiste en identificar inicialmente los requisitos del mantenimiento preventivo

²³ Moss, M.A.; *Designing for Minimal Maintenance Expense: The Practical Application of Reliability and Maintainability*. MerceL Dekker, Inc, 1985.

²⁴ a él se dedica el apartado 2 de este capítulo.

basados en factores de fiabilidad, y posteriormente desarrollar un programa de mantenimiento preventivo óptimo. En sí, el proceso RCM no contiene ningún método básicamente nuevo; es más bien una manera estructurada de emplear varios métodos y disciplinas.

El proceso posee tres características clave:

1/ Reconoce que la fiabilidad inherente de cualquier elemento viene determinada por su diseño y fabricación, y que ninguna forma de mantenimiento puede llevar la fiabilidad más allá de la inherente en el diseño;

Un análisis RCM comienza por la definición de la actuación deseada para cada componente en un contexto operativo y se verifica si la fiabilidad inherente es tal que el mantenimiento pueda cumplir ese requisito. Si no, resalta los problemas que se encuentran fuera del alcance del mantenimiento, precisando otras acciones como rediseño, modificaciones, cambios en procedimientos de operación o en materias primas.

2/ Reconoce que las consecuencias del fallo son bastante más importantes que sus características técnicas. Una revisión estructurada de las consecuencias de los fallos dirige la atención a los fallos que afecten más a la seguridad y prestaciones del elemento;

3/ Incorpora la más reciente investigación en modelos de fallos de equipos, en un sofisticado algoritmo de decisión para la selección de las tareas de mantenimiento preventivo, o de las acciones que deben ejecutarse si no se encuentra ninguna tarea apropiada. El método reconoce que todas las formas de mantenimiento tienen algún valor y suministra criterios para decidir cuál es más apropiado en cada situación.

En la práctica diaria, el RCM se aplica por pequeños grupos formados normalmente por representantes tanto de Mantenimiento como de Producción, que deben tener un conocimiento exhaustivo del equipo considerado. Se analizan rigurosamente las funciones del equipo, junto con las especificaciones de actuación asociadas. Se identifican entonces todas las maneras en que el sistema puede fallar en cumplir esas

especificaciones y se evalúan las consecuencias de cada fallo. La etapa final, la selección de la tarea de mantenimiento más apropiada, se realiza mediante el uso de algoritmos de decisión que tienen en cuenta tanto la viabilidad técnica de la tarea propuesta, como si merece la pena realizarla. **El proceso de selección de la tarea considera siempre la selección de tareas de mantenimiento preventivo basadas en el examen/vigilancia de la condición (mantenimiento condicional) ante cualquier otra.** Serán objeto de estudio en los apartados siguientes.

Un riguroso análisis RCM estará basado en un detallado FMEA (hablaremos de ello en un próximo epígrafe) e incluirá probabilidades de fallo y cálculo de la fiabilidad del sistema. Este estudio se empleará en la determinación de las tareas de mantenimiento más apropiadas para evitar las consecuencias de los modos de fallo identificados.

RCM pone gran énfasis en mejorar la fiabilidad del ítem, principalmente a través de la retroalimentación de la experiencia alcanzada durante el mantenimiento (obtención de datos) Esta información es un instrumento para mejorar de manera continua la especificación de los equipos. La mejora de fiabilidad alcanzada conducirá a la reducción de la tasa de fallos y, por ende, a una mayor disponibilidad y menores costes de mantenimiento.

Esta política de mantenimiento se vale de las siguientes técnicas:

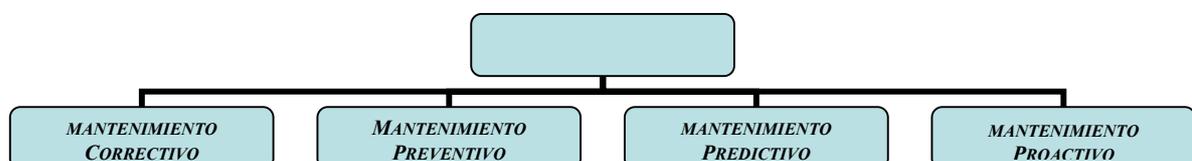


Fig.7.2. Componentes de un programa RCM

Inmediatamente, surge la siguiente pregunta: ¿Cuándo se aplicará cada una de ellas?

Mantenimiento Correctivo:

Elementos pequeños.

No críticos.

Existe redundancia.

Probabilidad de fallo muy baja.

Mantenimiento Preventivo:

Elementos sujetos a desgaste.

Patrón de fallos conocido.

Reposición de consumibles.

Mantenimiento Predictivo (monitorización de la condición):

Patrón de fallos desconocido (aleatorio)

No sujeto al uso (desgaste)

El mantenimiento preventivo provocaría fallos.

Mantenimiento Proactivo:

FMEA.

RCFA.

El esquema de un análisis RCM se muestra a continuación:

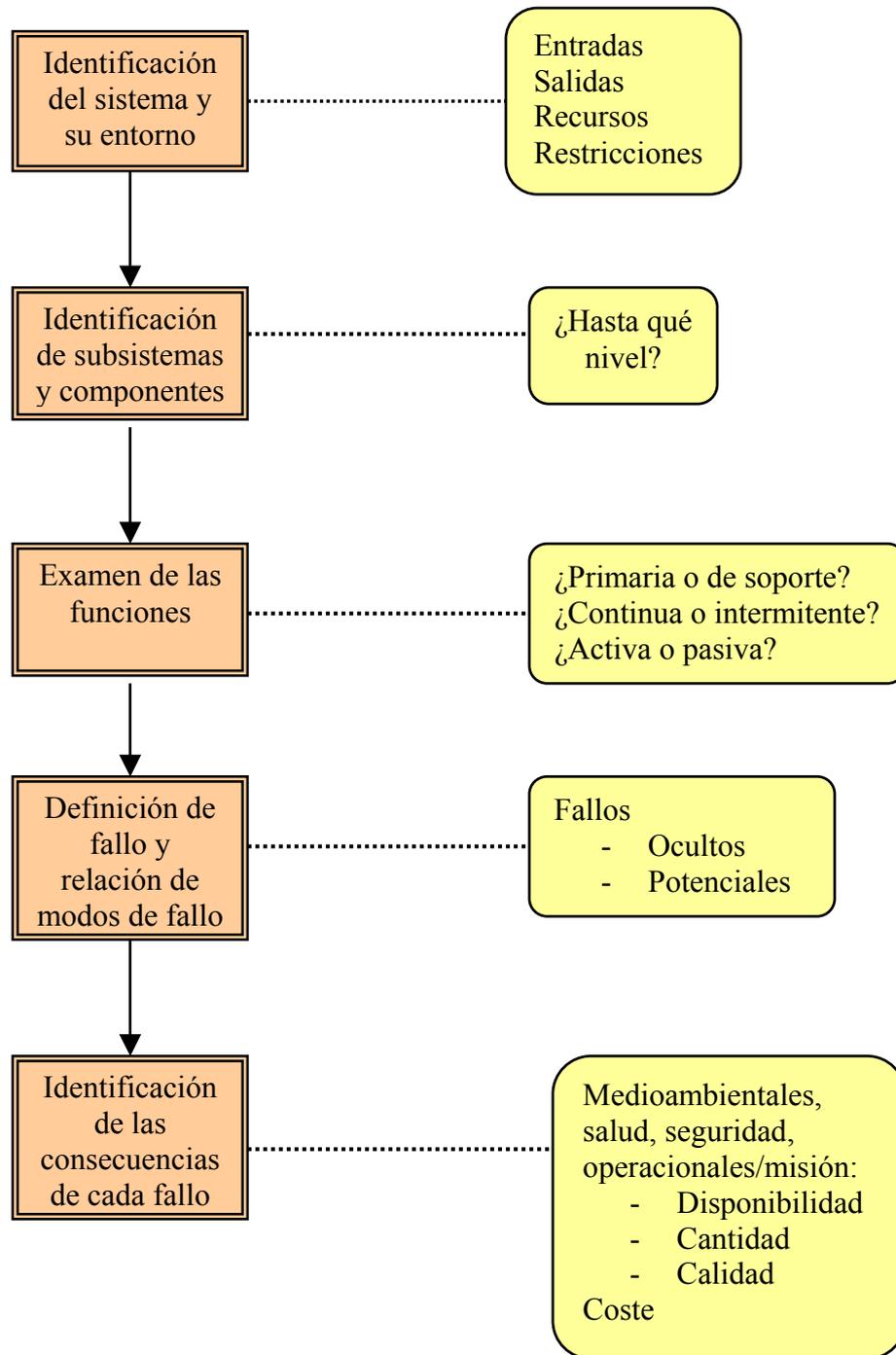


Fig. 7.3. Proceso de un análisis RCM

7.2 ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE LOS FALLOS (FMEA)

FMEA²⁵ es **una técnica cualitativa** asociada a la predicción de la fiabilidad y un medio utilísimo para saber cómo mejorar la fiabilidad de un diseño; también se aplica al estudio de la mantenibilidad y seguridad. Este análisis **sirve para determinar qué partes fallan, la causa del fallo y qué efectos tiene en el funcionamiento global del sistema.**

Consiste, en términos generales, en **la identificación y tabulación de los modos de fallo del ítem, la descripción de sus efectos y la evaluación de su importancia** (carácter más o menos crítico) Este análisis es un procedimiento iterativo, extendido a lo largo del diseño y desarrollo del sistema, que se aplica a cualquier nivel de integración: sistema, subsistema, componente en general. El FMEA relaciona cada función, todos los posibles fallos asociados a la misma, los modos de fallo dominantes en cada una de ellas y las consecuencias de los fallos. ¿Qué efectos tendrá el fallo en la misión u operación, el sistema y/o en la máquina?

La publicación NASA NPC 250-1, *Reliability Program Provisions for Space System Contractors*, exige el FMEA como parte del diseño inicial para determinar los posibles modos de fallo y sus efectos sobre el éxito de la misión. Considera que el objetivo principal es “descubrir áreas de fallos críticos y eliminar susceptibilidad del sistema a tales fallos”.

Los fallos en potencia se analizarán en cuanto a la probabilidad de ocurrencia de cada uno y efecto sobre el éxito de la misión del sistema. De este análisis de probabilidad e importancia surge una ordenación de modos de fallo críticos que ayuda a distribuir el esfuerzo correctivo, ya que no siempre será posible, por razones de tiempo, coste o de otro tipo, eliminar o aminorar las consecuencias de todos los modos de fallo identificados. Evidentemente, los modos de fallo críticos de primer orden darán lugar a las acciones correctivas más enérgicas, recurriendo a la redundancia, componentes más fiables y otros medios adecuados. Los modos de fallo de orden inferior serán objeto de

²⁵ Ver MIL-STD-1629A

estudio comparativo (los “trueques” o “*trade-off*”) antes de decidir cuál es la aplicación más ventajosa del esfuerzo correctivo.

El FMEA es un documento importante en toda revisión de diseño, proporcionando criterios para planear ensayos, prestando especial atención a los modos de fallo críticos identificados.

La información contenida en el FMEA, de acuerdo con su objetivo de evitar en lo posible los modos de fallo y la propagación de sus efectos, es de gran utilidad para señalar acciones de control de calidad durante la fabricación. Finalmente, marca criterios para establecer las revisiones y frecuencia de las mismas a aplicar durante la vida de servicio del equipo o sistema.

Cuando la criticidad de cada modo de fallo es determinada, el análisis es conocido como FMECA. Consolidado como una de las herramientas más útiles en el diseño, se emplea conjuntamente con el *análisis del árbol de fallos*, FTA.

El FTA es un método deductivo que incluye la enumeración gráfica y el análisis de diferentes modos en los que puede presentarse un fallo del sistema, así como su probabilidad de ocurrencia; utiliza métodos booleanos al analizar diferentes caminos de fallos y resulta preferido para grandes sistemas, con elevada presencia de software, donde hay muchas interfaces.

El FMECA es más completo, **está orientado al diseño ilustrando relaciones causa-efecto, y es preferido cuando se trata de conocer más sobre el comportamiento de un sistema y sus componentes, además de los riesgos asociados si no se cumplen los requerimientos especificados.**

7.3 REALIZACIÓN DEL FMEA

El análisis FMEA exige un conocimiento último del diseño. La publicación NASA SP-6501, “*An Introduction to the Evaluation of Reliability Programs*”, señala que, a nivel de componentes, es natural que lo realice el mismo diseñador, que los conoce bien.

Esta técnica comienza por el sistema completo, considerando en detalle sus funciones y posibles modos de fallo que le impidan cumplirlas, y sigue en sentido descendente por los demás niveles de integración, hasta el nivel de componente. En cuanto al tiempo, ya hemos dicho que comienza en la fase inicial de definición de diseño y prosigue hasta el ensayo final y la entrega.

Los formatos empleados difieren en detalles, pudiendo incluir más o menos información. El siguiente ejemplo se refiere a circuitos electrónicos y puede considerarse bastante típico.

Ref. circuito	Componente	Modo de fallo	Tasa de fallo	Efecto(s)	Importancia

Tabla 7.1. Formato FMEA para componentes electrónicos

7.4 PREDICCIÓN DE LA FIABILIDAD

La necesidad de evaluar la fiabilidad de sistemas durante el proceso de diseño y, por lo tanto, antes de que se fije la estructura específica del sistema, motivó la evolución de las estrategias de la predicción de la fiabilidad, entendiendo ésta como:

El proceso de calcular medidas aproximadas aunque verosímiles de fiabilidad de los equipos antes de que el diseño de los mismos se haya definido completamente y, por supuesto, antes de que se fabriquen.

Tres son los objetivos primarios del proceso:

- ✓ Permitir la comparación de diseños alternativos;
- ✓ Servir de guía para la definición de la configuración de componentes, y
- ✓ Verificar la viabilidad de lograr los niveles requeridos de fiabilidad.

Mediante ajustes adecuados (teniendo en cuenta la degradación que puede esperarse en fabricación, ensayos y control, así como en las condiciones reales de uso) puede intentarse evaluar la fiabilidad operativa.

Este proceso comienza con la hipótesis de que la fiabilidad de los componentes determina la fiabilidad del sistema. También se supone que la fiabilidad de los componentes depende del entorno de operación. Por último, se supone que, como consecuencia de la manipulación correcta de los componentes, estos muestran un comportamiento constante de riesgo. La predicción de la fiabilidad se basa en datos estadísticos de los componentes y utiliza modelos matemáticos para sintetizar la fiabilidad del sistema.

El procedimiento de predicción de la fiabilidad basada en la tasa de fallo de los componentes es el normalmente empleado para equipos y sistemas electrónicos, pudiéndose dividir en las siguientes etapas:

1/ Definición del sistema y sus condiciones operativas.

2/ Definición de fallo.

Se deberán definir los límites de actuación dentro de los que el funcionamiento se considera correcto. Esta etapa es de importancia capital para el resto de la predicción.

3/ Construcción del modelo matemático.

Para ello, conviene establecer un diagrama de bloques (sistemas en serie, en paralelo, redundancia activa parcial, combinaciones de series y paralelos, etc.) En general, se establecerá un diagrama general del sistema en que los bloques pueden ser subsistemas todavía muy complejos, descomponiendo luego cada bloque de primer orden. Esta descomposición se repetirá según necesidad hasta el nivel que se considere más adecuado para el cálculo.

A partir del diagrama de bloques se desarrollará el modelo o fórmula matemática. Si el diagrama de bloques se ha subdividido por niveles de complejidad, se construirán las

fórmulas necesarias para cada nivel. La construcción del modelo matemático es un ejercicio de cálculo de probabilidades que a veces puede presentar dificultad y poner a prueba la competencia del analista.

4/ Asignación de tasas de fallo o probabilidades de supervivencia a los componentes.

Debe comenzarse por hacer una lista de componentes por bloque, en la que deben figurar todos ellos, sean críticos o no. El análisis FMEA revelará los modos de fallo críticos y no críticos. Estos últimos no deberán considerarse en el cálculo, por lo que se hará una deducción de su tasa de fallo.

Si conocemos la probabilidad de que ocurra cada modo de fallo M y la probabilidad de que la función del sistema, subsistema, unidad o equipo se pierda en caso de ocurrir el modo de fallo M, **podemos asignar a cada modo de fallo un rango de importancia:**

$$RI = P(M) \times P(\text{pérdida} / M)$$

Los modos señalados como CRÍTICOS se supone que provocan la pérdida del elemento con probabilidad 1. Cuando no es seguro que el modo de fallo produzca la pérdida de la unidad, se puede asignar a P (pérdida/M) un valor por juicio subjetivo, a falta de otra forma mejor.

Las tasas de fallo de los componentes se obtendrán de las especificaciones o manuales disponibles. Además, las tasas de fallo de un mismo componente variarán de un modo de funcionamiento a otro según condiciones ambientales. En muchos casos puede ser difícil dividir las tasas de fallo de los componentes en las fracciones correspondientes a cada modo de fallo por carencia de información. Cabe entonces hacer hipótesis razonables por comparación de componentes similares mejor conocidos.

5/ Cálculo de la tasa de fallo o de la fiabilidad de los bloques.

A partir de las medidas de fiabilidad de los componentes, se sintetizan las de los bloques. Si un bloque contiene únicamente componentes de tasa de fallo constante y en serie, la suma de las tasas de fallo de los componentes dará la tasa de fallo del bloque.

Será necesario emplear factores de ponderación si hay pluralidad de modos de funcionamiento o el tiempo de funcionamiento del bloque no es el del total del sistema. Si el bloque no es exponencial por contener componentes no exponenciales o redundantes, se calculará la fiabilidad del bloque mediante la fórmula adecuada.

En algunos casos, en esta etapa se aplican factores de corrección para tener en cuenta los fallos de tolerancia.

6/ Cálculo de la fiabilidad del sistema.

Mediante la fórmula construida en el paso 3 y empleando las tasas de fallo o fiabilidades de los bloques, se calcula la fiabilidad del sistema, teniendo en cuenta que la expresión que da la fiabilidad en función de la tasa de fallo es:

$$R(t) = e^{-\int_0^t Z(x) dx}$$

Si la fórmula nos diese la fiabilidad en función del tiempo, se hallaría $R_s(t)$ para varios valores de t a fin de trazar la curva de fiabilidad, cuya integración numérica o gráfica nos dará la media o MTBF (en el caso de sistemas que fallan exponencialmente y son reparables, $\theta = \text{MTBF}$)

Gran parte del ímpetu en el desarrollo de métodos de predicción de la fiabilidad se originó en las FF.AA. de los EE.UU y, en menor grado, en las organizaciones del programa espacial. Estos métodos se encuentran codificados en el manual 217 de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (MIL-HDBK-217) y en un número creciente de guías análogas que están siendo desarrolladas en otros países.

7.5 EL PROCESO FRACAS

Este acrónimo obedece a las palabras “*Failure Reporting Analysis and Corrective Action System*” y **es un proceso cuya finalidad es establecer acciones correctoras a nivel de diseño para los fallos detectados por el FMEA.** Forma parte del conocido

como mantenimiento proactivo, que emplea varias técnicas para extender la vida del ítem, debiendo cubrir todos los fallos, ya sean de hardware como de software. Su puesta en práctica acarrea los pasos siguientes:

a / Observación del fallo del ítem.

b/ Documentación del mismo en la base de datos al efecto.

c/ Verificación del fallo, repitiéndolo en la forma reportada o mediante evidencia (función BIT, daños en el HW,....)

d/ Aislamiento del fallo.

e/ Sustitución del elemento sospechoso de producir el fallo.

f/ Análisis del elemento sustituido.

g/ Establecimiento de la causa del fallo.

h/ Determinación de acción correctora.

i/ Incorporación de la acción correctora a un prototipo de ensayo.

j/ Pruebas en el prototipo²⁶.

k/ Verificación de la efectividad de la acción correctora.

l/ Incorporación de la acción correctora a la producción (en caso de éxito)

²⁶ En algunos casos, las acciones correctoras en términos de cambios al diseño serán demasiado caras o imposibles de implementar. En estos casos, las tareas de mantenimiento se verán afectadas.

7.6 EL PROCESO DE MANTENIMIENTO EN UNA COMPAÑÍA AÉREA

La estrategia RCM se ha convertido en el proceso aceptado en todo el mundo para desarrollar programas de mantenimiento de aviones. Siguiendo el objetivo de asegurar al máximo la seguridad y fiabilidad al menor coste posible, cada año ha descendido bruscamente el número de accidentes por millón de despegues en la industria de las compañías aéreas. Al mismo tiempo, se ha reducido drásticamente la cantidad de mantenimiento preventivo empleado. Por ejemplo, en el *Boeing 747* sólo se necesitan 66.000 horas-hombre de inspección estructural para las primeras 20.000 horas de vuelo. Bajo las políticas de mantenimiento tradicionales se necesitaban cuatro millones de horas-hombre.

7.6.1 Trabajos programados y no programados

Durante la vida operativa de un avión de línea aérea, se practican sobre él trabajos programados y no programados. Los primeros se refieren fundamentalmente a las tareas de mantenimiento preventivo y condicional (vigilancia de la condición), mientras que los segundos están relacionados con las tareas de mantenimiento correctivo.

Los 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 en:

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, y 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.

Para el conjunto de la flota, **los trabajos no programados** se presentan de una forma casi aleatoria; a menudo se encuentra que la distribución de tiempos necesarios para realizar esos trabajos se aproxima mucho a una distribución lognormal²⁷, la sugerida para el estudio de los fallos por desgaste.

Parte de la demanda de trabajos de mantenimiento no programado se presenta sin previo aviso y exige una atención urgente; es difícil planificar los trabajos de emergencia y otros de alta prioridad (sin previo aviso) Como mucho, sólo se puede prever el número medio de peticiones. A veces, aunque este tipo de trabajo se denomine trabajo no programado, su demanda debe programarse en términos de personal, repuesto y equipo. En este caso, la dificultad principal es la predicción del tiempo disponible para la programación y planificación de ese trabajo.

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 y programados. Se necesita una experiencia operativa considerable si se quiere evaluar correctamente el nivel esperado de trabajo programado consecuente con una entrada de trabajo no programado. 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.

²⁷ Estudios de reparabilidad, como distribución de tiempos de reparación.

7.6.2 El caso de British Airways

La compañía aérea BA tiene una flota de más de 220 aviones de los más variados modelos (B-747, B-757,...) y fabricantes (Boeing, Airbus) 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 en ingeniería y mantenimiento de los aviones²⁸.

A lo largo de su vida operativa, un avión experimenta una serie de comprobaciones, cuidadosamente organizadas, desde la inspección pre-vuelo, simple pero profunda, hasta la revisión general de mayor importancia.

Antes de comenzar la operación diaria, el avión pasa por una inspección, un examen cuidadoso por parte de un pequeño equipo de técnicos que revisan elementos tan diversos como las ruedas, hidráulica, niveles de aceite y sistema eléctrico. Cualquier fallo de la tripulación entrante debe investigarse antes de que el avión despegue de nuevo. Incluso después de esto, ningún avión de BA despegará hasta que se somete a un cuidadoso examen final. No es simplemente una buena costumbre; es un requisito legal.

Además de la inspección diaria, el programa de mantenimiento se basa en las horas voladas o en los aterrizajes efectuados, números que pueden variar mucho según el tipo de avión. Un B-747 que realice vuelos intercontinentales puede acumular fácilmente más de 4.000 horas de vuelo al año o más de 12 horas al día y aún así, efectuará pocos aterrizajes. En cambio, un B-737, que lleve 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 4 ó 5 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, sin embargo será sustituido en el momento que alcance el límite aceptable de desgaste. Otros componentes pueden tener simplemente una vida fija; se cambian después de un cierto tiempo, independientemente de cuánto tiempo haya estado el avión en el aire.

²⁸ Datos obtenidos de la revista *Aviation Week & Space Technology* (Ed. McGraw-Hill)

La inspección diaria es sólo el comienzo del ciclo de mantenimiento. Cada 150 horas de vuelo, lo que en el caso del B-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 3 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 el avión del servicio para realizar en él una revisión de carácter intermedio. En todos los aspectos, 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 al que se somete un avión comercial. Es una revisión general de mayor importancia y tiene lugar cada 24.000 horas de vuelo, ó cada 4 ó 5 años.

Esta gran revisión general requiere un mes para completarse, durante la cual prácticamente se desguaza el avión. Se levanta el suelo, se desmontan los motores, así como las superficies de control (slats, flaps, timones de profundidad y dirección,...) y el tren de aterrizaje, inspeccionándose todas las juntas y remaches. Puede que se sustituyan paneles enteros del revestimiento y que se renueven kilómetros de cables. La tecnología nunca se detiene; los especialistas de aviónica aprovecharán una revisión como ésta 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 internas con el motor aún en su sitio (técnicas boroscópicas, etc.) Sin embargo, los motores de aviación modernos son muy fiables; es bastante corriente que un motor 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 esto no es

posible, se retira el motor entero y se le sustituye por otro recién revisado, mientras que el sustituido se envía al taller para una revisión completa.

Los aviones de BA 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 2/3 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 el aeropuerto de *Heathrow*, una veintena de aviones intercontinentales (B-747, B-767, A-340) 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 BA 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 de 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 su alcance llamarán a sus colegas de la base de mantenimiento. 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 en 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, 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 de avión es una de las partidas más costosas que tiene que afrontar una compañía aérea. Por ello, puede que para una compañía con una flota de menos de una veintena de aviones grandes, sea más barato externalizar este servicio (*outsourcing*), que soportar el coste prohibitivo de establecer su propia organización. A medida que los costes aumentan, un mayor número de compañías aéreas buscan que contratistas importantes, como por ejemplo BA, les hagan el trabajo. Para los primeros, eso significa disfrutar de magníficos servicios de mantenimiento a un precio razonable; para los segundos, supone cada año millones de libras en ingresos adicionales.

Capítulo VIII

MANTENIMIENTO BASADO EN EL EXAMEN DE LA CONDICIÓN

“Estoy convencido de que el vuelo es posible y mientras sigo investigando, más por placer que por beneficio, pienso que hay una ligera posibilidad de alcanzar fama y fortuna con esto.”

Wilbur Wright

8.1 INTRODUCCIÓN

Como parte de un programa RCM, esta técnica, también llamada “monitorización de la condición” (*Condition Monitoring; Predictive Testing & Inspection*), se basa en un nuevo enfoque de la fiabilidad.

El mantenimiento preventivo ortodoxo implica un alto coste para el usuario, ya que para poder mantener el nivel de fiabilidad requerido, 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 su vida operativa, es necesario obtener más información sobre su comportamiento a lo largo del proceso de operación. Ya que la función de fiabilidad representa la principal fuente de información, el único camino era crear un nuevo enfoque de la fiabilidad que pudiera suministrar una imagen más completa del proceso de cambio de los elementos considerados. Mediante el suministro de una información más completa del proceso de cambio en la condición, se llega 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 del mantenimiento preventivo basado en la vida del sistema (método ortodoxo), **pero con una utilización más completa de la vida operativa**, reduciendo así el coste total de operación y producción.

Es importante destacar que este tipo de mantenimiento no es aplicable a todos los tipos de ítem o modos posibles de fallo, por lo que no debería ser el único tipo de mantenimiento practicado.

8.2 EL ESTIMADOR DE LA CONDICIÓN (RCP)

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 técnico ya que, en este caso, se querrá saber lo que está pasando dentro de la caja.

Para lograrlo, es necesario describir la condición de un elemento en cualquier instante. Para ello se va a introducir el concepto de *Estimador de Condición*²⁹, **RCP**. Lo definimos como:

El parámetro que está ligado directa o indirectamente al elemento y sus prestaciones y que describe la condición del elemento durante su vida operativa. Va a tener como características fundamentales:

- *Descripción cualitativa de la condición del elemento;*
- *Cambio continuo y monótono durante el tiempo operativo;*
- *Definición cuantitativa o numérica de la condición del elemento.*

²⁹ *Relevant Condition Parameter*, distinto del concepto de estimador de un parámetro poblacional (muestreo)

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} .

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 continua.

La distribución de probabilidad de una variable es continua cuando la variable aleatoria puede tomar los infinitos valores de un intervalo. En este caso, la masa o cuantía de probabilidad se distribuye en el intervalo dado. Dado que la probabilidad de un punto es cero, es necesario introducir un concepto que aproxime tal probabilidad puntual. Dicho concepto es el de elemento diferencial de probabilidad, que viene dado por:

$$P(x < X \leq x + dx) = f(x) \cdot dx$$

donde $f(x)$ es la densidad de probabilidad en un punto, o *función de densidad* de la variable aleatoria continua X en el punto x .

De esta forma, podríamos definir la función de densidad de una variable aleatoria continua X en el punto x como el límite de la densidad media de probabilidad de un intervalo que contiene al punto x , cuando la amplitud de dicho intervalo tiende a cero. Así, la probabilidad que un modelo de distribución de probabilidad continua asigna a un punto concreto es cero, mientras que la probabilidad de cualquier intervalo, por pequeño que éste sea, vendrá dada por el área bajo la función de densidad, en dicho intervalo.

La *función de distribución* de la variable aleatoria continua X en el punto x puede expresarse de la forma:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(u) \cdot du$$

donde debe verificarse:

$$P(-\infty < X < \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) \cdot du = 1$$

La relación entre la función de densidad y la función de distribución de una variable aleatoria continua es evidente, ya que:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) \cdot du \Rightarrow F'(x) = f(x)$$

La función complementaria de la función de distribución es la *función de fiabilidad* (para variables no negativas), definida por:

$$R(x) = P(X > x) = 1 - F(x)$$

Evidentemente, se cumple que:

$$R'(x) = -f(x)$$

Al igual que la función de distribución, la función de densidad caracteriza completamente a una variable aleatoria. La *función de densidad del estimador* se expresa mediante:

$$f_{RCP(t)}(c)$$

donde **c** es el *intervalo* definido por su valor inicial, RCP_{in} , y su valor límite, RCP_{lim} .
Cuando el estimador rebasa el límite prescrito, se presenta la transición al estado de fallo.

Por 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, esto es, la fiabilidad:

$$P(RCP_{in} < RCP(t) < RCP_{lim}) = \int_{RCP_{in}}^{RCP_{lim}} f_{RCP(t)}(c) \cdot dc = R(t) \quad (8.1)$$

La ecuación (8.1) 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 adjunta:

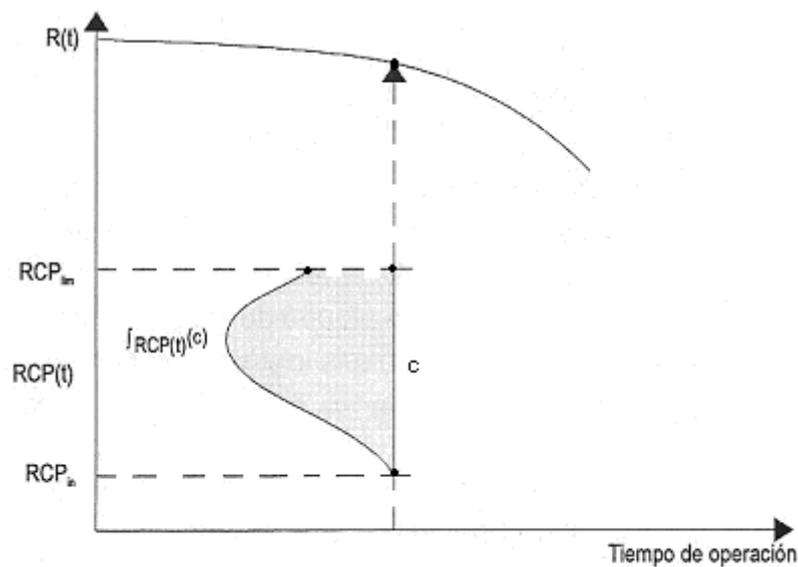


Fig.8.1. Método RCP para la fiabilidad

Se puede decir que **el método RCP representa 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 será muy valiosa en técnicas de mantenimiento, ya que puede utilizarse para la selección de la estrategia de mantenimiento.

8.3 ASPECTOS PRINCIPALES PARA EL MANTENIMIENTO

Como el nivel de fiabilidad exigido sólo puede mantenerse aplicando una política de mantenimiento preventivo, el método RCP de mantenimiento³⁰ introduce el *Nivel*

³⁰ El capítulo 9 está dedicado a un caso práctico de aplicación.

Crítico del Estimador de Condición, RCP_{cr} , más allá del cual deben realizarse las tareas de mantenimiento adecuadas.

El margen entre los valores límites y críticos será el intervalo de seguridad, y depende de la capacidad del usuario para medir la condición del elemento mediante el estimador RCP.

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

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

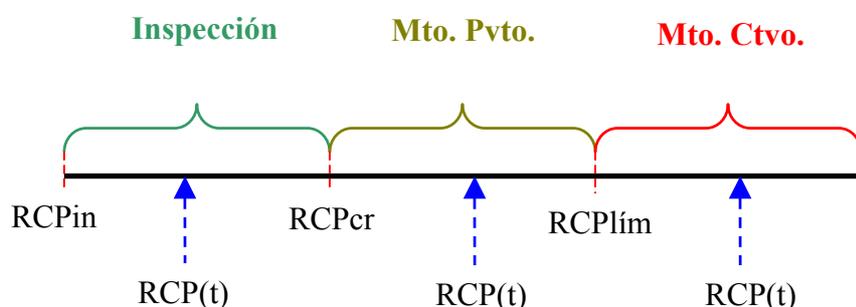


Fig. 8.2. Valores posibles del parámetro RCP

Conviene explicar esta representación. Dependiendo de la variable elegida, el desplazamiento de $RCP(t)$ hacia la derecha puede representar incrementos o decrementos³¹; lo verdaderamente importante es saber en qué intervalo -inspección, mantenimiento preventivo o correctivo- se encuentra la variable. En los siguientes

³¹ En el caso práctico analizado en el capítulo 9, el estimador de la condición elegido RCP sufre desgaste (decrementos), por lo que los signos de los estados serían los opuestos. Ejemplos del caso contrario -incrementos-: la pérdida de líquido hidráulico en un tren de aterrizaje o el aumento de la fatiga (esfuerzo) en un punto de la estructura.

epígrafes supondremos que los incrementos se producen a medida que $RCP(t)$ se desplaza hacia la derecha (es decir, RCP_{in} es el valor más pequeño de cuantos se señalan)

Para minimizar las interrupciones en la operación y así aumentar la disponibilidad del sistema, no se 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, se mantiene la **Probabilidad Exigida de Operación Fiable**, R_r ³², por lo que se satisface la siguiente ecuación:

$$R(TE_1) = P(RCP_{(TE_1)} < RCP_{lim}) > R_r$$

El resultado del examen se presenta mediante el valor numérico del *estimador de condición* $MRCP_{TE_1}$, que representa la **condición real del elemento en ese instante de tiempo**.

Con respecto al valor registrado, las dos siguientes condiciones son posibles:

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. Llegado este momento, la pregunta que surge inmediatamente es: ¿cuándo tendremos que realizar el siguiente examen, manteniendo el nivel de fiabilidad exigido?

El *tiempo hasta el siguiente examen* dependerá de la diferencia:

$$\left| MRCP_{TE_1} - RCP_{cr} \right|$$

³² Conocida también como *Fiabilidad Requerida*, determina RCP_{cr} y el tiempo hasta la primera inspección.

Cuanto mayor sea la misma, mayor será el tiempo de operación hasta el siguiente examen ($TE_2 - TE_1$) **Durante ese tiempo extra se mantiene el nivel de R_r.**

El **Momento del Siguiete Examen** es el valor TE_2 que deberá satisfacer la siguiente ecuación:

$$\int_{TE_1}^{TE_2} f(t, MRCP_{TE_1}) = \int_{MRCP_{TE_1}}^{RCP_{cr}} f_{RCP_{TE_2}}(c) \cdot dc$$

donde:

$f(t, MRCP_{TE_1})$ = Es la función de densidad de la intersección horizontal de la función aleatoria $RCP(t)$ con el nivel $MRCP_{TE_1}$

$f_{RCP_{TE_2}}$ = Es la función de densidad de la intersección vertical de $RCP(t)$ en el instante del siguiente examen.

El método descrito puede representarse gráficamente mediante el diagrama de flujo de la *figura 8.3*.

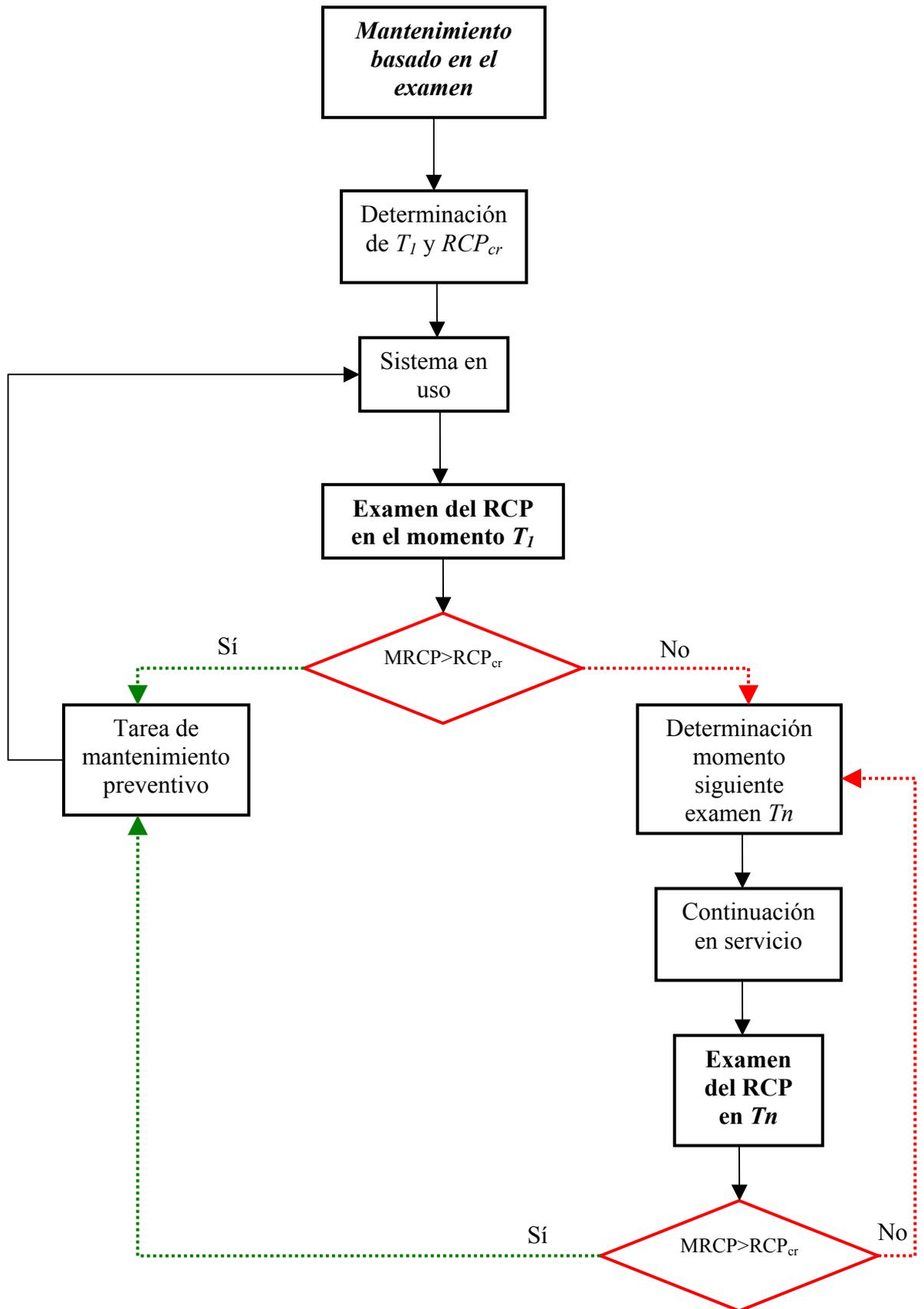


Fig.8.3. Diagrama de flujo del mantenimiento basado en la condición

8.3.1 Comparación con los métodos tradicionales

Con la técnica expuesta se va a:

1. Proporcionar el nivel de fiabilidad exigido para cada elemento individual;
2. Reducir el coste de mantenimiento como resultado de:
 - una vida operativa más larga para cada elemento individual que en el caso de mantenimiento basado en la vida del sistema (mantenimiento preventivo tradicional);
 - una mayor disponibilidad del elemento gracias a la reducción del número de inspecciones, comparado con un mantenimiento basado puramente en la inspección.
3. Facilitar, desde el punto de vista logístico, una planificación de las tareas de mantenimiento.

Centrándonos en el segundo punto, **analizaremos el ahorro que podría obtenerse empleando esta técnica.**

El objetivo principal del método es proporcionar una utilización más completa de la vida operativa de cada sistema individual que la obtenida con el mantenimiento basado en la vida del sistema, como se mostrará en la resolución del modelo desarrollado a continuación.

Conforme a la dinámica expuesta en el epígrafe anterior, todos los sistemas realizan la función esperada hasta el tiempo TE_1 .

La **Vida Operativa Media Alcanzable**, MUL_{TE_1} , será:

$$MUL_{TE_1} = \int_0^{TE_1} R_{lim}(t) \cdot dt = \int_0^{TE_1} \left[\int_{RCP_{in}}^{RCP_{cr}} f_{RCP(t)}(c) \cdot dc \right] \cdot dt$$

Según la estrategia adoptada como consecuencia del examen (inspección) en el tiempo TE_1 , se realizarán las tareas de mantenimiento prescritas en algunos de los sistemas si:

$$RCP_{cr} < RCP(t) < RCP_{lim}$$

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:

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

En esta ecuación, $R_{cr}(t)$ 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 indica un aumento medio de la utilización durante la vida operativa del sistema gracias al nuevo método desarrollado.

Según el modelo, la *media para la vida operativa alcanzable* en el caso del mantenimiento basado en la condición será:

$$MUL^e = MUL_{TE_1} + EMTTF$$

siendo:

EMTTF: Mejora de la esperanza matemática de la variable aleatoria tiempo hasta el fallo (esto es, el ***Incremento de la Vida Media***)

De forma gráfica, se representaría así:

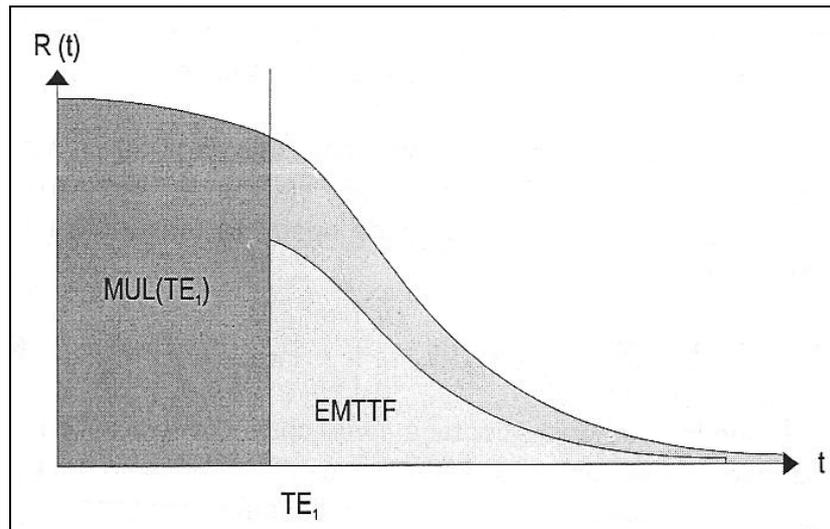


Fig. 8.4. Vida en servicio siguiendo una estrategia basada en la condición

El *Coficiente de Utilización*, en este caso, será:

$$CU = \frac{MUL}{MTTF} = \frac{\int_0^{TE_1} R_{lim}(t) \cdot dt + \int_{TE_1}^{\infty} R_{cr}(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} R_{lim}(t) \cdot dt} = \frac{MUL + EMTTF}{MTTF}$$

Observando la *figura 8.4*, sabiendo que:

$$E(EOL) = EMTTF$$

CU resulta ser un coeficiente mayor que el obtenido en el mantenimiento preventivo (ver figura 5.3)

Conviene tener presente que el capital físico y humano (instrumentación y técnicos especialistas) dedicado a esta labor puede llegar a ser importante. El entrenamiento y la certificación suelen demandar elevados recursos, teniendo en cuenta que muchos ítems pueden ser no-standard; los costes, en consecuencia, pueden ser elevados. Entre las actuaciones para minimizar estos efectos estarían las siguientes:

- ✓ Especificación de los requerimientos de mantenimiento al fabricante, facilitando su consideración en la fase de diseño del producto;
- ✓ Inclusión de un plan de formación en el contrato de adquisición del equipo, pactando un soporte técnico adecuado a las capacidades del adquirente.

8.4 UNA ALTERNATIVA: LA INSPECCIÓN PROGRAMADA

La inspección es una tarea de mantenimiento condicional que tiene como resultado un informe sobre la condición del elemento, es decir, si ésta es satisfactoria o no, lo que se determina en el ámbito de RCI (en cada momento programado de inspección) El rasgo común de todas estas tareas es que **los resultados obtenidos no tienen ningún efecto sobre la programación de la siguiente inspección, al contrario de lo que sucedía en la política basada en el examen de la condición.**

Antes de que el ítem se ponga en servicio, se determina la *frecuencia más adecuada para las inspecciones*, TI^i . Así, **durante la operación del elemento o sistema las inspecciones se llevan a cabo a intervalos fijos especificados hasta que se alcanza el nivel crítico:**

$$RCI(TI^i) > RCI_{cr}$$

Siendo RCI_{cr} un valor límite, equivalente al RCP_{lim} descrito en un apartado anterior. **En ese momento se realizan las tareas de mantenimiento preventivo.** Si el elemento falla entre inspecciones, se realiza un mantenimiento correctivo.

El algoritmo presentado en la *figura 8.5* muestra el procedimiento de mantenimiento basado en la inspección para la vigilancia de la condición.

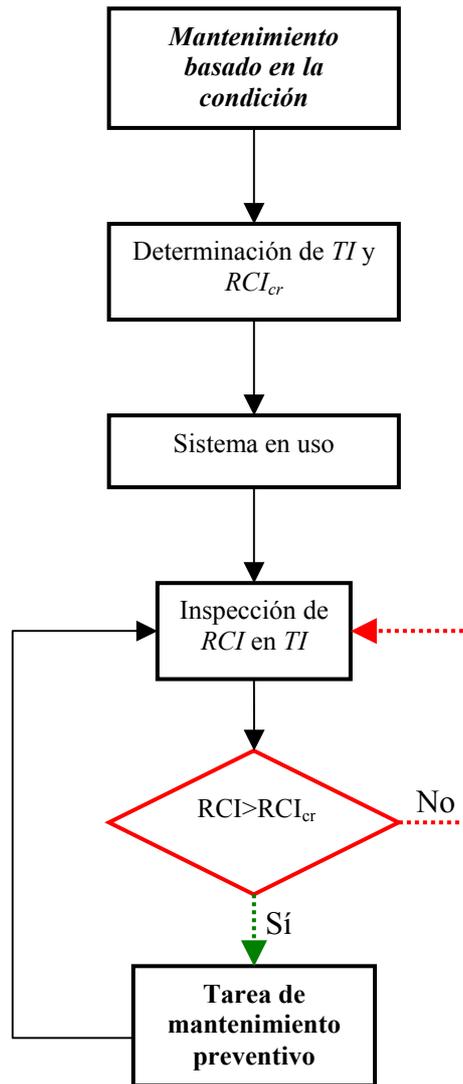


Fig. 8.5. Diagrama de flujo de una política basada en la inspección

El *Coefficiente de Utilización*, CU , de la vida del elemento, cuya sustitución se basa en la condición que presenta, puede determinarse según la siguiente expresión:

$$CU^i = \frac{MTIR}{MTTF} = \frac{\int_0^{\infty} R_{RCI_{cr}} \cdot dt}{MTTF}$$

siendo:

MTIR = Tiempo medio hasta la sustitución del elemento.

En esta estrategia de mantenimiento, el criterio de optimización es el nivel exigido de fiabilidad, R_r .

La *frecuencia de realización* de las tareas de mantenimiento condicional en forma de inspección viene dada por la siguiente expresión³³:

$$TI^i = A \cdot [-\log(R_r)]^{\frac{1}{B}} \quad (8.2)$$

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

8.4.1 Análisis de un caso práctico

Para examinar el impacto del mecanismo del fallo en la frecuencia de las inspecciones, hemos escogido 3 mecanismos diferentes³⁴: X, Y, Z. Cada mecanismo se ha modelizado según la distribución de probabilidad de *Weibull*, con parámetros específicos dados en la tabla adjunta.

Calcularemos T_1 para un nivel de fiabilidad $R_r = 0.88$

Mecanismo	Parámetros de escala (horas)	Parámetro de forma	Función de riesgo
X	100	0.77	Decreciente
Y	100	1.00	Constante
Z	100	1.77	Creciente

Tabla 8.1. Parámetros de Weibull para los mecanismos examinados

Haciendo uso de la *ecuación (8.2)*, en la tabla adjunta se presentan los valores calculados de las frecuencias de inspección para los 3 mecanismos de fallos analizados.

³³ Knezevic, Jezdimiz, "Mantenimiento", ISDEFE, Publicaciones de Ingeniería de Sistemas, 1.996.

³⁴ Datos obtenidos del libro de Sherif, Y.S. & Smith M.L. (ver bibliografía)

i	TI _x ⁱ (hrs)	TI _y ⁱ (hrs)	TI _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 8.2. Intervalos de inspección de los mecanismos

Los resultados presentados en la tabla 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 (mecanismo X), la frecuencia también decrece -los tiempos hasta la siguiente inspección son cada vez mayores-, mientras que en el caso de función de riesgo creciente (mecanismo Z), la frecuencia de inspecciones es creciente -los tiempos hasta la siguiente inspección son cada vez menores-, como era de esperar. En conclusión:

- ✓ La frecuencia de las inspecciones viene determinada por el nivel de riesgo que se le conceda al mecanismo (creciente, constante o decreciente); ciertamente, un enfoque cualitativo;
- ✓ La programación de la siguiente inspección viene determinada de antemano, desaprovechando los datos que se van obteniendo en cada una de ellas -sus posibles efectos-.

Capítulo IX

ALGORITMO PARA UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO BASADA EN EL EXAMEN DE LA CONDICIÓN

“Aprender de las aves el secreto de volar es como aprender la magia de un mago. Después de saber lo que has de buscar, ves cosas en las que no te fijabas cuando no sabías exactamente dónde buscar.”

Orville Wright³⁵

9.1 INTRODUCCIÓN

Nuestro propósito es construir, a partir de un muestreo, un modelo matemático³⁶ del comportamiento aleatorio de un dispositivo que nos ayude a optimizar el mantenimiento de éste y, como consecuencia de ello, maximizar su vida útil. De forma esquematizada, el proceso será el siguiente:

- ✓ Ajustaremos los datos observados para la fuente de comportamiento aleatorio “tiempo hasta la aparición del fallo” mediante una distribución estadística continua conocida;
- ✓ Obtendremos la *función de fiabilidad*;
- ✓ Definiremos la *función de deterioro del dispositivo* utilizando la técnica de regresión;
- ✓ Mediante un algoritmo que maneje ambas curvas, prolongaremos la vida operativa de aquél con la restricción de la fiabilidad exigida durante la operación del mismo.

La función de fiabilidad $R(t)$ obtenida a partir de la función de distribución ajustada $F(t)$ nos servirá para establecer el momento en que se deberá realizar la primera inspección al elemento, programando así el mantenimiento de manera más precisa. El contraste de los valores teórico y observado del parámetro elegido como estimador de su condición para un nivel de fiabilidad exigido por el usuario del elemento/sistema, se utilizará en la

³⁵ El 17 de diciembre de 1903 protagonizó el primer vuelo tripulado en un avión propulsado (Kitty Hawk, NC). Recorrió una distancia de 40m en 12 sg.

³⁶ Ver apéndice B, apartado “Ecuaciones del modelo”

consecuente toma de decisiones tras la primera inspección: continuación de las operaciones (determinación del tiempo hasta el siguiente examen), ejecución de la tarea de mantenimiento o sustitución del elemento bajo monitorización.

Software para el modelado de inputs:

El ajuste de datos mediante una distribución teórica es un proceso nada trivial que puede requerir una gran cantidad de cálculos, razón por la que se han venido desarrollando diversos programas informáticos específicamente diseñados para el modelado de las observaciones de fenómenos aleatorios. Caben destacar los siguientes:

ExpertFit (*Law, McComas; 2003*)

StatFit (*Leemis; 2002*)

BestFit (*Sugiyama, Chow; 1997*)

Muchos de los principales entornos informáticos de simulación (Arena, Extend, SimProcess, Simul8, @Risk, etc.) incluyen alguno de los programas anteriores, e incluso los paquetes estadísticos genéricos como Minitab, SAS ó SPSS tienden a incluir herramientas propias, cada vez más sofisticadas, que faciliten al investigador el ajuste de datos mediante alguna distribución teórica.

No obstante, en aras de una explicación más detallada, prescindiremos del empleo de un software tan específico y en su lugar utilizaremos como apoyo, para la resolución del caso práctico enunciado más adelante, el paquete informático **Microsoft Excel**³⁷. Con la ayuda de esta herramienta, hemos desarrollado un original programa informático bautizado con el nombre de “**SuAP (Support Analysis Program)**”. Se trata de un programa de bajo coste, preciso, de fácil aplicación y mantenimiento. A lo largo del presente capítulo se darán detalles del mismo; además, el *apéndice C* contiene instrucciones de operación.

³⁷ Ver Pérez, C.: “Estadística Aplicada a través de Excel”; Pearson Educación, S.A., 2.002.

9.2 ENUNCIADO DE UN CASO PRÁCTICO

Este supuesto representa una aplicación práctica del **mantenimiento basado en el examen de la condición**. El propósito de este epígrafe es demostrar la mejora que esta técnica representa frente a los métodos empleados tradicionalmente.

Estudiaremos el caso del mantenimiento de los contactores de una flota de 37 vehículos eléctricos utilizados para el reparto diario de material en una cadena de montaje³⁸. Expondremos una situación de partida, esto es, la estrategia de mantenimiento programado tradicional establecida por los técnicos de mantenimiento, pasando después a desarrollar una política alternativa más eficiente, basada en el examen de la condición.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:

El modelo de vehículo eléctrico tiene un peso (con carga) de 2,5 Tm. y lleva motores en serie de corriente continua de 3 Kw., alimentados por baterías de tracción de 60V. a través de un controlador que actúa sobre cuatro contactores como respuesta al 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. Centraremos la discusión en los primeros.

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

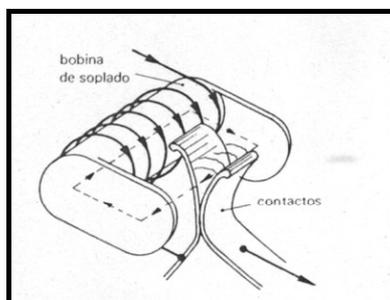


Fig. 9.1. Funcionamiento de un contactor

³⁸ Datos obtenidos del libro de Knezevic, J (1996): "Mantenimiento". El algoritmo (programa informático) y el desarrollo expuesto en el apartado 9.7 corresponde al autor de la presente tesis doctoral.

El contactor, al igual que el relé, es un conmutador eléctrico formado por un electroimán y unos contactos conmutadores mecánicos que son impulsados por el electroimán. Las diferencias radican en los valores eléctricos que se manejan con uno y otro dispositivo. El contactor está pensado para trabajar como interruptor automático, con corrientes y tensiones más elevadas; de hecho, va provisto de tres contactos abiertos llamados principales, más robustos que los restantes. Estos contactos principales son los destinados a las maniobras del circuito de potencia de los montajes tales como alimentación de motores. El circuito electromagnético, la bobina, la espira de sombra realizan idéntica función, y la diferencia estriba en el tamaño y algún otro detalle de poca importancia.

El trabajo con elevados valores de tensión y corriente hace imprescindible el uso de sistemas de separación entre contactos, cosa que no es necesaria en los relés. Las cámaras donde se alojan los contactos evitan la ionización del aire producida por el arco que salta entre los mismos y con ello se favorece la extinción de dicho arco, aumentando así la vida del contactor.



Fig. 9.2. Contactor real

POLÍTICA de MANTENIMIENTO:

La política de mantenimiento tradicional consistiría en poner en práctica el siguiente mantenimiento preventivo: **vigilancia visual de los juegos de contactos cada seis semanas, y su correspondiente sustitución tras 3 ó 4 inspecciones**, con el resultado de que los juegos de contactos no se utilizarían por completo. Esta consecuencia justifica una investigación cuyo objetivo principal es establecer unos criterios de

sustitución basados en un patrón coherente y determinar una estrategia de control, a fin de:

- Suministrar el nivel exigido de fiabilidad del vehículo;
- Prolongar la vida operativa alcanzable;
- Reducir los costes de mantenimiento.

Para alcanzar estos objetivos mediante el mantenimiento basado en el examen de la condición, 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 operativas en servicio;
- 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 de la condición, independientemente del sistema investigado. Los siguientes apartados bosquejan con más detalle su aplicación a este caso concreto.

9.3 IDENTIFICACIÓN DEL ESTIMADOR DE CONDICIÓN (RCP)

El estimador que define con más precisión la condición de los juegos de contactos para cuantificar su deterioro es la **carrera del interruptor**. Esta variable representa la distancia entre el aislante del émbolo y la sección móvil de cobre de los contactos, cuando el émbolo está completamente presionado; constituyendo una indicación directa del desgaste del extremo.

Con unos contactos sin utilizar, la carrera media es de 2.1 mm, mientras que según las especificaciones técnicas, **una cifra típica de carrera para la sustitución es de 0.3 mm.**

9.4 ELECCIÓN DEL ESTIMADOR DE MANTENIMIENTO (RMP)

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

Se precisan sensores para registrar directamente esta variable, por lo que se decidió 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 los contactos con los días de uso. Para lograrlo, se instalaron contadores especialmente diseñados en 3 vehículos con diferentes 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, para que la información pudiera ser útil, la función de deterioro real para los juegos de contactos.

9.5 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 accidentada, con una pendiente del 25%, exigiendo un uso a fondo del acelerador y los frenos. Se encontró que, aunque el máximo de corriente en el motor pasaba de los 500 A, la máxima corriente a la que se dispara cada contactor durante el servicio normal era de 135A.

9.6 ENSAYO DE LA DURACIÓN

Se llevó a cabo un examen de desgaste acelerado, en el que los interruptores bajo examen estaban conectados con un generador compound de c.c., 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.

En cuanto al tipo de contactor, la decisión fue utilizar una combinación de contactores electrónicos y electromecánicos abarcando así todo el espectro, 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 adherencia. Este método proporcionó resultados muy fiables. Los 7 primeros juegos de contactos fallaron entre las 4.000 y las 70.000 operaciones, a pesar del perfecto estado de las puntas y con una carrera mucho mayor que el valor límite. Para eliminar este mal funcionamiento del juego de contactos que aparentemente estaban en buen estado, se realizó una pequeña modificación en su diseño mediante un proceso FRACAS³⁹ que hizo posible el servicio satisfactorio de cada contacto hasta el valor límite permisible de la carrera. Esto aumentó de manera ostensible el número de operaciones correctas.

Tras esto, se examinaron 10 conjuntos de contactos bajo las mismas condiciones. Al comienzo del ensayo y cada 100.000 operaciones se midió el valor de la carrera, usando una galga especialmente diseñada. Los resultados se pueden ver en la siguiente matriz de condición.

³⁹ *Failure Reporting Analysis and Corrective Action System*. Ver apartado 7.5

Miles de operaciones	Valores de carrera (RCP) en 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	2.00	2.10	2.10	1.80	2.20	2.10
100	1.80	1.90	1.65	1.82	1.95	2.00	2.00	1.70	1.90	1.95
200	1.70	1.85	1.60	1.65	1.90	1.95	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	0.50	0.70	0.50	1.25	1.10	0.80	0,85	0.60
800	0.80	0.90	0,30	0,50	0,35	1.05	0.90	0,60	0.65	0,30
900	0.65	0.70	-	0.35	0,30	0.85	0.75	0,45	0,50	-
1000	0.45	0.45	-	0,30	-	0.65	0,55	0,30	0,30	-
1100	0,30	0.35	-	-	-	0.45	0.40	-	-	-
1200	-	0,30	-	-	-	0,30	0,30	-	-	-

Tabla 9.1. Matriz de condición para 10 juegos de contactos

9.7 ALGORITMO PARA EL MANTENIMIENTO

La estrategia de mantenimiento debe garantizar que no se llega a alcanzar el valor límite de la carrera, RCP_{lim} . El razonamiento expuesto en los apartados siguientes constituye el detalle del diagrama de flujo reflejado en el capítulo 8, *figura 8.3*, teniendo en cuenta, a la hora de establecer los signos, que el estimador de condición se encuentra sometido a desgaste.

La esencia de la estrategia de mantenimiento propuesta es que se puede conseguir una fiabilidad de 0,9 si los juegos de contactos se usan, sin necesidad de inspección, desde que son nuevos hasta el número de operaciones invertidas en alcanzar ese nivel de fiabilidad (esto es, desde $R = 1$ hasta $R = 0.90$), en cuyo momento se debe llevar a cabo

el primer examen (T_1), medir la carrera y tomar las oportunas decisiones de mantenimiento.

Las decisiones apropiadas se han de basar en el valor medido de la carrera en ese momento, MRCP, y a partir de ese valor las decisiones apropiadas son⁴⁰:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MRCP} \geq \text{RCP}_{\text{cr}}: \text{continuación de las inspecciones o exámenes;} \\ \text{RCP}_{\text{cr}} > \text{MRCP} > \text{RCP}_{\text{lim}}: \text{se precisa la tarea de mantenimiento preventivo;} \\ \text{RCP}_{\text{lim}} \geq \text{MRCP}: \text{es necesaria la tarea de mantenimiento correctivo, porque} \\ \text{el fallo ya ha ocurrido.} \end{array} \right.$$

Si nos encontramos en el primer caso, la pregunta que surge inmediatamente es: ¿cuándo debemos realizar el siguiente examen (T_2) para conservar el nivel de fiabilidad exigido?

9.7.1 Función de deterioro del elemento

Se nos plantea el problema de ajustar una curva a un conjunto de datos representados por puntos. Las técnicas disponibles para este fin pueden dividirse en dos categorías generales: *regresión e interpolación*. La primera se emplea cuando hay un grado significativo de error asociado a los datos; con frecuencia los datos experimentales son de esta clase, por ejemplo, el caso que nos ocupa.

La regresión puede ser de varios tipos:

- ✓ **Lineal simple**: disponemos de una variable independiente -el número de actuaciones-. La representaremos mediante una línea recta;

⁴⁰ Si se compara con lo expuesto en 8.3, la diferencia estriba en que el desplazamiento de RCP(t) supone decrementos, por lo que los signos son los opuestos.

- ✓ **Polinómica:** se emplea cuando los datos, aunque exhiban un patrón marcado, están pobremente representados por una línea recta;
- ✓ **No lineal:** estos modelos se definen como aquellos que tienen dependencia no lineal de sus parámetros. Al igual que en el caso lineal, la regresión no lineal se basa en la determinación de los valores de los parámetros que minimizan la suma de los cuadrados de los residuos; sin embargo, para el caso no lineal, la solución debe proceder en una forma iterativa.

El primer paso en cualquier análisis de regresión consiste en dibujar el gráfico de dispersión e inspeccionarlo en forma visual para asegurarnos si se puede utilizar un modelo lineal⁴¹. Por lo tanto, descartamos la opción no lineal y estableceremos tres opciones:

Regresión de polinomios: tercer orden

$$e = 1,7906677 \cdot 10^{-9} \cdot n^3 - 3,0549005 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 - 2,7490878 \cdot 10^{-4} \cdot n + 1,9574647$$

$$R^2 = 0,99732763$$

Regresión de polinomios: segundo orden

$$e = 1,6830134 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 1,7611629 \cdot 10^{-3} \cdot n + 2,0756487$$

$$R^2 = 0,98268195$$

Regresión lineal: recta

$$e = -1,5592013 \cdot 10^{-3} \cdot n + 2,0386224$$

$$R^2 = 0,98142413$$

La primera de las curvas –polinomio de 3er orden- tiene el coeficiente de correlación⁴² más alto de las tres; además, presenta una asíntota horizontal aproximadamente en $e = 0,3$ (precisamente el valor límite de la carrera) Observando la misma, presenta un punto de inflexión (el deterioro relativo es cada vez menor cuanto más actuaciones acumula),

⁴¹ Ver fichero titulado “Gráficos” en el CD adjunto o, en su defecto, la figura 9.3.

⁴² “Statistics for Managers using Microsoft Excel (2002)”. Prentice Hall International, Inc. Pág. 139-The Coefficient of Correlation.

comportamiento irracional que representaría un modelo optimista que, en materia de mantenimiento predictivo, resultaría peligroso.

Conviene diferenciar lo que es pura herramienta matemática (en este caso la cúbica sería lo mejor) del objetivo final (que una avería no te cause un daño y/o coste de mayor relevancia que el coste del mantenimiento/sustitución)

Sólo se precisa una estimación en puntos localizados entre valores discretos. En el caso del contactor, debido a que cualquier dato individual puede ser incorrecto, no se necesita interceptar cada punto, cosa que, de forma muy aproximada, hace la función polinómica de tercer orden representada en la figura 9.3.

Por lo anteriormente expuesto, utilizaremos el **modelo de regresión lineal** representado por la ecuación:

$$e = -1,5592013 \cdot 10^{-3} \cdot n + 2,0386224$$

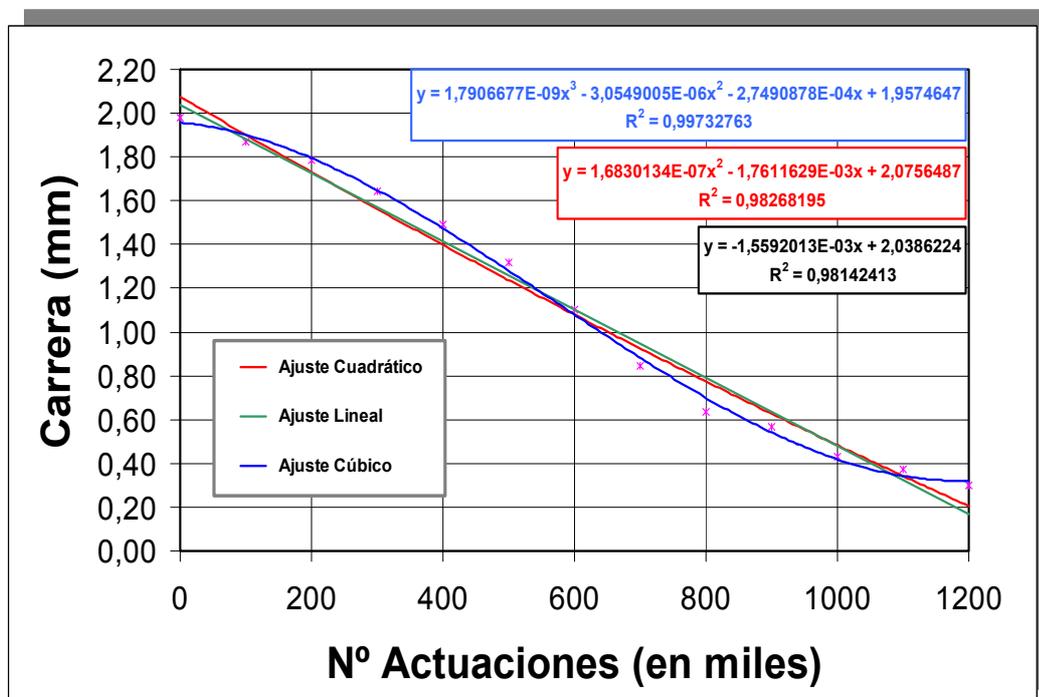


Fig. 9.3. Curvas de regresión de la función de deterioro

Aunque los coeficientes de correlación proporcionan una manera fácil para medir la bondad del ajuste, se deberá tener cuidado, ya que es posible obtener un valor relativamente alto de este coeficiente cuando la relación entre las variables NO es lineal.

Hipótesis de independencia:

Conviene recordar en este punto que uno de los supuestos necesarios a la hora de aplicar determinadas técnicas estadísticas es la independencia de las observaciones que conforman la muestra. Por tanto, antes de proceder al modelado, resultará conveniente asegurarse de que dicho supuesto se verifica o, como mínimo, de que no hay indicios para pensar lo contrario.

La mayoría de los programas estadísticos de uso general incluyen herramientas y opciones que facilitan dicho estudio. **Lo importante es que en los gráficos resultantes no se observen agrupaciones o patrones extraños que hagan sospechar que la hipótesis de independencia no se cumpla.** En el caso que nos ocupa, no se aprecian, luego aceptamos la hipótesis.

9.7.2 Ley de fallo del dispositivo

Nos centraremos ahora en encontrar una distribución teórica que describa matemáticamente la ley de fallo del dispositivo.

Como ocurre en el caso de la mortalidad humana en el periodo senil, los fallos por desgaste tienden a distribuirse alrededor de una vida media de desgaste con una curva de densidad acampanada. Esto implica considerar únicamente las unidades que fallen efectivamente por desgaste, excluyendo las falladas por mortalidad infantil o por azar. La forma simétrica de la distribución normal sugiere además la existencia de un mecanismo de fallo único (o, por lo menos, dominante) en el componente.

En general, los componentes mecánicos y electromecánicos fallan predominantemente por desgaste. Particularmente, **en el caso de un tipo de dispositivo que tenga sólo un**

mecanismo de fallo por desgaste claramente dominante, el empleo de la distribución normal como distribución de fallos es un modelo razonable⁴³.

Una razón importante para la frecuente aplicación de la distribución normal es el hecho de que, cuando un valor está sujeto a muchas fuentes de variación, independientemente de cómo estén distribuidas las variaciones, la distribución resultante se puede aproximar a la distribución normal (o de Gauss) Esto se conoce como *Teorema Central del Límite*. En otras palabras, el teorema dice que, si el tamaño de la muestra es muy grande, la distribución se aproxima a la distribución normal. La superposición de las variables aleatorias independientes siempre tiende a la *normalidad*, independientemente de que la distribución de cada una de esas variables contribuyan a la suma. Cómo de grande haya de ser la muestra para que se cumpla esta hipótesis depende del problema bajo análisis. En cualquier caso, ocurre con mucha frecuencia en la naturaleza.

El teorema expuesto justifica el uso de la distribución normal en Ingeniería⁴⁴, particularmente en el control de calidad de elementos sometidos a fallos por desgaste. Supongamos que el desgaste de un componente depende de varios factores, y que cada uno de ellos sea aleatorio y sigue una distribución distinta. Si ninguno de los factores se erige como dominante y el tiempo de desgaste puede expresarse como suma de esas variables aleatorias, entonces t puede ser descrito como una distribución normal, aunque ninguna de las variables que contribuyen al desgaste siga una distribución normal.

9.7.3 Estimación de los parámetros de una distribución $N(\theta, \sigma)$

Nos referimos a la media y desviación típica del desgaste de una distribución normal.

Cuando se realiza una afirmación acerca de los parámetros de la población en estudio basándose en la información contenida en la muestra, decimos que estamos ante *estimaciones*.

Para ensayar un dispositivo cuya vida de desgaste puede considerarse normalmente distribuida, deberemos usar una muestra compuesta de unidades nuevas (o con vida

⁴³ Warletta, J. "Fiabilidad": 24

⁴⁴ D.T. O'Connor, "Practical Reliability Engineering":36; Ramakumar, R, "Engineering Reliability": 96

anterior conocida) Conviene ensayar la muestra hasta el fallo de todas las unidades; las muestras serán generalmente menores que las usadas con la hipótesis exponencial, pero el tiempo de espera (duración del ensayo) suele ser mucho más largo, ya que en el caso exponencial se tiene buen cuidado de no llegar al desgaste.

Las unidades que fallan por azar durante un ensayo de vida de desgaste deben ser cuidadosamente identificadas (análisis de los fallos) y eliminadas totalmente de la muestra. Tampoco su tiempo hasta el fallo por azar deberá tenerse en cuenta.

Ensayando hasta el fallo n vidas de desgaste, siendo n el tamaño de la muestra (en nuestro caso, $n = 10$), los n tiempos hasta el fallo registrados t_1, t_2, \dots, t_n , constituyen la información muestral buscada.

T₁	T₂	T₃	T₄	T₅	T₆	T₇	T₈	T₉	T₁₀
1100	1200	800	1000	900	1200	1200	1000	1000	800

Tabla 9.2. Tiempos hasta el fallo (obtenidos de la tabla 9.1)

La estimación puntual de la media es:

$$\hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

En nuestro caso, sin descartar ninguna observación, con lo que tendremos una muestra de tamaño $n = 10$:

$$\hat{\theta} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t_i = 1020 \text{ operaciones}$$

Estimación puntual de la desviación típica:

La *media muestral* $\hat{\theta}$ es un estimador insesgado de θ , pero el estimador de máxima verosimilitud de σ^2 tiene sesgo. Por ello, se usa la *cuasivarianza muestral*⁴⁵, que es un estimador insesgado de σ^2 :

⁴⁵ llamado frecuentemente varianza muestral, aunque tal denominación corresponde con mayor propiedad al estimador de máxima verosimilitud $\hat{\sigma}^2$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{\theta})^2$$

luego:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \hat{\theta})^2}$$

que, en nuestro caso:

$$s = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (t_i - 1020)^2} = 154,92 \text{ operaciones}$$

Cálculo de intervalos de confianza para θ y σ :

Definir un intervalo de confianza para un parámetro poblacional al nivel de confianza α es hallar un intervalo real para el que se tiene una probabilidad $(1-\alpha)$ de que el verdadero valor del parámetro caiga dentro del citado intervalo. El valor $(1-\alpha)$ suele denominarse *coeficiente de confianza*.

Como sabemos, la distribución *t de Student* se emplea para hallar intervalos de confianza y contrastar la media de una población normal de varianza desconocida, a base de una muestra pequeña.⁴⁶

Dado que no conocemos la verdadera desviación típica de la población⁴⁷, para un nivel de confianza $(1-\alpha)$, tendremos:

$$\text{Límites bilaterales} \begin{cases} \theta_S = \hat{\theta} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{n-1; \alpha/2} \\ \theta_I = \hat{\theta} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{n-1; \alpha/2} \end{cases}$$

Los valores de las fractilas derechas de t , para el número de grados de libertad que corresponda, deben hallarse en una tabla de la distribución de “Student”.⁴⁸

⁴⁶ Ver apartado A.4 del apéndice.

⁴⁷ la ignorancia de este dato aumenta la incertidumbre, aunque muy ligeramente.

⁴⁸ Para muestras grandes, la distribución t , para un nº de grados de libertad ≥ 30 , coincide prácticamente con la normal $(0,1)$

En nuestro caso, para un intervalo de confianza del 80% (esto es, $1 - \alpha = 0,8$):

$$\theta_s = 1020 + \frac{154,92}{\sqrt{10}} t_{9,0,10} = 1020 + \frac{154,92}{\sqrt{10}} \cdot 1,383 = 1087,75 \text{ operaciones}$$

$$\theta_l = 1020 - \frac{154,92}{\sqrt{10}} t_{9,0,10} = 1020 - \frac{154,92}{\sqrt{10}} \cdot 1,383 = 952,25 \text{ operaciones}$$

Es conocido que la distribución *chi-cuadrado* se usa en estadística para resolver numerosas cuestiones de inferencia⁴⁹. Concretamente, para hallar intervalos de confianza y contrastar la varianza de una población normal a base de una muestra pequeña, y para hacer contrastes de bondad de ajuste.

$$\text{Límites bilaterales} \begin{cases} \sigma_s = s \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1;1-\alpha/2}^2}} \\ \sigma_l = s \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1;\alpha/2}^2}} \end{cases}$$

Los valores de las fractilas superiores de χ^2 deben obtenerse de una tabla de la distribución chi-cuadrado para el número de grados de libertad que corresponda.

$$\sigma_s = 154,92 \cdot \sqrt{\frac{9}{4,168}} = 227,65 \text{ operaciones}$$

$$\sigma_l = 154,92 \cdot \sqrt{\frac{9}{14,684}} = 121,28 \text{ operaciones}$$

9.7.4 Comprobación de la bondad del ajuste

Los métodos usuales de medición y demostración de la fiabilidad se basan en la hipótesis de que los fallos sigan una determinada ley de mortalidad (exponencial,

⁴⁹ Ver apartado A.5 del apéndice.

normal, etc.) Los parámetros de la distribución de fallos se estiman o se contrastan de acuerdo con esta suposición. Se comprende que si la hipótesis de distribución fuese falsa, nuestra estimación o nuestro contraste no tendrán validez.

Los contrastes de bondad de ajuste⁵⁰ tienen como finalidad saber si es razonable suponer que la población de la que procede una muestra de n valores observados tiene una distribución dada. Son contrastes de significación que se basan en alguna medida de desviación de los valores observados respecto de los esperados. No debe esperarse de ellos una confirmación de nuestra hipótesis; el contraste sólo es significativo cuando el resultado aconseja rechazar la hipótesis. En este caso, podemos decir que la muestra es “rara” como imagen de la población hipotética. Si la medida de desviación no es grande, no tenemos motivo para rechazar la hipótesis de distribución, pero la muestra también podría proceder de una población distribuida según una ley distinta de la establecida como hipótesis. Por ello, no es en general razonable aceptar la primera hipótesis de distribución que nos dé resultado no significativo.

El abanico de posibilidades, en caso de utilizar el software estadístico específico antes mencionado, sería el siguiente:

Comprobación visual: Superponer al histograma de los datos, la función de densidad de la distribución teórica que se quiere utilizar como modelo.

Utilizar gráficos de probabilidad (*Law, Keltom; 2000*), (*Banks; 1998*)

Test *Chi-cuadrado*: La filosofía subyacente es cuantificar numéricamente la discrepancia existente entre la forma de la función de densidad y la del histograma, de forma que se pueda tomar una decisión sobre la bondad del ajuste basada en el valor de un estadístico de contraste en lugar de tomarla sobre la base de apreciaciones visuales.

Tests *Kolmogorov-Smirnov & Anderson-Darling*: A diferencia del anterior, que es un test de área, estos son tests de distancia; comparan la “distancia” existente entre la

⁵⁰ Estadística Aplicada a través de Excel, Prentice-Hall, Pág. 352.

función de distribución empírica y la función de distribución teórica usada como modelo.

Los tests de bondad del ajuste tienden a ser poco potentes para muestras de pequeño tamaño. En estos casos, resulta aconsejable complementar el empleo de estos tests con los métodos gráficos.

CONTRASTE DE LA HIPÓTESIS NORMAL⁵¹

La demostración de la fiabilidad de un tipo de componente cuya vida de desgaste puede considerarse normalmente distribuida, consistirá en contrastar un valor especificado (mínimo) de la vida media, θ_e , y un valor especificado (máximo) de la desviación típica, σ_e . El contraste, para un nivel de confianza $(1-\alpha)$, será como se indica a continuación:

a/ **Para la vida media**, sin conocer σ , aceptar si:

$$\theta_e < \hat{\theta} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{n-1;\alpha}$$

que, en nuestro caso:

$$\theta_e < 1020 - \frac{154,92}{\sqrt{10}} t_{9;0,2} = 1020 - \frac{154,92}{\sqrt{10}} \cdot 0,883 = 976,74$$

b/ **Para la desviación típica**, aceptar si:

$$\sigma_e > s \sqrt{\frac{n-1}{2 \chi_{n-1;1-\alpha}^2}}$$

⁵¹ “Statistics for Managers using Microsoft Excel (2002)”. Prentice Hall International, Inc. Pág. 242- Evaluating the Normality Assumption.

$$\sigma_e > 154,92 \cdot \sqrt{\frac{9}{\chi_{9;0,8}^2}} = 154,92 \cdot 5,38 = 200,37$$

En ambos casos, de cumplirse la desigualdad correspondiente, aceptamos con una confianza no inferior a $(1 - \alpha)$ de no equivocarnos.

En el apartado 9.7.3. obtuvimos que:

$$\begin{cases} \theta_I = 952,25 \\ \sigma_S = 227,65 \end{cases}$$

dado que:

$$\begin{cases} \theta_e = \theta_I = 952,25 < 976,74 \\ \sigma_e = \sigma_S = 227,65 > 200,37 \end{cases}$$

podemos, pues, aceptar la hipótesis de distribución normal.

9.7.5 Funciones de densidad, distribución y fiabilidad

Aceptada la hipótesis de distribución normal, obtendremos las gráficas⁵² de las funciones de densidad $f(t)$, distribución $F(t)$ (no-fiabilidad⁵³) y fiabilidad $[R(t) = 1 - F(t)]$

$$N(1020, 154.92)$$

En el apartado A.3. del Apéndice A, se encuentran las fórmulas de estas funciones.

⁵² “Statistics for Managers using Microsoft Excel (2002)”. Prentice Hall International, Inc. Pág. 243-Constructing the Normal Probability Plot.

⁵³ También conocida por “infiabilidad”. Ver fichero titulado “Gráficos” en el CD adjunto (programa “SupportPlus”)

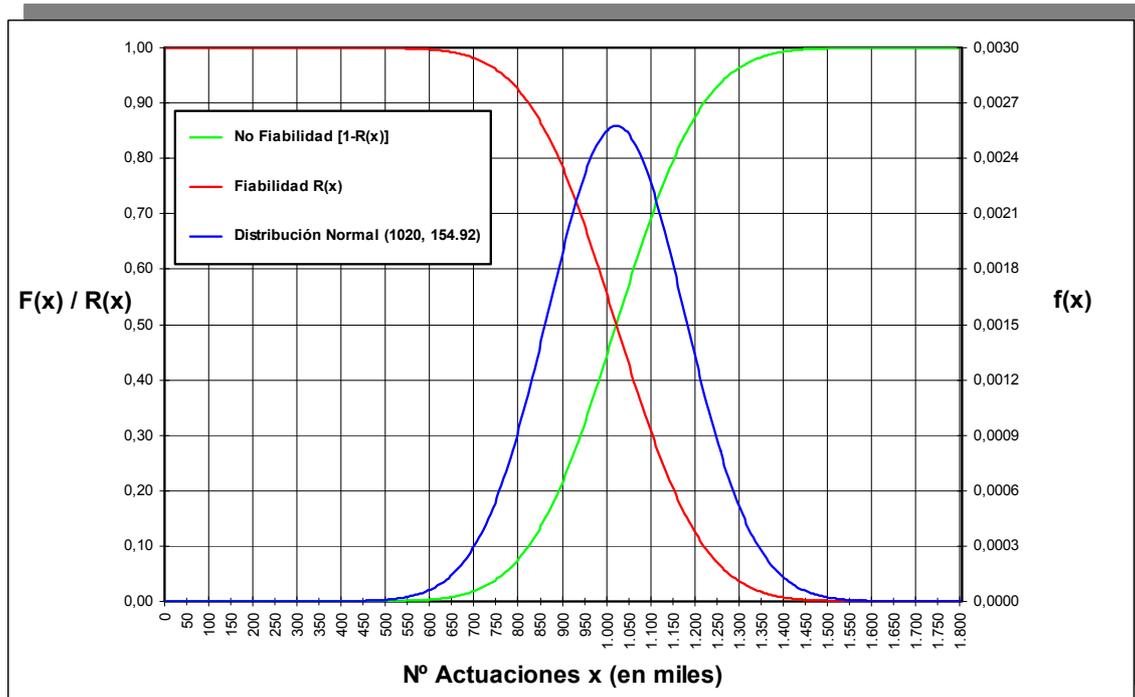


Fig. 9.4. Funciones de fiabilidad y no-fiabilidad (distribución normal)

9.7.6 Operando con el programa SuAP

9.7.6.1 Datos de partida

Ver: Tabla_de_Control/Datos

D.- Datos de Operación (establecidos por el usuario)

Fiabilidad:	desde	$\geq 95,00\%$	hasta	$85,00\%$
Carrera:		$\geq 0,85 \text{ mm}$		$0,70 \text{ mm}$

INTERVALO de FIABILIDAD:

Margen de operación, por debajo del cual, se procederá a la sustitución del elemento (0,95 – 0,85)

- **FM:** *Fiabilidad Máxima Esperada (95%)*
- **Fm:** *Fiabilidad Mínima Teórica (85%)* equivalente a una carrera mínima (0,70 mm) Aunque la especificación del contactor muestra una $RCP_{lim}=0,3 \text{ mm}$,

por motivos de seguridad nuestro valor límite (rebasado éste se sustituirá la unidad) será igual a 0.70 mm.

C.- Datos Estadísticos

Carrera máxima inicial:	1,98 mm
Ajuste Lineal:	Carrera (e mm) = N° Actuaciones (n en miles) · A + B siendo A = -1,55920E-03 y B = 2,038622449
Distribución Normal:	Media = 1.020 Desviación Estándar = 154,91933
Fiabilidad mínima operativa:	26,97% [correspondiente a e = 0,30 mm según el Ajuste Lineal y la Dist Normal indicados]

NOTA: La precisión del cálculo de fiabilidad estadística es de 0,001% equivalente a +/- 1400 actuaciones aproximadamente (valor promedio)

Según esta tabla, a una carrera de 0,3 mm le corresponde una fiabilidad del 26,97%, excesivamente baja para nuestras intenciones.

▪ **UMBRAL de ACEPTACIÓN (MANTENIMIENTO NO NECESARIO):**

Determinada por el operador del sistema, en nuestro caso fijaremos un valor equivalente a la media aritmética de los valores extremos del umbral de fiabilidad:

FU=90%.

E.- Datos de Mantenimiento

Niveles de Mantenimiento:	1 - Alto	Cambio intensivo de repuestos (coste anual = 15% coste adquisición)
Efecto del Mantenimiento (según nivel):		Recuperar el 90% del margen de fiabilidad previa menos el debido a envejecimiento general
Factores de degradación del componente:		90% de elementos principales (móviles y activos) y 10% de secundarios (carcasa, conexiones, etc...)
Degradación de elementos secundarios:		Pérdida de 0,00025% Fiabilidad por cada 1000 actuaciones
Umbral de aceptación (Mantenimiento NO Necesario):		Fiabilidad REAL = Fiabilidad Mínima TEÓRICA + 5,00% = 90,00% Fiabilidad
Primer control de Mantenimiento a efectuar a las:		821.466 +/- 1.400 actuaciones

▲	90,00%	▲
▼	0,76 mm	▼

- **FU:** Fiabilidad, rebasada la cual, se precisará mantenimiento preventivo (85%+5% = 90%) Conocida como fiabilidad requerida, R_r , determina el estimador de condición crítico ($RCP_{cr} = 0,76 \text{ mm}$) y el tiempo hasta la primera inspección (T_1) que, según la tabla, se producirá a las 821.466 operaciones.

- **DG:** Pérdida de fiabilidad debida al desgaste general (efecto secundario producido por el resto de componentes del sistema), estimada en = 0,00025% por cada 1000 actuaciones. Es un factor corrector.

▪ **NIVELES de MANTENIMIENTO:**

Se han definido tres: alto, medio y bajo, en función del nivel de exigencia.

E.- Datos de Mantenimiento

Niveles de Mantenimiento:	1 - Alto	Cambio intensivo de repuestos (coste anual = 15% coste adquisición)
Efecto del Mantenimiento (según nivel):	Recuperar el 90% del margen de fiabilidad previa menos el debido a envejecimiento general	

E.- Datos de Mantenimiento

Niveles de Mantenimiento:	2 - Medio	Reparaciones y nivel de cambios medio (coste anual = 10% coste adquisición)
Efecto del Mantenimiento (según nivel):	Recuperar el 50% del margen de fiabilidad previa menos el debido a envejecimiento general	

E.- Datos de Mantenimiento

Niveles de Mantenimiento:	3 - Bajo	Reparaciones y cambios imprescindibles (coste anual = 5% coste adquisición)
Efecto del Mantenimiento (según nivel):	Recuperar el 10% del margen de fiabilidad previa menos el debido a envejecimiento general	

9.7.6.2 Control del Mantenimiento

Ver: Tabla_de_Control/Controles Mantenimiento

1er. caso: $MRCP \geq RCP_{cr}$; esto es, el valor medido de carrera igual o mayor al correspondiente a la fiabilidad requerida (0,76 mm.) → **No se precisa mantenimiento.**

<input checked="" type="checkbox"/>	Control 1	
Fecha		
Valores Programados		
821.466 act.	90,00% fiab.	
Valores Reales		
Nº Actuaciones	Carrera	
821.466	0,77 mm	
No se precisa mantenimiento		
NIVEL: -		
Fiabilidad tras Mantenimiento		
90,86%		
Próxima revisión		
A las 867.279 actuaciones		

2º caso: $RCP_{cr} > MRCP > RCP_{lim} \rightarrow$ **Reparar la unidad** (se precisa mantenimiento)

0,76mm > carrera medida > 0,70mm

<input checked="" type="checkbox"/> Control 1	
Fecha	
Valores Programados	
821.466 act.	90,00% fiab.
Valores Reales	
Nº Actuaciones	Carrera
821.466	0,73 mm
Reparar unidad	
NIVEL:	2 (Medio)
Fiabilidad tras Mantenimiento	
91,21%	
Próxima revisión	
A las 870.593 actuaciones	

3er. caso: $RCP_{lim} \geq MRCP \rightarrow$ **Sustituir la unidad** (mantenimiento correctivo)

<input checked="" type="checkbox"/> Control 1	
Fecha	
Valores Programados	
821.466 act.	90,00% fiab.
Valores Reales	
Nº Actuaciones	Carrera
821.466	0,68 mm
Sustituir unidad	
NIVEL:	-
Fiabilidad tras Mantenimiento	
-	
Próxima revisión	
-	

9.7.6.3 Proceso de Cálculo

Datos de partida:

- **AR**: Actuaciones en el momento del control (actuaciones reales) Dato a introducir por el usuario. Lo normal es que coincida con el valor programado, esto es, que no se demore la medición.
- **C**: Carrera medida en el momento del control. Dato a introducir por el usuario.

<input checked="" type="checkbox"/> Control 1	
Fecha	
Valores Programados	
821.466 act.	90,00% fiab.
Valores Reales	
● N° Actuaciones	● Carrera ●
821.466	0,71 mm

AR ———
C ———

1- Si la carrera **C** ya es menor que la mínima establecida (0,70 mm, la correspondiente al límite inferior de fiabilidad fijado, 85%) el programa indica “**SUSTITUIR UNIDAD**” y se termina el proceso.

→ Si no es así:

2- El programa calcula las actuaciones equivalentes (**AE**) a la carrera real **C** medida, utilizando para ello la ecuación de regresión lineal obtenida en el apartado 9.7.1.

3- Calcula la fiabilidad real (**FRC**) correspondiente a estas **AE** empleando la función de fiabilidad (curva normal) obtenida en 9.7.5. En síntesis, **FRC** es la fiabilidad correspondiente a la carrera medida **C**.

Si **FRC** > **FU (0,9)**, se indicará: **NO SE PRECISA MANTENIMIENTO** y pasaremos al punto 8.

→ Si no es así ($FRC < FU$):

4- Calcula la fiabilidad (**FRA**) que correspondería a las actuaciones reales (**AR**) a través de la ecuación de fiabilidad.

5- Establece la referencia superior de fiabilidad (**FS**) como la mayor de **FM** y **FRA** (lo normal es que **FM >FRA**)

6- Calcula la fiabilidad que se obtendría **después** de la operación de mantenimiento correspondiente a cada nivel predefinido:

a) Nivel *BAJO*:

$$FN_{bajo} = (FS-FRC)*0,30+FRC-(AR/1000)*DG$$

b) Nivel *MEDIO*:

$$FN_{medio} = (FS-FRC)*0,50+FRC-(AR/1000)*DG$$

c) Nivel *ALTO*:

$$FN_{alto} = (FS-FRC)*0,90+FRC-(AR/1000)*DG$$

Es decir, el porcentaje de fiabilidad que podemos ganar respecto al máximo de referencia (**FS**) según el nivel de mantenimiento (**30%, 50% o 90%**), menos lo que perdemos debido al desgaste en función de las actuaciones reales.

A partir de ahora, la referencia de decisión, a todos los efectos, será la fiabilidad que nos da la carrera real medida (**FRC**), independientemente del número de actuaciones.

7- De las tres FN's obtenidas, el programa elegirá la que, con menor nivel de mantenimiento, cumple que es mayor o igual que **FU**. Con esta información se rellenan las casillas **H, I y J** (ver *apéndice B*)

Valores Reales	
Nº Actuaciones	Carrera
821.466	0,73 mm
Reparar unidad	
NIVEL:	2 (Medio)
Fiabilidad tras Mantenimiento	
91,21%	
Próxima revisión	
A las 870.593 actuaciones	

H points to the 'Nº Actuaciones' input field.
J points to the 'Fiabilidad tras Mantenimiento' row.
I points to the 'Reparar unidad' row.
K points to the 'Próxima revisión' row.

Pasemos a calcular el número de operaciones (actuaciones) correspondiente a la próxima revisión (casilla K):

Para ello:

8- Calcula las actuaciones **teóricas** para las que la fiabilidad es la mínima aceptable (ATM) En nuestro caso el 85% que corresponde a 859.442 actuaciones según la ecuación de fiabilidad.

9- Calcula el nº de actuaciones teóricas para el que la fiabilidad es la obtenida tras el nivel de mantenimiento seleccionado (si ha sido necesario) FN... (ATFN); en todo momento, se cumplirá que:

$$ATM > ATFN$$

10- Por tanto, teóricamente podremos operar un nº de operaciones adicionales:

$$\text{DeltaA} = ATM - ATFN$$

11- De ahí que podamos prever que el próximo control se implementará a las **AR+DeltaA** actuaciones. El resultado se indica en el cajetín **K**.

<input type="checkbox"/> Control 1		<input checked="" type="checkbox"/> Control 2	
Fecha		Fecha	
Valores Programados		Valores Programados	
821.466 act.	90,00% fiab.	862.372 act.	90,00% fiab.
Valores Reales		Valores Reales	
Nº Actuaciones	Carrera	Nº Actuaciones	Carrera
821.466	0,71 mm	862.372	0,70 mm
Reparar unidad		Reparar unidad	
NIVEL: 2 (Medio)		NIVEL: 1 (Alto)	
Fiabilidad tras Mantenimiento		Fiabilidad tras Mantenimiento	
90,33%		93,79%	
Próxima revisión		Próxima revisión	
A las 862.372 actuaciones		A las 940.027 actuaciones	

9.8 RESULTADOS

De acuerdo al apartado 9.4, el número de operaciones por día alcanzaba la cifra de 580. Dado que $T_1 = 821.466$ operaciones⁵⁴, mediante unas sencillas operaciones aritméticas llegamos a la siguiente conclusión: la primera inspección se debería llevar a cabo transcurridos 3 años, 10 meses y 17 días desde el comienzo de la vida operativa. Con una estrategia de mantenimiento distinta a la aquí formulada, los técnicos de mantenimiento efectuaron inspecciones cada 6 semanas⁵⁵ (mantenimiento preventivo)

Por otro lado, los contactores se sustituyeron cada 3 ó 4 inspecciones. Con todos estos datos, estamos en disposición de estimar el ahorro potencial de la estrategia de mantenimiento basado en el examen de la condición.

⁵⁴ Ver párrafo 9.7.6.

⁵⁵ Ver párrafo 9.2

Calculemos primero el número de cambios innecesarios:

$$\frac{3.88 \text{ años} \times \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}}}{\frac{24 \text{ semanas}}{\text{cambio}}} \cong 9 \text{ cambios}$$

Debido a que cada conjunto de contactos cuesta aproximadamente 25 £ y hay 4 en cada vehículo, el ahorro sería sustancial, con la ventaja añadida de mantener un nivel de fiabilidad del 90%:

$$9 \text{ cambios} \times \frac{100 \text{ libras}}{\text{cambio}} = 900 \text{ libras}$$

$$\frac{900 \text{ libras de ahorro}}{\text{coche}} \times 37 \text{ coches} = 33.300 \text{ £}$$

A lo anteriormente expuesto habría que añadir el ahorro en inspecciones de más, ya que en esos años, nos ahorraríamos:

$$\left(\frac{4 \text{ insp. innec.}}{\text{cambio}} \times 9 \text{ cambios} \right) - 1 = 35$$

$$\frac{140 \text{ insp.}}{\text{coche}} \times 37 \text{ coches} = 5180 \text{ insp.}$$

Conocido el coste de la inspección de un juego de contactos (mano de obra más el coste de tener parados los vehículos), 6 £, el ahorro en inspecciones ineficaces sería:

$$5180 \times 6 = 31080 \text{ £}$$

que, sumado al anterior, nos daría un **ahorro total**⁵⁶ de:

$$33.300 + 31.800 = 65.100 \text{ £}$$

una cantidad nada desdeñable. Las ventajas de la técnica expuesta resultan evidentes.

⁵⁶ Unos 97.000 €, de acuerdo al tipo de cambio vigente el 16.09.05

Capítulo X

TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL MANTENIMIENTO

“Todo nuestro conocimiento proviene de las sensaciones”

Leonardo da Vinci

10.1 LA VIGILANCIA DE LA CONDICIÓN

La mayoría de las veces los componentes “avisan” de que van a fallar. La variación de alguna característica asociada a ellos nos alerta de la situación que puede llegar a producirse; es lo que se denomina *fallo potencial* (los realmente producidos se denominan *fallos funcionales*) Ahí es donde surge la posibilidad de realizar el mantenimiento preventivo de manera más racional, actuando sólo cuando el componente así lo requiera.

La monitorización de la condición está orientada a detectar *fallos potenciales*, permitiendo condicionar la ejecución de las tareas al estado real de los elementos a los que se apliquen. Ese estado se convierte en el aspecto determinante de cuándo debe realizarse el mantenimiento preventivo.

Monitorizar el estado de los elementos tiene un coste, que debe ser considerado para determinar si es más rentable hacerlo o desperdiciar la vida residual que puedan tener elementos sustituidos prematuramente. Además, no siempre es fácil identificar el parámetro o parámetros de un elemento que determinen su estado real. **En algunos casos la comprobación del estado podrá hacerse de forma cuantitativa, mientras que en otros deberá ser más cualitativa.** Por ejemplo, el cambio del aceite del motor de un automóvil es una tarea de mantenimiento preventivo que fácilmente puede establecerse de forma predeterminada; por ejemplo, un fabricante puede recomendar que el aceite sea cambiado cada 5.000 kilómetros. Sin embargo, el tipo de conducción puede influir en la rapidez de la pérdida de las propiedades lubricantes del aceite, por lo que es recomendable inspeccionar con cierta frecuencia el nivel y aspecto del aceite (a

los expertos en mecánica les basta echar un vistazo al color del aceite para conocer su estado) para proceder a rellenar hasta nivel o a sustituirlo, según pueda ser necesario. La determinación del estado del aceite se realiza, en general, por su naturaleza, de forma cualitativa. Lo contrario ocurre con la sustitución de las zapatas de freno de las ruedas de un automóvil, que sí puede realizarse mediante la determinación de forma cuantitativa de su estado con un testigo que indique el nivel de desgaste sufrido; una vez el desgaste llega a un cierto nivel predeterminado se procede a sustituir las zapatas, con independencia del número de kilómetros que se lleven recorridos.

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

- La vigilancia de la condición;
- La localización de averías.

10.2 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 depende en gran parte del tipo de sistema y en último término viene determinada por consideraciones económicas y/o de seguridad. Una vez tomada la decisión sobre las técnicas a emplear, habrá que definir el sistema que se necesitará para llevar a cabo la vigilancia de la condición.

Debido al interés creciente en esta técnica durante los últimos años, se han desarrollado muchos dispositivos relacionados con ella. Los sensores, instrumentos y dispositivos de

grabación y 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 disponer de métodos fiables de interpretación de los mismos, para detectar en qué momento ocurren los fallos. Una tarea de mantenimiento condicional 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 nivel de utilización de los dispositivos⁵⁷ será el máximo posible; por el contrario, la tecnología a emplear en el sistema de vigilancia es costosa. Como consecuencia de ambos factores, **el empleo de esta estrategia de mantenimiento sólo será rentable en ítems complejos y muy costosos de mantener, por ejemplo, en los modernos aviones de transporte civil**, tanto por sus exigencias de disponibilidad como por el elevado precio de sus componentes. El valor del coeficiente de utilización estará muy próximo a uno.

Durante más de una década ha estado presente la idea de emplear la tecnología de los sistemas expertos (como, por ejemplo, MATLAB de *Mathworks*) en el diseño de software para el mantenimiento. Estos sistemas extienden la potencia del ordenador más allá de las funciones matemáticas y estadísticas habituales, utilizando el diálogo y la lógica para determinar diversas acciones posibles o consecuencias.

Actualmente hay una gran variedad de técnicas de vigilancia bien desarrolladas que se utilizan ampliamente para apoyar y mejorar las tareas de mantenimiento condicional. A continuación se analizan brevemente algunas de las técnicas empleadas con más frecuencia.

10.2.1 Vigilancia de las Vibraciones

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

⁵⁷ la vida operativa media, $\theta = \text{MTTF}$.

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 utilizar como un indicador para detectar fallos incipientes y, a veces, para definir las posibles causas de un mal funcionamiento.

Por consiguiente, la medida y el análisis del nivel de vibración pueden dar una buena indicación de la condición del ítem y emplearse fiablemente en programas de mantenimiento basados en la condición, tanto como parámetro de vigilancia continua como en un programa periódico.

10.2.2 Vigilancia de la Tribología

Normalmente, las muestras de aceite se analizan en laboratorio mediante el empleo de diferentes métodos. La información del análisis es útil para determinar si un motor, por ejemplo, está sufriendo un desgaste anormal o si el lubricante está degradado.

La vigilancia de la tribología hace uso de varias técnicas que pueden emplearse en la ejecución de mantenimiento condicional.

Análisis del Aceite Lubricante

Se estudian muestras para determinar si cumplen todavía los requisitos de lubricación. Los resultados pueden utilizarse para determinar la vida del lubricante y, por lo tanto, cuándo se debe cambiar o renovar para que siga cumpliendo los requisitos especificados. En cambio, no se puede utilizar este análisis como una herramienta para determinar la condición operativa del sistema, pero sí como una *ayuda* importante para un mantenimiento basado en la condición.

Análisis de Partículas

Las técnicas de vigilancia de los productos de desgaste se consideran métodos muy fiables 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 del ítem, facilitando la determinación de la causa del fallo. Esta información puede deducirse de la forma, distribución de tamaños y composición de las partículas.

10.2.3 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: temperatura, presión, caudal, velocidad, etc.

Los valores de estos parámetros se recogen 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 rebasan ciertos valores límite. **En aviones de última generación es muy común que la mayoría de sistemas (combustible, hidráulico, eléctrico, generación de O₂, propulsión,..) tengan instalada la instrumentación necesaria para medir los parámetros que indican la condición operativa real del sistema.** La cantidad ingente de información que producen se recoge en 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 estos sistemas de vigilancia 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 la condición al personal de mantenimiento. Además, son adecuados para dar sentido a un conjunto complejo de datos en situaciones en que debe tomarse un gran número de decisiones interrelacionadas.

10.2.4 Inspección Visual

A pesar de lo expuesto, 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. Es una forma simple, rápida y relativamente barata de vigilar la condición y a veces juega un papel importante. No obstante, en palabras de *John Hessburg*⁵⁸:

“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 de 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 los ceros del extremo de una patilla de conexión”.

⁵⁸ Mecánico Jefe de Boeing (revista *Airliner* /enero-marzo 1.995)

10.2.5 Técnicas de Ensayo No Destructivo

Son técnicas que miden directamente la condición de un elemento o sistema. Se pueden emplear algunas 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 es tan amplia que sólo descubriremos algunas de ellas.

Inspección con Partículas Magnéticas

Su finalidad es 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 álabes de las turbinas, estructura del fuselaje, etc., mediante la inspección de partículas magnéticas. Este tipo de técnica no es un análisis cuantitativo, pero con ella un usuario cualificado puede ser capaz de proporcionar una situación razonable de la profundidad de una grieta.

Examen por Corrientes Inducidas

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 utilizar la técnica de las corrientes inducidas para detectar defectos superficiales en un elemento.

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.

Esta técnica es capaz de detectar la localización de la transformación interna del material pero, en cambio, no es capaz de identificar la magnitud de la grieta o de cualquier otra transformación, por lo que precisa complementarse con otras técnicas, como por ejemplo, la de ultrasonidos.

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.

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 algunos de los sistemas en operación desprende calor.

La termografía emplea 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. Esta técnica se utiliza en la vigilancia de la condición para distintas aplicaciones; quizá la principal aplicación es la detección de conexiones eléctricas defectuosas en transformadores e interruptores eléctricos.

Radiografías

Se pueden fotografiar las discontinuidades superficiales o sub-superficiales causadas por fatiga, corrosión por tensión, etc., mediante el empleo de una radiación electromagnética de onda muy corta, principalmente rayos-x ó rayos gamma. Esta técnica es una manera eficaz de detectar grietas internas, imperfecciones, falta de homogeneidad, etc., pero la determinación del tamaño y posición de cualquier discontinuidad exige un personal muy especializado. Se ha desarrollado más a fondo y, en la práctica, se han aplicado métodos como la radiografía de neutrones, la estéreo-radiografía y la micro-radiografía.

Los inconvenientes de esta técnica son que precisa el acceso a dos lados opuestos de un objeto y que es muy cara, comparada con otros métodos no destructivos.

Inspección por Ultrasonidos

Es uno de los métodos más utilizados. Es apropiado para la detección, identificación y evaluación del tamaño de una amplia variedad de defectos superficiales y sub-superficiales en los materiales, siempre que haya acceso a la superficie.

En aviación se emplea en la inspección rutinaria de aviones para la búsqueda de grietas de fatiga incipientes; puede emplearse también para medidas precisas de espesores, valiéndonos de 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. La técnica parece muy apropiada para vigilar directamente el parámetro de condición. No obstante, es difícil de poner en práctica cuando las superficies inspeccionadas son rugosas, irregulares en su forma o no homogéneas.

Líquidos Penetrantes

Se utilizan principalmente para detectar discontinuidades abiertas superficiales, tales como: grietas, porosidades, despegaduras y exfoliaciones.

10.3 LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS: SISTEMAS DIGITALES DE DIAGNÓSTICO

En las aeronaves modernas, la tecnología de vanguardia al servicio de la detección de fallos es la conocida como “comprobación integrada”, cuyo acrónimo inglés es BIT (*Built in Test*) Su objetivo principal es proteger al usuario y al sistema contra presentaciones u órdenes erróneas. **Esta función de detección de fallos es, por tanto, parte de la función operativa básica de cada uno de los sistemas de avión.** Distinguiremos tres niveles, en función del momento en el que se lleve a cabo la monitorización del sistema:

P-Bit (*Power-up Bit*): Diagnóstico efectuado en el momento de poner en funcionamiento el sistema (también conocido por Initial Bit);

C-Bit (*Continuous Bit*): Monitorización continua, esto es, durante la operación del sistema;

I-Bit (*Interruptive Bit*): Test específico del sistema que supone la interrupción de su normal funcionamiento. Se produce cuando existe incertidumbre sobre su correcto desempeño.

Las funciones del BIT son:

- ☞ Chequeos funcionales de los sistemas;
- ☞ Grabación de los fallos para su posterior análisis.

y sus objetivos:

- ☞ Maximizar la disponibilidad operativa;
- ☞ Minimizar los costes de mantenimiento;
- ☞ Proporcionar datos en la investigación de accidentes / incidentes.

Los sistemas digitales han demostrado ser fiables por su capacidad de autocomprobación (*self-test*) Sin embargo, también pueden 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 adjunta se muestran los resultados de un estudio realizado por el fabricante Boeing sobre los fallos⁵⁹ detectados por el sistema embarcado de monitorización y grabación integrado, conocido por su acrónimo inglés IMRS (*Integrated Monitoring & Recording System*), en el modelo B737-300.

⁵⁹ Recordemos que la fiabilidad se mide por el MTBF.

CATEGORÍA	NÚMERO	%
Fallo detectado por BIT, confirmado por prueba en taller	177	46
Fallo detectado por el BITE ⁶⁰	123	32
Problema de diseño de software	35	9
Datos insuficientes	26	7
Rechazo erróneo de LRU⁶¹	23	6
TOTAL (para un nº horas de vuelo = 914.000)	384	100

Tabla 10.1. Análisis de fallos detectados mediante un sistema digital de diagnóstico

Los fabricantes cuentan como fallos los que se confirman en la comprobación en taller (hangar) Observando la tabla adjunta vemos que el **22%** de los fallos detectados en vuelo no son confirmados en tierra, fuente de la polémica entre operadores y fabricantes, siendo acusados los primeros de incurrir en errores de mantenimiento.

La solución pasa por establecer sistema de recogida de datos sobre fallos que incluya la confirmación por BITE y reconozca los errores de diseño (origen de una parte de ese 22%); de esta forma se forzaría a los diseñadores a confiar en la integridad de la función BIT. Se deben corregir los fallos confirmados por BITE y si no se confirman, mejorar la precisión de la función BIT.

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. Para terminar, 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

⁶⁰ Instrumento de prueba utilizado en laboratorio (“ on ground ”)

⁶¹ Denominación genérica de cualquier equipo embarcado (“ on aircraft ”)

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 de la siguiente manera: primero se sustituye el transductor, después el amplificador o procesador y, si no desaparece el problema, el indicador y así sucesivamente hasta que desaparezca el fallo.

10.4 IMPLICACIONES DEL FMEA

El FMEA puede ser utilizado también para identificar potenciales falsas alarmas, definidas como aquéllas que a menudo ocurren cuando la función BIT de un sistema cualquiera detecta y anuncia un fallo durante la operación que no puede ser repetido más tarde durante la tarea de mantenimiento.

Un claro ejemplo es una “condición de fuera de tolerancia”, esto es, la que excede los límites considerados como buena operación del sistema por parte del BIT. El FMEA⁶² ha de servir para diseñar la función BIT de tal forma que reconozca lo que es un fallo persistente de lo que es simplemente una operación temporalmente fuera de límites; también ha de saber ignorar esta condición (*out-of-tolerance*) cuando no tenga ningún efecto sobre la operación del sistema.

Para finalizar, el FMEA puede emplearse para identificar fallos que son indetectables pero no tienen efecto en la misión (vuelo) En tales casos, las consecuencias de un segundo fallo pueden analizarse; si la misión pudiera ser puesta en peligro por un segundo fallo, el FMEA determinaría si la indicación de fallo debería ser puesta en evidencia al operador, personal de mantenimiento ó BIT.

⁶² MIL-HDBK-470A DoD EE.UU- 4.agosto.97; Designing and Developing Maintainable Products and Systems. Volume I.

10.5 EQUIPO INTEGRADO DE COMPROBACIÓN (BITE)

BITE es un término común en la industria aeronáutica, utilizado 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 HW y mucho SW.

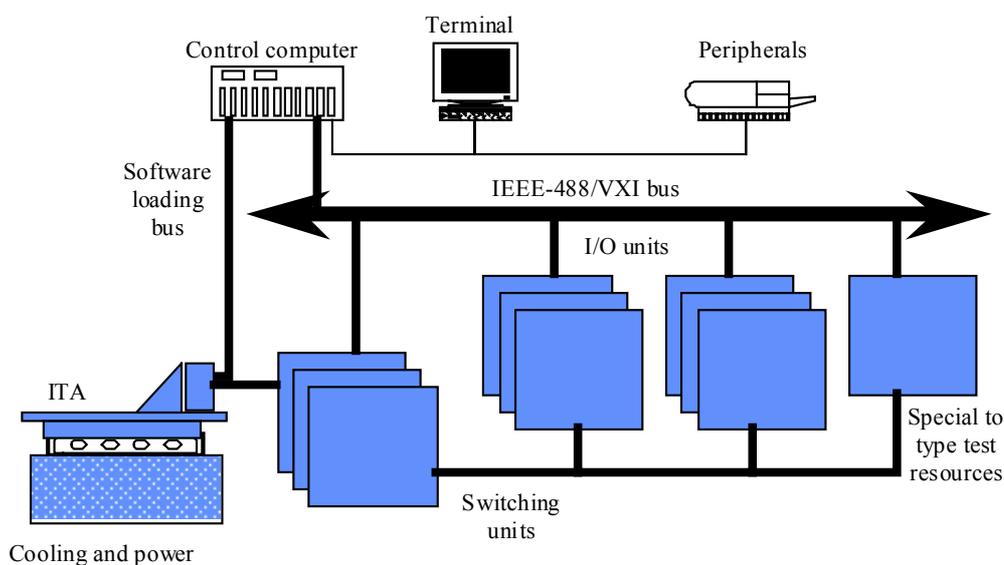


Fig.10.1. Arquitectura funcional de una prueba en laboratorio

Como hemos expuesto en anteriores apartados, cada equipo miembro de un sistema de avión dispone de una función BIT que monitorizará las operaciones del mismo durante el vuelo. En caso de producirse un error, los datos asociados serán almacenados en un módulo de memoria no volátil para una posterior investigación; al menos, se identificará el tipo de fallo, instante en que se produjo, modo BIT en que fue detectado y módulo del equipo en el que se detectó.

La función de mantenimiento ó BITE se clasifica como no esencial para la seguridad. En cambio, la función de detección de fallos ó BIT se considera una parte básica del sistema, clasificada como esencial o crítica y que debe certificarse al mismo nivel que el sistema.

El sistema a comprobar se conecta al BITE (también conocido como ATE o sistema automático de pruebas) mediante una unidad de interconexión, de forma que los dispositivos de estímulo y medida puedan conectarse al sistema que se comprueba. El

operario controla y vigila la secuencia de prueba a través del panel de control y presentación. La pantalla informa al usuario del resultado de la prueba y, si se requiere, de la acción correctiva más probable.

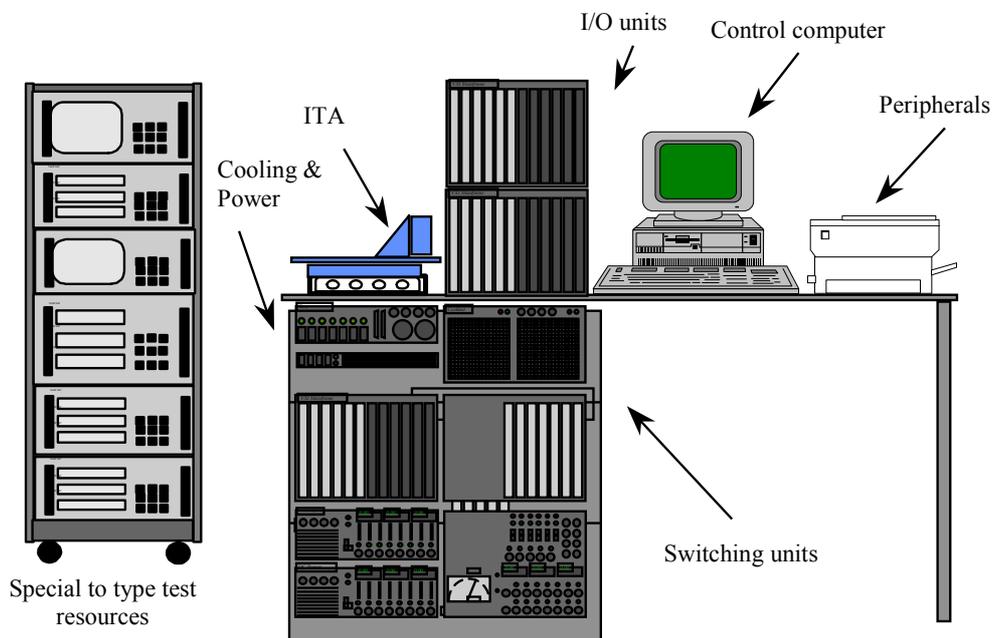


Fig. 10.2. Arquitectura de un equipo automático de prueba

Se puede activar periódicamente la capacidad de autocomprobación del sistema BITE para asegurar que funciona correctamente, antes de examinar un sistema sospechoso. El sistema a probar se conecta al BITE, identificando las conexiones por sus códigos (en binario) La inserción del conector del equipo de prueba 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 comienza la secuencia de pruebas. 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 presenta al operario de mantenimiento el diagnóstico (“pasa” o “falla”)

Frecuentemente, el fallo de una LRU registrado en BITE es el único dato útil que ayuda en la investigación del fallo. Por ello, es importante que el personal de mantenimiento

examine y rastree los registros del BIT de todos los LRUs⁶³ recibidos para operación. Como ya dijimos, los datos del BIT deben ser fiables para que el trabajo de mantenimiento pueda basarse en ellos.

10.6 EL CONCEPTO DE BUS DE DATOS

El bus de datos se presenta cada vez más en el diseño de aeronaves. Antes de la introducción del bus de datos, todas las conexiones eléctricas se realizaban punto a punto. Si se necesitaba una señal determinada del avión (por ejemplo, la señal de control aerodinámico) como entrada para una función (tal como la navegación), era necesario disponer de 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 peso y mejorar la fiabilidad, se comenzó a idear formas para juntar más de una señal en el mismo cable.

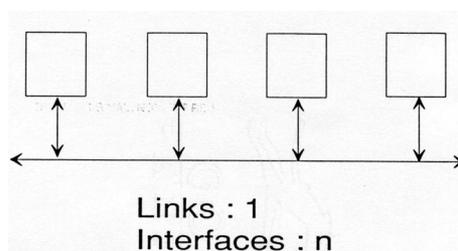


Fig. 10.3. Esquema funcional de un bus de datos

Tan pronto como esté presente más de una señal en un determinado medio (a este proceso se le denomina multiplexación), deben establecerse medios para identificar y separar las señales en el extremo receptor (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

⁶³ LRU: *Line Replaceable Unit*. Equipo reemplazable en línea (primer escalón de mantenimiento)

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 son correctos. Estos parámetros de prioridad, ritmo de renovación e integridad se usan para establecer las distintas clases de buses de datos.

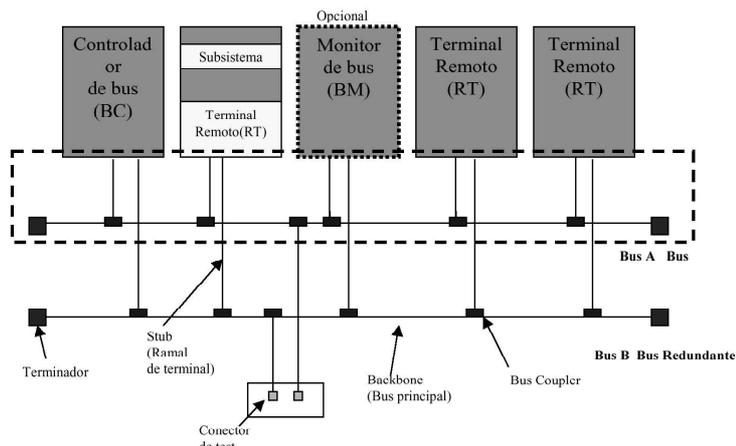


Fig. 10.4. Estructura y componentes de un bus de baja velocidad

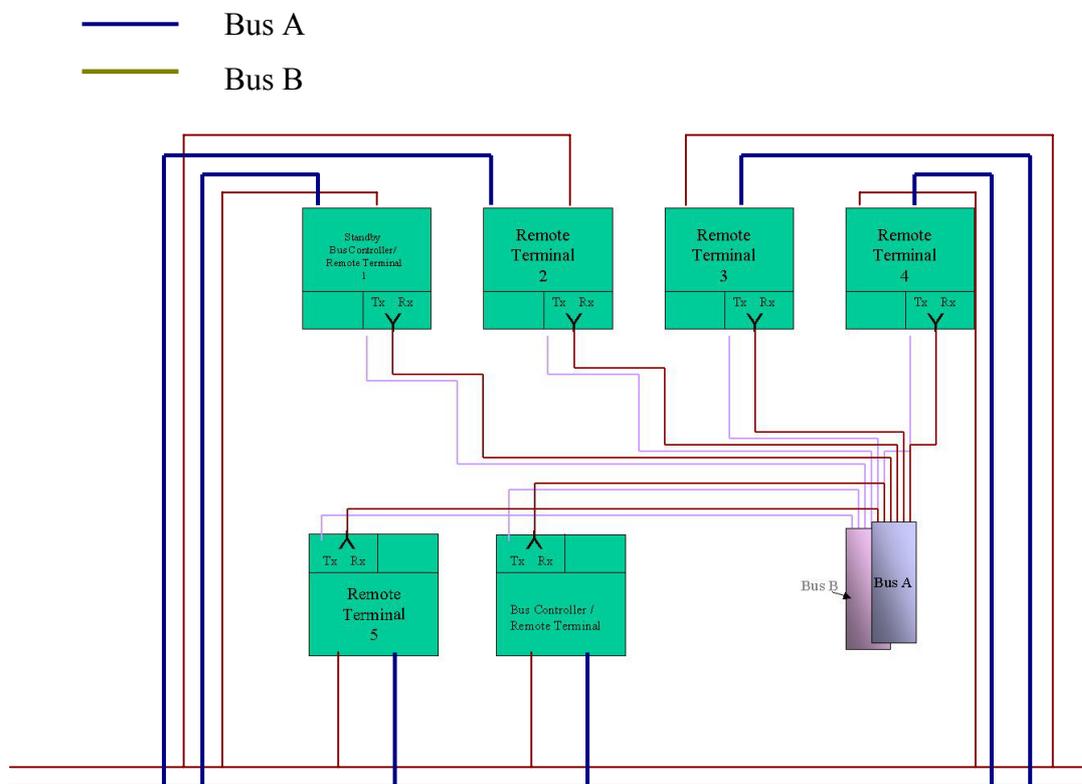


Fig. 10.5. Estructura y componentes de un bus de alta velocidad

10.7 APLICACIÓN DEL BUS DE DATOS AL MANTENIMIENTO

Una de las ventajas de un bus de datos es que puede actuar como un conducto que reúne los datos de mantenimiento del avión en una instalación de mantenimiento centralizada. El encargado del mantenimiento se beneficia de tener un solo puerto de acceso a estos datos: el MDP, que es un ordenador que recoge, durante las operaciones en tierra y en vuelo, todos los fallos detectados.

A su vez, un equipo puede informar de fallos de otro; la consecuencia de esta capacidad es que la computadora (el equipo) que informa del fallo puede estar, a su vez, en situación de fallo. Los encargados de mantenimiento necesitarán asegurarse de que no condenan como averiada a una LRU que está detectando correctamente los fallos de otras. Contra esta ventaja 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 los fallos con “una lente y un calibre” han pasado a la historia para muchos sistemas modernos. Sin embargo, la adopción creciente de buses de datos obliga a los encargados de mantenimiento a disponer de equipos de examen adecuados a precios razonables.

Enumeraremos a continuación las razones del empleo de un bus de datos, ventajas y limitaciones de esta tecnología.

ORIGEN:

- ▶ Los sistemas embarcados son cada vez más complejos.
- ▶ Se requiere, cada vez más, un mayor grado de integración entre los sistemas.
- ▶ Elevado número de cables, con el consiguiente aumento de peso y dificultad a la hora de reparación de averías / modernización de sistemas.
- ▶ A mayor longitud de cable, mayor probabilidad de errores debidos a su alta impedancia, efectos electromagnéticos, interferencias de radiofrecuencias, etc.

VENTAJAS:

- ▶ Menos cables y conexiones, lo que implica una MAYOR FIABILIDAD.

- ▶ Menos peso.
- ▶ Arquitectura flexible (fácil reconfiguración)
- ▶ Manejo flexible de la información (procesamiento de datos descentralizado)
- ▶ Esquema de pruebas funcionales más flexible; por ejemplo, test de transmisión total de datos realizado de una sola vez.
- ▶ Permite la introducción de mejoras funcionales en los sistemas sin necesidad de cambio de hardware.

LIMITACIONES:

- ▶ Velocidad efectiva de la transmisión.
- ▶ Velocidad del bus.
- ▶ Capacidad (número de terminales)
- ▶ Longitud del bus.
- ▶ Coste de esta tecnología (HW, SW, apoyo “en tierra”)
- ▶ Nivel de preparación requerido exigente (ingenieros y técnicos de mantenimiento)

Capítulo XI

CONCLUSIONES

“La investigación es la tabla de salvación de nuestras empresas”

Philippe Camus⁶⁴

11.1 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Durante la exposición de mi memoria de suficiencia investigadora (*Madrid, 26.11.2003*) subrayé que una de las líneas de actuación para mejorar la fiabilidad de un sistema es la del mantenimiento, definido como: *el conjunto de actividades cuya finalidad es la conservación de un equipo o sistema en condiciones de eficiencia funcional, que permitan alcanzar el más alto grado de fiabilidad.* Pues bien, el presente trabajo ha desarrollado aquella línea de investigación abierta, planteándose como objetivo **mejorar las técnicas empleadas en el mantenimiento de un elemento de transporte fundamental por su rapidez, seguridad, coste y tecnología que emplea: el avión.**

Vemos que en la definición expuesta en el párrafo anterior está involucrada la fiabilidad; además, ésta es un factor esencial en la seguridad de un producto. De ahí que uno de los objetivos del proceso de mantenimiento sea garantizar la fiabilidad y seguridad exigidas. Pero la realización de cualquier tarea de mantenimiento acarrea costes, tanto en términos de recursos empleados como de las consecuencias de no tener el avión disponible para el servicio. Por lo tanto, los departamentos de mantenimiento son uno de los mayores centros de coste; tanto es así, que la mayoría de las aerolíneas se preocupan por **la ventaja competitiva que el proceso de mantenimiento les puede proporcionar.**

La manera más eficaz de reducir los costes de mantenimiento es mejorar la precisión en la predicción de la fiabilidad y monitorizar la tasa de cambio de condición del sistema, lo que conduce al alargamiento de la vida operativa del sistema. Esta ha sido la hipótesis avalada por esta investigación.

⁶⁴ CEO de EADS (2.005)

La precisión en la predicción de la fiabilidad es crucial desde el punto de vista económico; ésta determina la productividad operativa del equipo o sistema, así como los gastos de reparación y mantenimiento. Asimismo, puede determinar el intervalo en que se distribuyen los costes operativos y en el que se obtienen ingresos o servicios. Por consiguiente, la fiabilidad es un factor central para determinar el coste del ciclo de vida de un producto.

En el proceso de selección de componentes para un diseño dado y la predicción de la fiabilidad de éste, es necesario conocer determinados datos de fiabilidad de los componentes. Estos datos se obtienen de las observaciones registradas en ensayos y en la utilización operativa de los componentes, mediante una explotación de los registros con ayuda de técnicas estadísticas. Idealmente, los datos de fiabilidad de un componente deben darnos la distribución de fallos para una o más combinaciones de esfuerzos y ambiente.

El problema de disponer de datos es continuo. Por una parte, los datos disponibles no cubren todas las necesidades, ni mucho menos; por otro lado, los componentes para los que se dispone de datos quedan anticuados tarde o temprano y los que les sustituyen necesitan muchas horas de ensayo y utilización para que su fiabilidad sea conocida.

La mayor parte de los datos de fiabilidad disponibles son tasas de fallo constantes para componentes electrónicos (hipótesis exponencial) Es natural que su representatividad sea relativa y, en algunos casos, más que dudosa. Una fuente de imprecisión proviene de la variedad de condiciones de esfuerzo y ambientales en que tales datos se han obtenido; unos datos proceden de ensayos en laboratorio, otros de uso operativo con el componente montado en equipos a veces muy diferentes y que operan en condiciones difícilmente comparables.

Los datos de componentes mecánicos son mucho más escasos. La razón fundamental es que los componentes electrónicos están todos contenidos en un número mucho más limitado de grupos (resistencias, condensadores, semiconductores, etc.) y dentro de ellos en un número tampoco excesivo de clases (resistencias de película, devanadas, etc.) Una fuente de datos genéricos es el manual FARADA, que se pone al día

trimestralmente. No obstante, para datos de componentes mecánicos hay que recurrir, en general, a los fabricantes o proceder a costosos ensayos.

La duración de un dispositivo viene determinada por su fiabilidad. Ésta es un parámetro de diseño cuya precisión en su evaluación viene determinada por el conocimiento relativo al proceso de fallos del producto. A su vez, el mantenimiento ha de garantizar la fiabilidad y seguridad al menor coste posible.

El mantenimiento centrado en la fiabilidad tiene en cuenta estas interrelaciones y constituye la estrategia de mantenimiento más eficiente para determinar las políticas de mantenimiento programado de las aeronaves. ¿En qué nos basamos para asegurar que es el mejor método posible? Fundamentalmente, las razones son las siguientes:

- Identifica los fallos potenciales de los equipos y facilita sus tasas de fallos mediante el análisis FMEA durante la fase de diseño;
- Reconoce que las consecuencias de los fallos son bastante más importantes que sus características técnicas; dirige su atención a los fallos que más afectan a la seguridad y prestaciones del ítem (FMECA);
- Determina las acciones y tecnología que deberían utilizarse en la prevención de tales fallos y en la reducción de los riesgos asociados (FRACAS);
- Selecciona las tareas de mantenimiento preventivo más adecuadas, sobre la base del principio de que no se realizará ninguna tarea de mantenimiento preventivo hasta que se pueda justificar. El método también reconoce que todas las formas de mantenimiento tienen algún valor y suministra criterios para decidir cuál es más apropiado en cada situación.

Los resultados esperados al aplicar esta metodología son: instalaciones seguras y de calidad, un menor número de fallos prematuros y costes de ciclo de vida reducidos.

En cuanto al mantenimiento preventivo, su objetivo principal es impedir la aparición de fallos o mal funcionamiento mediante métodos de prevención entre los que destaca el cambio de ítems antes de entrar en la zona de desgaste o envejecimiento.

En este sentido, el mantenimiento programado de una línea aérea puede apoyarse, en principio, en dos criterios:

- Que cada elemento tiene “una edad adecuada” a la que ha de ser reemplazado para garantizar la seguridad y fiabilidad operativa (conocido como “mantenimiento por potenciales”);
- Que hay elementos que precisan de seguimiento de su condición para valorar si pueden continuar en vuelo o requieren sustitución.

Por lo que se refiere al primero de ellos, hemos demostrado que su aplicación indiscriminada es un despilfarro cuando la tasa de fallo es constante (distribución exponencial) y reemplazamos el equipo. Esto implica una vida operativa menor que la posible y, por ende, un mayor coste (¿por qué reemplazar los equipos antes de tiempo?)

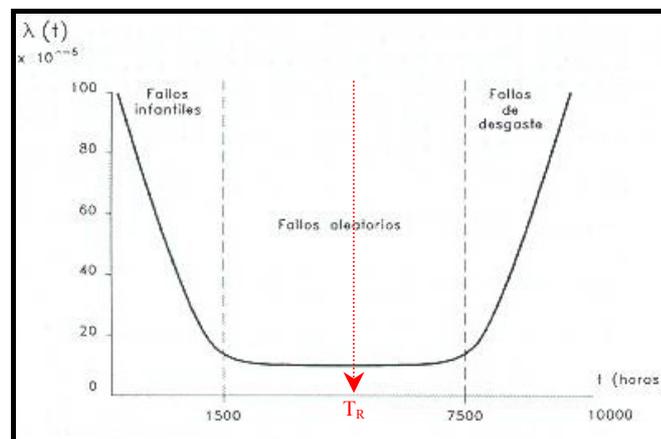


Fig. 11.1 TBO en caso de tasa de fallo constante

La mayoría de los elementos se sustituyen prematuramente y, al mismo tiempo, esta práctica implica una reducción de la disponibilidad operativa del mismo.

Por el contrario, el método que parece más atractivo para minimizar las limitaciones anteriores es la estrategia de mantenimiento basada en la condición.

Este procedimiento admite que la razón principal para realizar el mantenimiento es el cambio en la condición y/o 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 es posible identificar el momento más conveniente en el que se deben realizar las tareas de mantenimiento preventivo.

Los beneficios de la vigilancia de la condición pueden resumirse así:

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

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 subsanarse sustituyendo los ítems a medida que se vuelven inservibles. En cambio, para algunos elementos la probabilidad de fallo aumenta significativamente con el tiempo o uso.

En los sistemas aeronáuticos, los componentes se clasifican como funcionalmente significativos o no significativos (análisis FMEA) Si las consecuencias de su fallo afectarían a la seguridad del avión, a su capacidad operativa (por consiguiente, a la economía de éste), el elemento se consideraría dentro de la categoría de los primeros. La consecuencia es que tal componente puede exigir su sustitución o el desmontaje para su

mantenimiento según pautas predeterminadas. Esto conduce a la adopción de una política de mantenimiento preventivo basada en la vida (determinando “un potencial”) cuando las consideraciones de seguridad son primordiales.

El segundo motivo por el que la autoridad responsable del mantenimiento se decantara por este método se basaría en el hecho de que el mantenimiento por potenciales se realiza en un instante de tiempo predeterminado (programado) con lo que pueden suministrarse por anticipado todos los recursos de apoyo, evitando posibles interrupciones costosas (la parada del avión estaba prevista)

Lo ideal sería no sustituir el ítem hasta momentos antes de que fuera a fallar y hacer esto con absoluta seguridad. Para determinar la condición de diversos tipos de sistemas del avión se han ideado técnicas de “auscultación” que den la señal de alarma ante el desgaste o fallo incipiente. En esta investigación hemos tenido ocasión de exponer la utilidad de la función BIT.

Uno de los requerimientos fundamentales de cualquier línea aérea es conseguir de sus aviones la mayor cantidad de horas de operación por cada hora de mantenimiento, al menor coste posible. Recientemente, hemos podido leer en la prensa que el Ministerio de Fomento, a través de la Dirección General de Aviación Civil, ha puesto en marcha un plan para intensificar las labores de inspección de las compañías aéreas que operan en España. La justificación de esta medida se basa en que, a pesar de los elevados niveles de seguridad, en el sector de transporte aéreo *“la fuerte competencia que se está produciendo entre aerolíneas, con la consiguiente reducción de precios y costes, aconsejan adoptar medidas para garantizar el mantenimiento de los niveles de seguridad con que deben operar las compañías”*.

El presidente del SEPLA (Sindicato Español de Líneas Aéreas) aseguró que, en algunos casos, la guerra de tarifas en el sector supone la reducción del mantenimiento de los aviones.

Otro artículo, publicado tras el desastre del transbordador espacial Columbia, que se desintegró al entrar en la atmósfera con siete tripulantes a bordo, puso de manifiesto la

sospecha de que los ajustes presupuestarios a la NASA (la agencia espacial norteamericana) mermaron la seguridad de sus programas espaciales.

Dado que los resultados esperados al aplicar la técnica de monitorización de la condición son sistemas seguros y costes de ciclo de vida reducidos, se hace imprescindible seguir perfeccionando el método para que el coste del mantenimiento, en un mercado tan competitivo como el actual, no merme la seguridad de los viajeros. Conocer cómo se produce el desgaste se hace imprescindible.

11.2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS

Monitorización (*Health Monitoring*)

Hemos presentado una aplicación de las técnicas de inferencia estadística a la inspección de la condición de un elemento/sistema y, por ende, a su estrategia de mantenimiento. No obstante, aunque con ello conseguimos prolongar la vida útil del dispositivo, la medición del valor del estimador de condición en momentos calculados (programados) nos obligó a interrumpir el funcionamiento de aquél, lo que se tradujo en el correspondiente coste.

La tecnología actual (microprocesadores, sensores, buses de datos....) nos puede facilitar sobremanera la monitorización del estado de un dispositivo; desarrollar una arquitectura hardware/software tanto embarcada como de soporte en tierra que integre todos estos componentes, tendría efectos inmediatos en la duración, seguridad y coste de los equipos (mantenimiento, amortizaciones,....) La obtención de datos en tiempo real de una población numerosa de variables permitiría, tras su procesamiento, analizar la evolución del sistema y determinar su desviación respecto a los resultados previstos. Los responsables del diseño y mantenimiento podrían, con esta herramienta eficaz, tomar decisiones encaminadas a la mejora de las actuaciones. Los algoritmos basados en técnicas de simulación tendrían un campo abonado para ser contrastados y perfeccionados, dado que para ello se dispondría de un sistema bajo condiciones de ensayo durante toda su vida operativa.

Control de procesos

El uso de ordenadores y su software asociado ha alcanzado una relevancia notable en nuestra sociedad. Un área en clara expansión es la del control de sistemas críticos de protección y seguridad. Estos usos incluyen desde aeronaves hasta sistemas empleados en medicina y en el control de plantas químicas y nucleares. En muchos de estos sistemas, los dispositivos electromecánicos de protección están siendo reemplazados por ordenadores y *software* especializado, debido a sus múltiples ventajas: menos peso, coste y consumo de energía, entre otros. Sin embargo, a pesar de este cambio tecnológico, se siguen produciendo fallos en los sistemas de protección que conducen a sucesos altamente perjudiciales para los seres humanos, como es el caso de los vertidos de productos químicos, accidentes de aviación, etc. Las causas de los fallos de los modernos sistemas de protección se encuentran en el hardware, software o en la interacción de ambos, por lo que en los últimos años se están dedicando recursos a la tarea de incrementar su fiabilidad y seguridad.

Existen desde hace años métodos de diseño de *hardware* cuyos fundamentos matemáticos y herramientas de análisis están altamente desarrollados, lo que permite obtener altas cotas de fiabilidad del mismo. Sin embargo, el diseño y desarrollo de software de control requiere aún un considerable esfuerzo investigador para poder alcanzar cotas de fiabilidad del mismo nivel que aquél. Además de lo expuesto, es necesario avanzar en la normativa de control de calidad de software, así como en los procedimientos de implementación.

BIBLIOGRAFÍA

Alkalai, L., Chau, S., Tai, A., (1.997): On-Board Preventive Maintenance: “Analysis of effectiveness and Optimal Duty Period”, in Proceeding of the 3rd International Workshop on Object-Oriented Real-Time Dependable Systems, 40-47.

Al-Najjar, B. (1.991): “On the Selection of Condition Based Maintenance for Mechanical System”. K. Holmberg & A. Folkesson (edit.), Operational Reliability and Systematic Maintenance, Elsevier Science Publisher, Ltd (England)

Ansell, J. I., Phillips, M. J. (1.994): “Practical Methods for Reliability Data Analysis”. Oxford University Press Inc.

ARINC Research Corporation (1.964): “Reliability Engineering”. W. H. Von Alven, ed., Prentice-Hall, Inc.

Barlow, R. (2002): “Mathematical Reliability Theory: From the Beginning to the Present Time”. <http://www.math.ntnu.no/mmr2002/papers/invited/Barlow.paper.pdf>

Barlow, R.; Proschun, F. (1996): “Mathematical Theory of Reliability”. Society for Industrial & Applied Mathematics (reedición de la versión publicada en 1965)

Barringer, P. (1998): “How To Use Reliability Engineering Principles for Business Issues”. Reliability Symposium, La Plata (Argentina)

Birolini, A. (1999): “Reliability Engineering. Theory and Practice”. Springer-Verlag.

Boeing Airplane Company (1989): “Transport Division Reliability Manual”. Reliability Staff of Engineering Department.

C. Chapra, Steven & P. Canale, Raymond (1.999): “Métodos Numéricos para Ingenieros”. Mc Graw-Hill.

DeGroot, M. (1988): “Probabilidad y Estadística”. Addison-Wesley.

Dekker, P. (1996): “Applications of Maintenance Optimisation Models: A Review and Analysis”. Report 9228/A, Econometrics Institute, Erasmus University. Rotterdam, The Netherlands.

Dhillon, B. (1999): “Design Reliability: fundamentals and applications”. CRC Press.

DOD (Department of Defense) USA Handbook (1997): “Designing and Developing Maintainable Products and Systems”.

DOD TR-4 USA (1964): “Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing Based on the Weibull Distribution (Hazard Rate Criterion)”.

El-Haram & Knezevic J. (1994): “The New Developments in Condition Based Approach to Reliability”. Proc. 10th International Logistics Congress, Exeter (England), 163-169.

FARADA SP-63-470 (1.962, numerosas revisiones y ediciones posteriores): “Part Component Failure Rate Data Handbook”. FARADA Information Center, U. S. Navy Fleet Missile Systems Analysis and Evaluation Group, California.

Feller, W. (1968): “An Introduction to Probability Theory and its Applications”. Vol. 1. Wiley.

Garg, S., Puliafito, A., Telek, M., Trivedi, K. (1.998): “Analysis of Preventive Maintenance in Transaction Based Software Systems”. IEEE Trans Computers, vol. 47, 96-107.

Gertsbakh, I. (1989): “Statistical Reliability Theory”. Marcel Dekker.

Gnedenko, B. (1968): "Mathematical Methods in Reliability Theory". Academic Press
Henley, E.; Kumamoto, H. (1991): "Probability Risk Assessment: Reliability Engineering, Design, and Analysis". IEEE Press.

Hoyland, A.; Rausand; M. (1994): "System Reliability Theory: Models and Statistical Methods". Wiley-Interscience.

IAEA (International Atomic Energy Agency) Training Courses Series (1993): "Handbook on safety Related to Maintenance (draft)". Viena.

Knezevic, J. (1996): "Mantenibilidad". Isdefe- Ingeniería de Sistemas.

Knezevic, J. (1996): "Mantenimiento". Isdefe- Ingeniería de Sistemas.

Knezevic, J. (1985): "Methodology EXETER for Selecting and Optimal Part- Replacement Policy". Maintenance Management Int., Vol 5, 209-218. Elsevier Science Publishers.

Kovalenko, Igor N., Kutnetsov, Nickolaj Yu., Pegg, Philip A. (1997): "Mathematical Theory of Reliability of Time Dependent Systems with Practical Applications". John Wiley & Sons Ltd.

Lawless, J. (1982): "Statistical Models and Methods for Lifetime Data". Wiley-Interscience.

Levin, M.; Kalal, T. (2003): "Improving Product Reliability: Strategies and Implementation". John Wiley & Sons.

Levine, D.; Ramsey, P.; Smidt, R. (2001): "Applied Statistics For Engineers and Scientists Using Microsoft Excel and MINITAB". Prentice Hall.

Levine, Stephan, Krehbiel & Berenson (2002): "Statistics for Managers using Microsoft Excel". Prentice Hall.

Mann, Jr. L., Saxena A., Knapp, G. M. (1995): "Statistical-based or Condition-based Preventive Maintenance". *Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, N°1, 46-59.

Meeker, W.; Escobar, L. (1998): "Statistical Methods for Reliability Data". John Wiley & Sons.

MIL-STD-1629A (1980): "Procedure for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis". US Department of Defense. Washington, DC.

Mobley, R. K. (1990): "An Introduction to Predictive Maintenance". Van Nostrand Reinhold.

Modarres, M.; Kaminskiy, M.; Krivtsov, V. (1999): "Reliability Engineering and Risk Analysis". Marcel Dekker, Inc.

Nachlas, Joel A.(1995): " Fiabilidad ". Isdefe- Ingeniería de Sistemas.

National Aeronautics and Space Administration (NASA), USA (2000): "Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment".

National Aeronautics and Space Administration (NASA), USA (2000): "Reliability Centered Building and Equipment Acceptance Guide".

Neale, M. J. (1987): "Trends in Maintenance and Condition Monitoring". *Condition Monitoring '87, Proc. International Conference on Condition Monitoring*, 2-12, Swansea (England)

Niebel, B. W. (1985): "Engineering Maintenance Management". Marcel Dekker, Inc.

Patrick D. T. O'Connor (1994): "Practical Reliability Engineering (3rd. Edition) ". John Wiley & Sons.

Patton, J. D. (1998): "Maintainability and Maintenance Management". 2nd Edition, Instrument Society of America.

- Pérez, C. (2.002): “Estadística Aplicada a través de Excel”. Pearson Educación, S.A.
- Pham, H. (ed) (2003): “Handbook of Reliability Engineering”. Springer-Verlag.
- Pulkkinen, U. (1991): “A Stochastic Model for Wear Prediction Through Condition Monitoring”. 233-243, Holmberg, k. & Folkesson, A. (edit.). Elsevier Science Publisher, Ltd.
- Ramakumar R. (1993): “Engineering Reliability: Fundamentals and Applications”. Prentice-Hall International, Inc.
- Ross, S. (1970): “Applied Probability Models with Optimization Applications”. Holden Day, San Francisco.
- Sharma, T. C., Key, W., Mancini, L. J., May, J., Richardson, J. E. & Schaner, G. (1993): “Next Generation Commercial Airlines: Reliability for Airlines Economics”. Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 192-198.
- Sherif, Y. S. & Smith M. L. (1981): “Optimal Maintenance Models for Systems Subject to Failure-a Review”. Naval Research Logistics Quartely, Vol. 28, 47-74.
- Shooman, M. (2002): “Reliability of Computer Systems and Networks”. John Wiley & Sons.
- Sierra Bravo, R. (1994): “Tesis Doctorales y Trabajos de Investigación Científica”. Ed. Paraninfo.
- Smith, D. J. (1985): “Reliability and Maintainability in Perspective: Practice, Contractual, Commercial and Software Aspects”. Macmillan, Software Reliability Library, London.
- Smith, R.L. (1991): “Weibull Regression Models for Reliability Analysis”. Reliab. Eng., 34, 55-77.

Stamatis, D. (2003): "Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution". American Society for Quality.

Standtorv, H. & M. Rausand (1991): "RCM-Closing the Loop between Design Reliability and Operational Reliability". Maintenance Journal, Vol. 6, Nº 1, 13-21.

Sternstein, E. & Gold T. (1991): "From Take off to Landing". Pocket Books, Siomm & Schuster Inc.

Tai, A., Meyer, J. (1.996): "Software Performability: From Concepts to Applications". Kluwer Academic Publishers.

Trivedi, K. (1.982): "Probability & Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Applications". Prentice-Hall.

Ushakov, I.A. (1994): "Handbook of Reliability Engineering". Wiley.

Warleta, J. (1973): "Fiabilidad: Bases Teóricas y Prácticas". Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial " Esteban Terradas" (INTA)

Wolstenholme, L. (1999): "Reliability Modelling: a Statistical Approach". Chapman & Hall /CRC.

Xue, J. (1985): "On Multi-state Systems Analysis". IEEE Trans. Reliab. R-34(4), 329-337.

Enlaces WEB:

- <http://www.reliasoft.com/>
Página web de la compañía Reliasoft, creadora de soluciones informáticas para analizar la fiabilidad de sistemas y componentes. Destaca su centro de recursos <http://www.weibull.com/>

- <http://www.bqr.com/>
Página web de la compañía BQR Reliability Engineering Ltd., creadora de herramientas informáticas para analizar la fiabilidad de sistemas y componentes.
- <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>
Libro on-line “*Engineering Statistics*”. Contiene explicaciones sobre técnicas estadísticas.
- <http://www.minitab.com>
Página web del programa estadístico Minitab. Desde ella es posible obtener una versión demo del programa así como abundante documentación sobre su uso.
- <http://www.nr.com>
Página web del “Numerical Recipes”. Contiene una considerable cantidad de algoritmos y métodos numéricos escritos en Fortran 77, Fortran 90 y C.
- <http://www.cprogramming.com>
Página web dedicada a proporcionar todo tipo de recursos sobre programación en C y C++.
- <http://lib.stat.cmu.edu/>
Librerías estadísticas elaboradas por el Departamento de Estadística de la Carnegie Mellon University.
- <http://www.planet-source-code.com>
Página web con abundante código fuente perteneciente a diferentes lenguajes de programación.
- <http://www.thefreecountry.com/sourcecode/mathematics.shtml>
Enlaces a librerías numéricas matemáticas y estadísticas escritas en C/C++.
- <http://www.asq-rd.org/review.htm>
Página web de la revista *Reliability Review* publicada por la *American Society for Quality*.

- <http://www.rac.alionscience.com/>
Página web del *Reliability Analysis Center (RAC)*
- <http://qsr.section.informs.org>
Sección del *Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS)* dedicada a la Calidad, la Estadística y la Fiabilidad.
- <http://www.esrel2007.com>
Seminario anual dedicado a *Safety and Reliability for Managing Risk*.

APÉNDICES

**A. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS CONTINUAS
UTILIZADAS (PARAMETRIZACIÓN)**

B. TIPOS DE REGRESIÓN

**C. CUADRO DE CONTROL DEL PROGRAMA DE
MANTENIMIENTO**

A.1 DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

Para un dispositivo sin taras iniciales y aún no afectado por el desgaste, es correcto en teoría suponer que su tasa de fallo es constante.

Notación: $\exp(\lambda); z(t) = \lambda(\text{constante})$

Función de densidad: $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}, t \geq 0$

Función de distribución: $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0$

Vida media: $\theta = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$

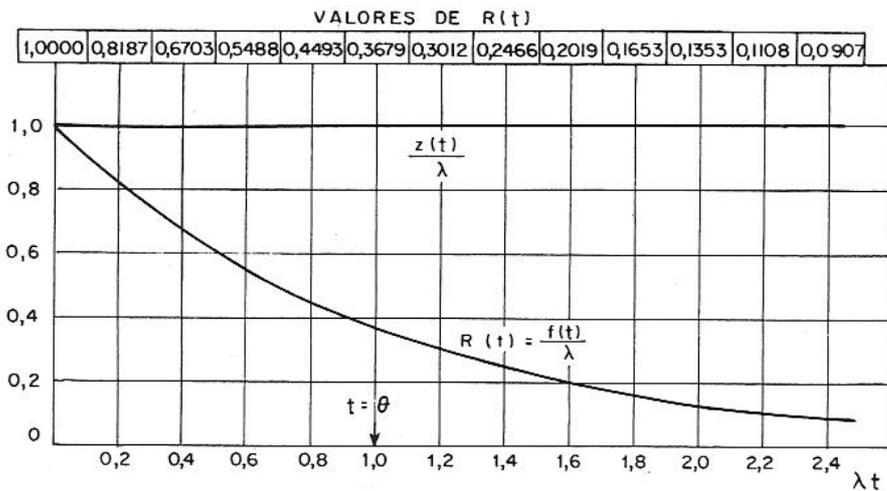


Fig. A.1. Curvas de densidad, fiabilidad y tasa de fallo de la distribución exponencial

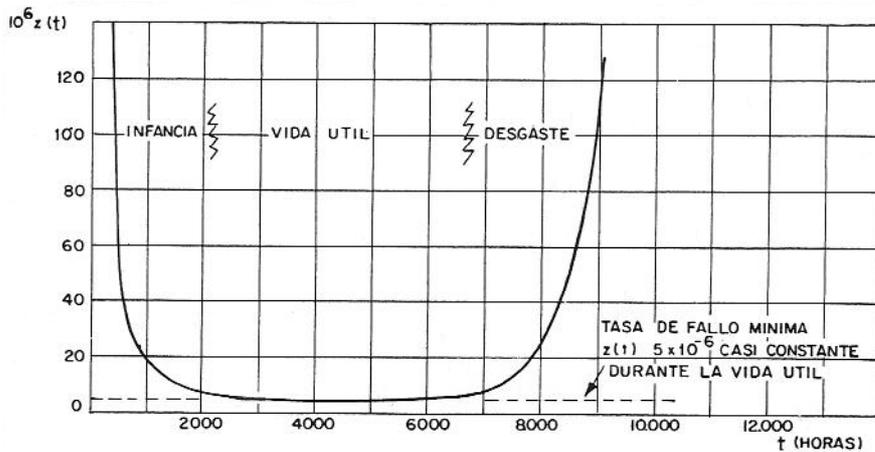


Fig. A.2. Curva de la bañera

La aplicabilidad práctica de la ley exponencial ha sido muy discutida. *Para fallar exponencialmente, un dispositivo ha de ser insensible a la edad y al uso.* Cualquier sollicitación que no llegue a producirle un fallo debe dejarlo como estaba. Si no ha fallado, debe ser tan bueno como cuando estaba nuevo.

Se aplica la distribución exponencial en los siguientes casos:

1/ en componentes de vida útil muy larga, que excede de la vida de servicio de los sistemas de los que forman parte. Es el caso de bastantes componentes electrónicos.

2/ en componentes que se sustituyen preventivamente antes de que llegue el desgaste.

3/ en sistemas en serie compuestos de bloques exponenciales y, en la práctica, en sistemas reparables muy complejos en los que no haya redundancias dominantes.

Es evidente que en los dos primeros casos, la vida media θ no lo es en rigor, pues sólo se tiene en cuenta la parte central de la curva de la bañera. Por ello, el parámetro θ , tratándose de componentes sujetos a desgaste, aunque empleados sólo durante su vida útil, es una “vida media ficticia”.

En el caso de sistemas que fallan exponencialmente y son reparables, θ es el *tiempo medio entre fallos (MTBF)* Evidentemente, los sistemas reparables tienen una nueva vida después de cada reparación. La distribución de fallos, en general, puede variar a cada fallo, por desgaste de los componentes que no han fallado y siguen en el sistema. No obstante, para los sistemas citados en 3/ como rigurosa o aproximadamente exponenciales, las sucesivas distribuciones son rigurosa o aproximadamente iguales, conservando el mismo valor de θ .

A.2 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Notación:

Weibull(γ, β, η); siendo:

γ = parámetro de origen (sólo se considera $t \geq \gamma$);

β = parámetro de forma;

η = parámetro de escala.

Función de densidad:
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot (t - \gamma)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, t > 0$$

Función de distribución (no fiabilidad):
$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, t > 0$$

Función de fiabilidad:
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Vida media:
$$\theta = E(\tau) = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right);$$

donde $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ es el valor de la función gamma, $\Gamma(x)$, para $x = 1 + \frac{1}{\beta}$

Función tasa de fallo:
$$z(t) = \frac{\beta}{\eta\beta} \cdot (t - \gamma)^{\beta-1}$$

La distribución de Weibull se utiliza como modelo preferido de ajuste de datos a una distribución de frecuencias cuando no hay *normalidad*.

Para el caso frecuente en que $\gamma = 0$ (es decir, hay posibilidad de fallo desde $t = 0$), y para el valor particular $\eta = 1$, el efecto de la variación de β sobre la tasa de fallo será:

a/ para $\beta < 1$, $z(t)$ es decreciente, como ocurre en el período infantil.

b/ para $\beta = 1$, $z(t)$ es constante e igual a $1/\eta$. La distribución, en ausencia de parámetro de origen, es exactamente la exponencial de media η .

c/ para $\beta > 1$, $z(t)$ es creciente, describiendo bien el período de desgaste. Particularmente, para $\beta = 2$, la función $z(t)$ es lineal. Para $\beta = 3.5$, la distribución de Weibull se aproxima mucho a la normal.

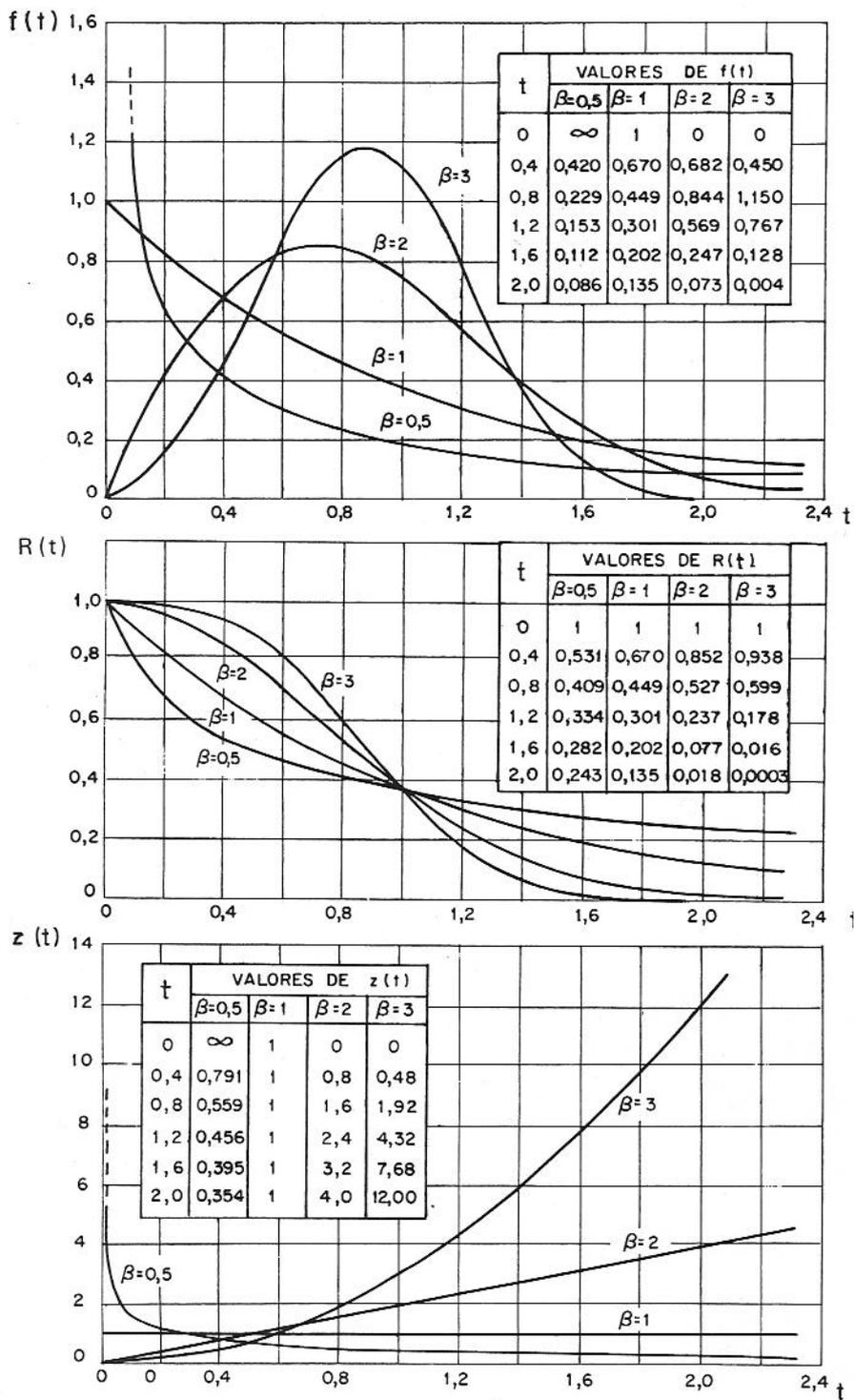


Fig. A.3. Curvas de densidad, fiabilidad y tasa de fallo de cuatro distribuciones de Weibull con $\gamma=0, \eta=1, \beta=0.5, 1, 2, 3$. Valores de t en miles de horas

A.3 DISTRIBUCIÓN NORMAL

Notación:

$$N(\theta, \sigma);$$

θ = media; σ = desviación típica

Vida media:

$$E(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \theta$$

Función de densidad:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{\sigma}\right)^2}; \quad -\infty < t < \infty$$

Función de distribución (no fiabilidad):

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{\sigma}\right)^2} dx$$

Función de fiabilidad:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{\sigma}\right)^2} dx$$

Función de tasa de fallo:

$$z(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\theta}{\sigma}\right)^2}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{\sigma}\right)^2} dx}; \text{ es siempre creciente}$$

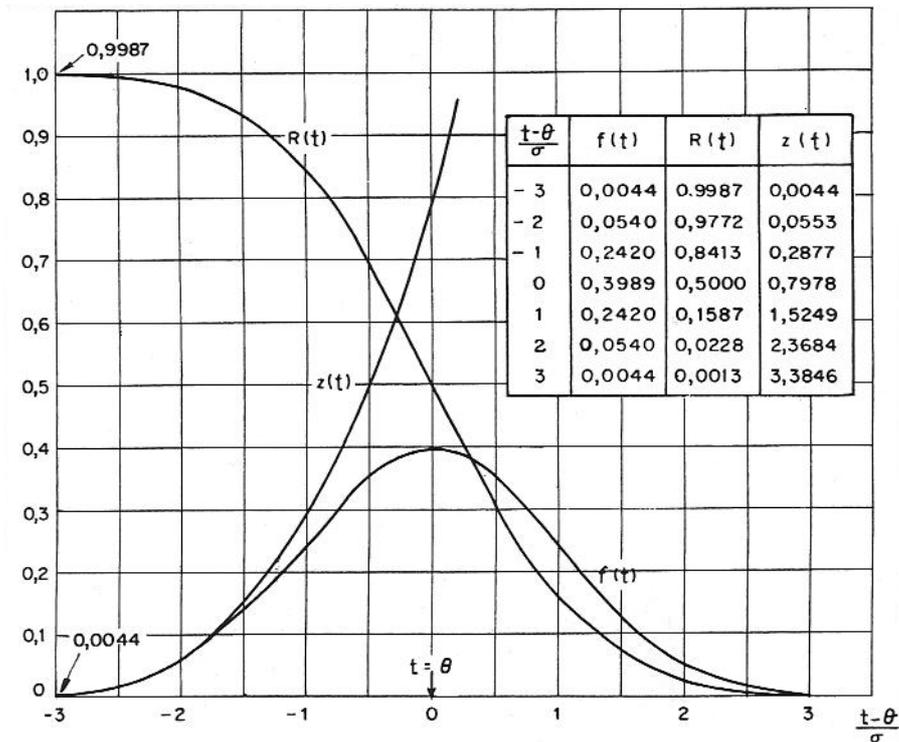


Fig. A.4. Curvas de densidad, fiabilidad y tasa de fallo de la distribución normal

El lector habrá advertido una anomalía en la expresión $F(t)$. En efecto, se toma como límite inferior de integración $-\infty$ en vez de 0. Esto se debe a que la densidad normal es no nula en todo el eje real, y no sólo en el semieje positivo. De esta forma, es posible que el fallo se produzca antes del instante inicial $t = 0$. Este defecto de la distribución normal como modelo de distribución de fallos no es grave si θ y σ son tales que la cola a la izquierda de $t = 0$ tiene un área despreciable. Para ello es necesario que θ sea mayor que 3 ó 4 veces σ , que es lo habitual.

La distribución normal típica (media 0 y desviación típica 1) está tabulada y sirve para manejar cualquier distribución normal, que puede tipificarse mediante el cambio de variable:

$$z = \frac{t - \theta}{\sigma}$$

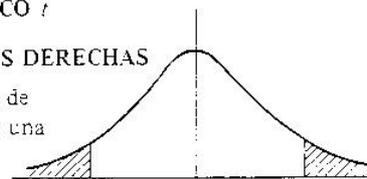
A.4 DISTRIBUCIÓN T de STUDENT

Se trata de una distribución esencial en inferencia estadística, sobre todo al tratar con muestras pequeñas y con poblaciones normales de varianza desconocida.

DISTRIBUCION DEL ESTADISTICO t

FRACILAS BILATERALES - FRACILAS DERECHAS

Valores de t en función de v (número de grados de libertad) y α (probabilidad en las dos colas o en una cola)



Valores de α (dos colas) $-t$ 0 t

v	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,885	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,457
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291
	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005

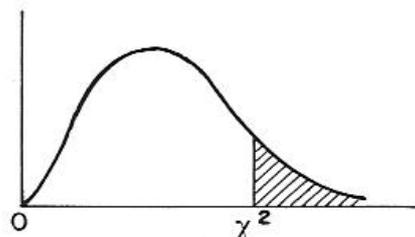
A.5 DISTRIBUCIÓN CHI-CUADRADO

Se utiliza en inferencia estadística.

DISTRIBUCION DEL ESTADISTICO χ^2

FRACTILAS DERECHAS

Valores de χ^2 en función de ν (número de grados de libertad) y α (probabilidad a la derecha)



Valores de α

ν	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,0 ³ 157	0,0 ³ 628	0,00393	0,0158	0,0642	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635	10,827
2	0,0201	0,0404	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210	13,815
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,665	4,642	6,251	7,815	9,837	11,345	16,263
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277	18,465
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086	20,517
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812	22,457
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475	24,322
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090	26,125
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666	27,877
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209	29,588
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725	31,264
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217	32,909
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688	34,528
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141	36,123
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578	37,697
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000	39,252
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409	40,790
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	32,346	34,805	42,312
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	15,352	18,338	21,689	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191	43,820
20	8,260	9,237	10,851	12,443	14,578	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566	45,315
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932	46,797
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289	48,268
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638	49,728
24	10,856	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980	51,179
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314	52,620
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,820	21,792	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642	54,052
27	12,879	14,125	16,151	18,114	20,703	22,719	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963	55,476
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278	56,893
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588	58,302
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892	59,703

Para $\nu > 30$, puede calcularse χ^2 sabiendo que $\sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu - 1}$ se distribuye según la ley normal típica, siendo α la probabilidad a la derecha tanto en la curva χ^2 como en la normal.

B.1 ECUACIONES DEL MODELO

Un modelo matemático puede ser definido, con amplitud, como una formulación que expresa las características esenciales de un sistema físico o proceso en términos matemáticos.

Nuestro modelo está basado en 2 ecuaciones: la primera de ellas ajusta una curva a un conjunto representado por puntos; la hemos denominado **función de deterioro del contactor**. La segunda representa la **función de fiabilidad para una distribución normal** parametrizada. Ambas ecuaciones interactúan según un algoritmo que se describe en el capítulo 9 con el fin de optimizar el mantenimiento basado en la técnica del examen de la condición.

La función de fiabilidad de una distribución normal⁶⁵ es igual a:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

siendo $F(t)$ la función de distribución (no-fiabilidad), luego:

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\theta}{\sigma}\right)^2} dx$$

Por lo que respecta a la primera ecuación, los métodos numéricos⁶⁶ son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos de tal forma que puedan resolverse utilizando operaciones aritméticas. Utilizaremos la **técnica de regresión lineal** en la determinación de esta ecuación.

Aunque hay muchos tipos de métodos numéricos, comparten una característica común: invariablemente se debe realizar un buen número de tediosos cálculos aritméticos. No es raro que con el desarrollo de computadoras digitales eficientes y rápidas, el papel de los

⁶⁵ Ver Apéndice A, apartado A.3.

⁶⁶ C. Chapra, Steven & P. Canale, Raymond: Métodos Numéricos para Ingenieros (Mc Graw Hill, 1.999)

métodos numéricos en la solución de problemas de ingeniería haya aumentado de forma considerable en los últimos años.

Una de las aplicaciones del empleo de los métodos numéricos consiste en el **ajuste de curvas**. A menudo se presentará la oportunidad de ajustar curvas a un conjunto de datos representados por puntos. Las técnicas que se han desarrollado para este fin pueden dividirse en dos categorías generales: *regresión e interpolación*. La primera se emplea cuando hay un grado significativo de error asociado a los datos; con frecuencia los datos experimentales son de esta clase. Para estas situaciones, la estrategia es encontrar una curva que represente la tendencia general de los datos sin necesidad de tocar los puntos individuales. En contraste, la interpolación se maneja cuando el objetivo es determinar valores intermedios entre datos que estén, relativamente, libres de error. Tal es el caso de la información tabulada (por ejemplo, la capacidad calorífica de los gases en función de la temperatura) Para estas situaciones, la estrategia es ajustar una curva directamente mediante los puntos y utilizar esta curva para predecir valores intermedios.

Los datos a menudo son dados para valores discretos a lo largo de un continuo. Sin embargo, puede que sólo necesitemos una estimación en puntos localizados entre valores discretos. En el caso del contactor, debido a que cualquier dato individual puede ser incorrecto, no se necesita interceptar cada punto. En lugar de esto, se designa la curva para seguir un patrón de los puntos tomados como un grupo. Un procedimiento de esta naturaleza se denomina **regresión por mínimos cuadrados**.

Cada vez son más populares los paquetes de software para aplicar los métodos numéricos. Para la implementación de nuestro modelo hemos elegido el paquete de software **Excel debido a su disponibilidad, coste, facilidad de uso y porque tiene acceso a una programación estructurada**. Excel es una hoja de cálculo producida por Microsoft cuyo tipo especial de software matemático permite al usuario, por ejemplo, el ajuste de curvas (regresión) y realizar grandes cálculos conectados entre sí (los macros en Excel se diseñaron para recibir alguna información, ejecutar cálculos y dar resultados) La hoja de cálculo es ideal para tipos de análisis “¿qué sucedería si...?” También incluye el **VisualBASIC**, un macrolenguaje que puede usarse para implementar cálculos numéricos. Tiene, asimismo, varias herramientas de visualización que son valiosos aditamentos para el análisis numérico.

Una de las principales metas de la estadística es estimar las propiedades de una *población* basada en una *muestra* limitada tomada de esa población. En consecuencia, se puede realizar un número de mediciones en forma aleatoria y, con base en la muestra, intentar caracterizar las propiedades de toda la población. Ya que se “infieren” propiedades de la población desconocida de una muestra limitada, el intento es denominado “inferencia estadística”. Debido a que los resultados son a menudo reportados como estimaciones de los parámetros de la población, el proceso es también referido como estimación.

En base a la muestra, se puede calcular una media estimada (\bar{y}) y la varianza (s_y^2) . Cuantas más mediciones se tomen, mejor serán las estimaciones para que se aproximen a los valores reales. Esto es: $n \rightarrow \infty$, $y \rightarrow \mu$, y $s_y^2 \rightarrow \sigma^2$.

Supongamos que se toman “n” mediciones de una muestra y se calcula una media estimada \bar{y}_1 . Después se toman otras “n” mediciones de otra muestra y se calcula \bar{y}_2 . Se puede repetir este proceso hasta que se haya generado una muestra de medias : $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \dots, \bar{y}_m$, donde m es grande. Se puede entonces desarrollar un histograma de estas medias y determinar una “distribución de las medias”, así como una “desviación estándar de las medias”. Ahora surge la pregunta: ¿esta nueva distribución de medias y su estadística se comportan de una forma predecible?

Existe un importante teorema conocido como el “Teorema de Límite Central” que responde en forma directa a esta pregunta. Se puede enunciar como:

Sea y_1, y_2, \dots, y_n una muestra aleatoria de tamaño “n” a partir de una distribución con una media μ y varianza σ^2 . Entonces, para “n” grandes, \bar{y} es aproximadamente normal con la media μ y la varianza σ^2/n . Además, para “n” grandes, la variable aleatoria $\frac{(\bar{y} - \mu)}{\sigma/\sqrt{n}}$ es, de manera aproximada, normal estándar.

Así, el teorema establece el resultado notable de que la distribución de medias siempre será normalmente distribuida, sin importar la distribución en uso de las variables aleatorias. Por lo tanto, dada una muestra lo suficientemente grande, la media de las medias debería converger sobre la media real de la población μ .

B.2 REGRESIÓN LINEAL

Aunque la relación entre las variables cuantitativas la modelizaremos según el tipo lineal, explicaremos las alternativas más adelante, en otros apartados. Se trata de una regresión lineal simple⁶⁷, ya que sólo disponemos de una variable independiente (en el caso de 2 ó más variables independientes, hablaríamos de regresión lineal múltiple)

Hipótesis sobre las que se soporta:

1. Independencia de las observaciones muestrales;
2. Normalidad de los valores de la variable independiente “Y” para cada valor de la variable explicativa;
3. Homocedasticidad (por ejemplo, la variabilidad de Y es la misma para todos los valores de X);
4. Relación lineal entre las dos variables;
5. Los residuos (ε) habrán de tener una distribución normal de media cero y varianza constante: $N(0, \sigma^2)$

El ejemplo más simple de una aproximación por mínimos cuadrados es mediante el ajuste de un conjunto de pares de observaciones: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ a una línea recta. La expresión matemática para esta última es:

$$y = a_0 + a_1x + \varepsilon \quad (I)$$

⁶⁷ “Statistics for Managers using Microsoft Excel (2002)”. Prentice Hall International, Inc. Pág. 511- Simple Linear Regression.

donde a_0 y a_1 son coeficientes que representan el valor de la ordenada en el origen y la pendiente, respectivamente, y “ ε ” es el error, o residuo, entre el modelo y las observaciones, las cuales se pueden representar al reordenar la *ecuación (1)* como:

$$\varepsilon = y - a_0 - a_1x$$

así, el error o residuo es la discrepancia entre el valor real de “ y ” y el valor aproximado ($a_0 + a_1x$) predicho por la ecuación lineal. La estrategia utilizada para ajustar la mejor línea a través de los datos consiste en minimizar la suma de los cuadrados de los residuos entre la “ y ” medida y la “ y ” calculada con el modelo lineal:

$$S_r = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,\text{medida}} - y_{i,\text{modelo}})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1x_i)^2 \quad (2)$$

Para determinar los valores de a_0 y a_1 , la ecuación (2) es diferenciada con respecto a cada coeficiente:

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1x_i)$$

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_1} = -2 \sum [(y_i - a_0 - a_1x_i)x_i]$$

Se han simplificado los símbolos del sumatorio; a menos que se indique otra cosa, los sumatorios son desde $i=1$ hasta n . Al fijar esas derivadas igual a cero, resultará en un mínimo S_r . Si se hace esto, las ecuaciones se pueden expresar como:

$$0 = \sum y_i - \sum a_0 - \sum a_1x_i$$

$$0 = \sum y_ix_i - \sum a_0x_i - \sum a_1x_i^2$$

Ahora, si hacemos que $\sum a_0 = na_0$, podemos expresar las ecuaciones como un conjunto de dos ecuaciones lineales con dos incógnitas a_0 y a_1 :

$$na_0 + (\sum x_i)a_1 = \sum y_i$$
$$(\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 = \sum x_i y_i$$

Estas son las llamadas ecuaciones normales, que, una vez resueltas, nos dan:

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}$$

donde:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$$

Cuantificación del error de una regresión lineal:

El cuadrado de los residuos representa el cuadrado de la distancia vertical entre los datos y otra medida de la tendencia central: la línea recta. Se puede demostrar que si la dispersión de los puntos alrededor de la línea es de magnitud similar a lo largo de todo el rango de datos, y si la distribución de esos puntos cerca de la línea es normal, la regresión por mínimos cuadrados proporcionará la mejor estimación de a_0 y a_1 (*Draper & Smith*, 1981) Esto es conocido en estadística como el *principio de probabilidad máxima*. Además, si estos criterios se cumplen, una desviación estándar para la línea de regresión se puede determinar como:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n-2}}$$

donde $S_{y/x}$ es llamado el *error estándar del estimado*. La notación del subíndice “y/x” designa que el error es para un valor predicho de “y” correspondiente a un valor particular de “x”. Se divide entre (n-2) debido a los 2 datos estimados, a_0 y a_1 , que se usaron para calcular S_r ; así, se tienen dos grados de libertad.

El error estándar de la estimación cuantifica la dispersión de los datos. Sin embargo, $S_{y/x}$, cuantifica la dispersión *alrededor de la línea de regresión*, en contraste con la desviación estándar original s_y que cuantifica la dispersión *alrededor de la media*.

Los conceptos anteriores se pueden utilizar para cuantificar la “bondad” de nuestro ajuste. Con este fin, regresamos a los datos originales y determinamos la *suma total de los cuadrados* alrededor de la media para la variable dependiente (y) Esta cantidad se designa por S_t , que es la magnitud del error residual asociado con la variable dependiente antes de la regresión. Después de realizar la regresión, calculamos S_r , la suma de los cuadrados de los residuos alrededor de la línea de regresión. Esto caracteriza el error residual que queda después de la regresión (también conocido como “la suma inexplicable de los cuadrados”) La diferencia entre estas dos cantidades, $(S_t - S_r)$, cuantifica la mejora o reducción de error debido a que describe los datos en términos de una línea recta en vez de cómo un valor promedio. Como la magnitud de esta cantidad es dependiente de la escala, la diferencia es normalizada a S_t para obtener:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t}$$

donde r^2 es conocido como el *coeficiente de determinación* y r es el *coeficiente de correlación* (esto es, la raíz cuadrada del anterior) Para un ajuste perfecto, $S_r = 0$ y $r = r^2 = 1$, significa que la línea explica el 100% de la variabilidad de los datos. Para $r = r^2 = 0$, $S_r = S_t$ y el ajuste no representa ninguna mejora. Una formulación alternativa para r que es más conveniente para implementarse en una computadora es:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Aunque los coeficientes de correlación proporcionan una manera fácil para medir la bondad del ajuste, **se deberá tener cuidado, ya que es posible obtener un valor relativamente alto de r cuando la relación entre “x” e “y” no es lineal.** Los test de normalidad para los residuos, como el de *Kolmogorov-Smirnov* y los contrastes de independencia de las observaciones, como el de *Durbin-Watson*, proporcionan guías con respecto al aseguramiento de los resultados para la regresión lineal.

B.3 REGRESIÓN DE POLINOMIOS

La regresión lineal proporciona una técnica poderosa que ajusta a la “mejor” línea los datos. Sin embargo, está predicha sobre el hecho de que la relación entre las variables dependientes e independientes es lineal. Éste no es siempre el caso, y el primer paso en cualquier análisis de regresión debería ser dibujar el gráfico de dispersión e inspeccionarlo en forma visual para asegurarnos si se puede usar un modelo lineal. Cuando se nos presentan datos obviamente curvilíneos, podemos utilizar técnicas distintas: hacer uso de transformaciones para expresar los datos en una forma que sea compatible con la regresión lineal o técnicas tales como la regresión por polinomios.

En el apartado anterior hemos desarrollado un procedimiento para obtener la ecuación de una línea recta por medio del criterio de mínimos cuadrados. Algunos datos de ingeniería, aunque exhiban un patrón marcado, están pobremente representados por una línea recta. Para estos casos, una curva podría ser más adecuada para el ajuste de los datos. El procedimiento de mínimos cuadrados se puede extender fácilmente al ajuste de datos con un polinomio de orden superior. Por ejemplo, supongamos que ajustamos un polinomio de segundo orden o cuadrático:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e$$

Para este caso, la suma de los cuadrados de los residuos es (compárese con la *ecuación 2*):

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2)^2 \quad (3)$$

derivando la ecuación 3 con respecto a cada uno de los coeficientes desconocidos del polinomio, nos queda:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_r}{\partial a_0} &= -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_1} &= -2 \sum x_i (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \\ \frac{\partial S_r}{\partial a_2} &= -2 \sum x_i^2 (y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2) \end{aligned}$$

estas ecuaciones se pueden igualar a cero y reordenar para desarrollar el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{aligned} (n)a_0 + (\sum x_i)a_1 + (\sum x_i^2)a_2 &= \sum y_i \\ (\sum x_i)a_0 + (\sum x_i^2)a_1 + (\sum x_i^3)a_2 &= \sum x_i y_i \\ (\sum x_i^2)a_0 + (\sum x_i^3)a_1 + (\sum x_i^4)a_2 &= \sum x_i^2 y_i \end{aligned}$$

donde los sumatorios son desde $i = 1$ hasta n . Las tres ecuaciones son lineales y tienen tres incógnitas: a_0, a_1 y a_2 . Los coeficientes de las incógnitas se pueden evaluar de manera directa a partir de los datos observados.

Para este caso, el problema de determinar un polinomio por mínimos cuadrados de segundo orden es equivalente a resolver un sistema de tres ecuaciones lineales.

El supuesto en dos dimensiones puede extenderse fácilmente a un polinomio de n -ésimo orden como:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m + e$$

La determinación de los coeficientes de un polinomio m-ésimo orden es equivalente a resolver un sistema de (m+1) ecuaciones lineales. Para estos casos, el error estándar se formula como:

$$S_{x/y} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}} \quad (4)$$

Esta cantidad es dividida entre n-(m+1), ya que (m+1) coeficientes obtenidos de los datos (a_0, a_1, \dots, a_m) se usaron para calcular S_r ; así, hemos perdido m+1 grados de libertad. Además del error estándar, un coeficiente de determinación puede ser calculado para una regresión de polinomios con la ecuación (4)

B.4 REGRESIÓN NO LINEAL

Hay muchos casos en ingeniería donde modelos no lineales deben ser ajustados con datos. Estos modelos se definen como aquellos que tienen dependencia no lineal de sus parámetros. Por ejemplo:

$$f(x) = a_0(1 - e^{-a_1x}) + e$$

Al igual que en el caso lineal, la regresión no lineal se basa en la determinación de los valores de los parámetros que minimizan la suma de los cuadrados de los residuos; sin embargo, para el caso no lineal, la solución debe proceder en una forma iterativa.

El *método de Gauss-Newton* es un algoritmo para minimizar la suma de los cuadrados de los residuos entre datos y ecuaciones no lineales. El concepto clave que resalta la técnica es el empleo de un desarrollo en serie de Taylor para expresar la ecuación no lineal original en una forma lineal aproximada. Entonces, la teoría de mínimos cuadrados es útil para obtener nuevas estimaciones de los parámetros que se mueven en la dirección de minimizar el residuo.

Para ilustrar cómo se hace esto, primero se puede expresar de manera general la relación entre la ecuación no lineal y los datos como:

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i$$

donde:

y_i = valor medido de la variable dependiente.

$f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$ = ecuación que es una función de la variable independiente x_i y una función no lineal de los parámetros a_0, a_1, \dots, a_m .

e_i = error aleatorio.

Por conveniencia, este modelo se puede expresar de forma abreviada al omitir los parámetros, de esta forma:

$$y_i = f(x_i) + e_i \quad (5)$$

El modelo no lineal puede ser desarrollado en una serie de Taylor alrededor de valores de parámetro y reducido después de las primeras derivadas. Por ejemplo, para un caso de dos parámetros:

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad (6)$$

donde:

j = valores iniciales

$j+1$ = predicción

$$\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$$

$$\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$$

De esta forma, hemos linealizado el modelo original con respecto a los parámetros. La ecuación (6) se puede sustituir en la ecuación (5) para obtener:

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i$$

o, en forma matricial:

$$\{D\} = [Z_j] \{\Delta A\} + \{E\} \quad (7)$$

donde $[Z_j]$ es la matriz de las derivadas parciales de la función evaluada en el valor inicial j ,

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} \end{bmatrix}$$

siendo:

n = número de datos.

$\frac{\partial f_i}{\partial a_k}$ = derivada parcial de la función con respecto al k -ésimo parámetro evaluado en el

i -ésimo punto.

El vector $\{D\}$ contiene las diferencias entre las mediciones y los valores de la función.

$$\{D\} = \left\{ \begin{array}{l} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n - f(x_n) \end{array} \right\}$$

y el vector $\{\Delta A\}$ contiene los cambios en los valores de los parámetros,

$$\{\Delta A\} = \begin{Bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta a_m \end{Bmatrix}$$

Si se aplica la teoría de mínimos cuadrados lineales a la *ecuación (7)*, obtendríamos las siguientes ecuaciones normales:

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = \{[Z_j]^T \{D\}\} \quad (8)$$

Así, el procedimiento consiste en resolver la ecuación (8) para $\{\Delta A\}$, la cual se puede emplear para calcular valores mejorados para los parámetros, como en:

$$a_{0,j+1} = a_{0,j} + \Delta a_0$$

y,

$$a_{1,j+1} = a_{1,j} + \Delta a_1$$

Este procedimiento se repite hasta que la solución converge, es decir, hasta:

$$|\mathcal{E}_a|_k = \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| 100\%$$

B.5 AJUSTE DE CURVAS CON EXCEL

Excel tiene grandes capacidades para el ajuste de curvas. Además de algunas funciones predeterminadas (ver tabla adjunta), existen dos formas principales en las cuales esta capacidad se puede implementar: el comando “Trendline” y el “Paquete de Herramientas para el Análisis de Datos”.

Función	Descripción
FORECAST	Calcula un valor junto con una tendencia lineal
GROWTH	Calcula valores junto con una tendencia exponencial
INTERCEPT	Calcula la ordenada de la línea de regresión lineal
LINEST	Calcula los parámetros de una tendencia lineal
LOGEST	Calcula los parámetros de una tendencia exponencial
SLOPE	Calcula la pendiente de la línea de regresión lineal
TREND	Calcula un valor junto con una tendencia lineal

Tabla B.5. Funciones de Excel que relacionan los ajustes por regresión de datos

El comando Trendline (menú Insert):

Este comando permite un número de diferentes modelos de tendencia que se pueden agregar a la gráfica. Esos modelos incluyen ajustes lineales, polinomiales, logarítmicos, exponenciales y de promedio de movimiento.

Para ejecutar el comando *Trendline*, se debe crear una gráfica que relacione una serie de variables dependientes e independientes. Se usará la guía de gráficas de Excel *Wizard* (asistentes) para crear una gráfica XY con los datos. Después, se selecciona la gráfica (haciendo doble clic en ésta) y la serie (al posicionar el cursor sobre uno de los valores y con un solo clic) Los comandos *Insert* y *Trendline* son entonces ejecutados con la ayuda del ratón o por la siguiente secuencia de teclas:

/Insert Trendline

En este punto, se abre un cuadro de diálogo con dos tabuladores: el *Options* y el *Type*. El primero de ellos proporciona formas para configurar el ajuste. Lo más importante en este contexto es desplegar tanto la ecuación como el valor del coeficiente de determinación (r^2) sobre la gráfica. La primera elección en el tabulador *Type* es para especificar el tipo de línea.

El comando *Trendline* proporciona una manera fácil para ajustar un número de modelos para datos que se usan de manera común. Sin embargo, debido a su contenido

estadístico, está limitado a r^2 , y esto significa que no permite dibujar inferencias estadísticas con respecto al modelo a ajustar. El paquete de herramientas para el análisis de datos que se describirá a continuación proporciona una excelente alternativa para los casos donde las inferencias son necesarias.

El Paquete de Herramientas para el Análisis de Datos:

Este paquete de Excel contiene una amplia capacidad para el ajuste de curvas mediante mínimos cuadrados.

El modelo general de mínimos cuadrados lineales es el siguiente:

$$y = a_0z_0 + a_1z_1 + a_2z_2 + \dots + a_mz_m + e \quad (9)$$

donde:

z_0, z_1, \dots, z_m son las $(m+1)$ funciones diferentes. Se puede ver con facilidad cómo la regresión lineal simple y múltiple encajan dentro de este modelo; es decir:

$$z_0 = 1, z_1 = x_1, z_2 = x_2, \dots, z_m = x_m$$

Además, la regresión de polinomios se incluye también si las z son monomios simples como en:

$$z_0 = x^0 = 1, z_1 = x, z_2 = x^2, z_m = x^m$$

La terminología lineal se refiere sólo a la dependencia del modelo sobre sus parámetros; las mismas funciones pueden ser altamente no lineales. Por ejemplo, z puede ser sinusoidal, como en:

$$y = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \sin(\omega t)$$

Este formato es la base del análisis de Fourier. Por otro lado, un modelo de apariencia simple como:

$$f(x) = a_0(1 - e^{-a_1x})$$

es ciertamente no lineal porque no puede ser manejado en el formato de la *ecuación (9)*

El paquete de herramientas para el análisis de datos debe, algunas veces, cargarse en Excel. Para hacer esto, simplemente se usará el ratón o la secuencia de teclas:

/Tools Add-Ins

Después, se seleccionará *Analysis Toolpack* y *OK*. Si el *add-in* ha sido satisfactorio, la selección *Data Analysis* se incluirá en el menú *Tools*. Una vez seleccionado *Data Analysis* en el menú *Tools*, un menú de *Data Analysis* aparecerá en pantalla conteniendo un gran número de rutinas orientadas estadísticamente. Seleccionando *Regression*, aparecerá un cuadro de diálogo que esperará se le proporcione información sobre la regresión.

La herramienta Solver:

Se puede utilizar la herramienta *Solver* de Excel para ejecutar una regresión no lineal al minimizar de manera directa la suma de los cuadrados de los residuos entre la predicción modelo no lineal y los datos.

C.1 DESCRIPCIÓN DEL CUADRO DE CONTROL DEL MANTENIMIENTO

El programa se ha concebido de modo que el usuario sólo tiene que introducir las actuaciones y carrera reales; el programa calculará el resto de valores.

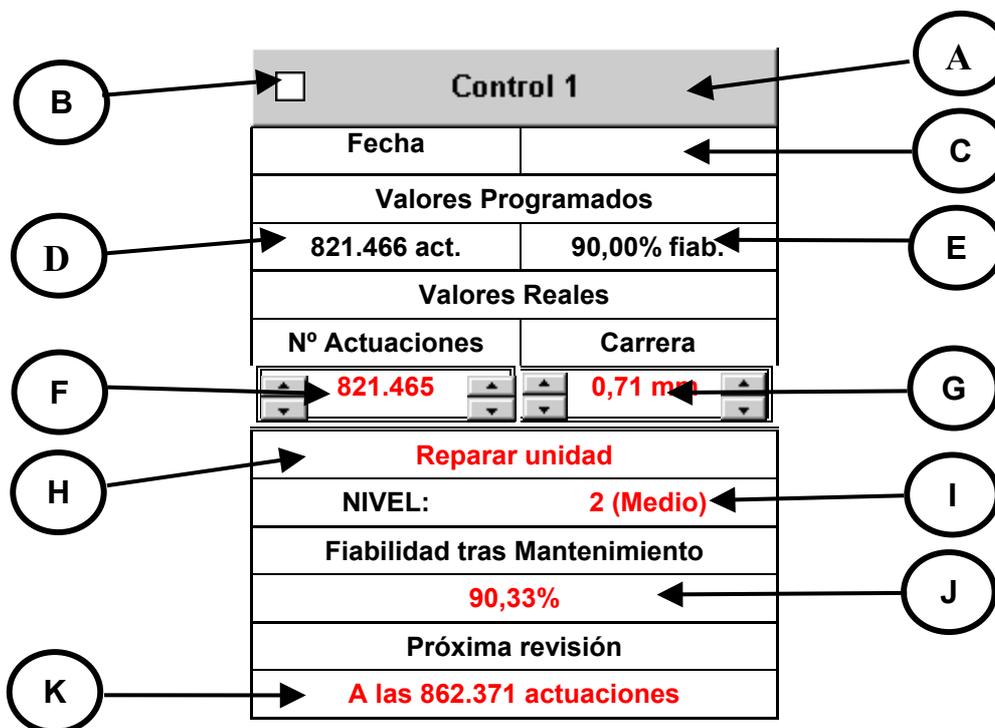


Fig. C.1 Descripción del cuadro de control

A.- Activador de "Control de Mantenimiento".

→ Al pulsar con el ratón sobre él, se activa el control.

B.- Indicador de "Control de Mantenimiento"

→ El cajetín B lo muestra:

C.- "Fecha".

→ A rellenar por el usuario.

D.- “Nº de actuaciones previstas a la que hay que efectuar el control”.

E.- “Fiabilidad prevista cuando cumpla el nº de actuaciones que indica D”.

F.- “Actuaciones reales a las que se hace el control”.

→ El botón  de la izquierda modifica los miles (0 a 120), y el de la derecha los de unidades/decenas/centenas (0 a 999)

G.- “Carrera real (medida en milímetros) cuando se hace el control”.

→ El botón  de la izquierda modifica los enteros, y el de la derecha los decimales.

H.- “Diagnóstico”

→ Indica al operador si tiene que cambiar la unidad, repararla, o continuar las operaciones como hasta ese momento.

I.- “Nivel de reparación que requiere la unidad”.

→ Indica qué se ha de hacer para volver, al menos, a una fiabilidad real igual al umbral de aceptación indicado en el apartado: Datos y Parámetros (Hoja Datos)

J.- “Fiabilidad real obtenida tras la reparación”.

K.- “Nº de actuaciones previstas a las que debe hacerse el siguiente control de mantenimiento”.

→ Se calcula para que la fiabilidad sea la correspondiente al umbral de aceptación.