

# **INGENIERÍA Y GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN EL SECTOR FERROVIARIO**

JOSÉ LUIS ARQUES PATÓN  
Dr. Ingeniero Industrial

# INGENIERÍA Y GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN EL SECTOR FERROVIARIO



# Índice

---

Acerca del libro .....	XI
Agradecimiento .....	XV
Citas .....	XVII
Dedicatoria .....	XIX

## Parte primera: CONCEPTOS BÁSICOS

<b>Capítulo 1: Fiabilidad</b> .....	3
1.1. Definición de fiabilidad .....	3
1.1.1. Concepto físico de la fiabilidad .....	6
1.2. Definición de fallo y tipos de fallo .....	9
1.2.1. Causas de los fallos .....	10
1.3. Medida de la fiabilidad cuando la tasa de fallo es constante .....	11
1.4. Variabilidad de la tasa de fallo .....	13
1.4.1. Determinación de la variación de la tasa de fallo .....	15
1.4.2. Influencia del periodo en la medida de la fiabilidad .....	20
1.5. Predicción de la fiabilidad .....	23
1.5.1. Intervalo de confianza de la fiabilidad .....	25
1.6. Fiabilidad de los equipos complejos .....	30
1.7. Demostración de la fiabilidad .....	38
1.7.1. Esquema progresivo .....	40

<b>Capítulo 2: Mantenibilidad</b> .....	45
2.1. Definición de mantenibilidad .....	45
2.2. Clases de mantenimiento .....	46
2.2.1. Aplicabilidad de cada clase de mantenimiento .....	47
2.3. Medida de la mantenibilidad cuando la tasa de restauración es constante.	51
2.4. Variabilidad de la mantenibilidad .....	51
2.4.1. Intervalo de confianza de la medida de la mantenibilidad .....	54
2.5. Predicción de la mantenibilidad .....	58
2.6. Mantenibilidad de los equipos complejos .....	63
2.7. Demostración de la mantenibilidad .....	66
<b>Capítulo 3: Disponibilidad</b> .....	69
3.1. Definición de disponibilidad .....	69
3.2. Medida de la disponibilidad .....	69
3.3. Predicción de la disponibilidad .....	72
3.4. Disponibilidad de los equipos complejos .....	76

### Parte segunda:

## INFLUENCIA DEL DISEÑO EN EL MANTENIMIENTO

<b>Capítulo 4: Coste del ciclo de vida</b> .....	81
4.1. Factores que influyen en los costes del mantenimiento .....	81
4.2. El coste del ciclo de vida .....	83
4.2.1. Evaluación del LCC en función del coste del programa de fiabilidad en el diseño .....	84
4.3. Eficacia y eficiencia .....	89
<b>Capítulo 5: La fiabilidad en el diseño</b> .....	95
5.1. Metodología para introducir la fiabilidad en el diseño .....	95
5.2. Pliego de condiciones técnicas y operativas .....	97
5.2.1. Fiabilidad operacional .....	101
5.3. Predicción de la fiabilidad .....	103
5.4. Inspección de la fabricación .....	109
5.5. Demostración de la fiabilidad .....	110

<b>Capítulo 6: La mantenibilidad en el diseño</b> .....	115
6.1. Metodología para introducir la mantenibilidad en el diseño .....	115
6.2. Pliego de condiciones técnicas y operativas .....	116
6.2.1. Mantenibilidad operacional .....	118
6.3. Predicción de la mantenibilidad .....	120
6.3.1. Análisis funcional .....	120
6.3.2. Evaluación de la mantenibilidad .....	122
6.4. Demostración de la mantenibilidad .....	128
6.5. Documentación de mantenimiento .....	131
6.6. Recambio de primera dotación .....	142

### **Parte tercera: LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO**

<b>Capítulo 7: Elementos del sistema de gestión</b> .....	149
7.1. Principio básico de la gestión del mantenimiento .....	149
7.2. Ley de distribución de los resultados .....	149
7.3. Concepto de desviación y sus causas .....	153
7.3.1. Causas de las desviaciones .....	156
7.4. Fases del proceso de mejora .....	158
7.4.1. La capacidad del proceso aplicada al mantenimiento .....	162
7.4.2. Causas de fallo derivadas del concepto de capacidad .....	164
<b>Capítulo 8: Actuación ante las desviaciones</b> .....	167
8.1. Primer objetivo del mantenimiento .....	167
8.1.1. La eficacia en la gestión .....	167
8.2. Registro de datos .....	168
8.2.1. Indicadores .....	168
8.2.2. Gráficos de control .....	169
8.2.3. El cuadro de mando .....	177
8.3. Detección de las desviaciones a partir de los gráficos de control .....	178
8.4. Evaluación de las causas .....	180
8.5. Acciones correctivas, su evaluación, aprobación y ejecución .....	187
8.6. Mejora del proceso ante causas comunes de desviación .....	188
8.6.1. Ensayo factorial .....	190
8.6.2. Método Taguchi .....	195

<b>Capítulo 9: Mejora de la eficiencia</b> .....	199
9.1. Segundo objetivo del mantenimiento .....	199
9.1.1. Mejora de la eficiencia .....	200
9.1.2. Indicadores de eficiencia .....	201
9.1.3. Limitaciones prácticas .....	203
9.2. Innovación en nuevos equipos .....	206
9.3. Innovación en nuevas herramientas y útiles de trabajo .....	208
9.4. Innovación en las tareas de mantenimiento .....	210
9.5. Efectividad técnica de una acción de mantenimiento .....	215
9.5.1. Mantenimiento predictivo .....	216
9.5.2. Inspecciones de fallos .....	220
9.5.3. El mantenimiento de mejora .....	221
9.6. Efectividad económica de una acción de mantenimiento .....	222
9.6.1. Período del mantenimiento preventivo .....	223
9.6.2. Período de una inspección .....	225
9.6.3. Decisión de reparar o sustituir .....	227
9.6.4. Ejecución de la mejora .....	229
<b>Anexo Tablas</b> .....	233
<b>Bibliografía</b> .....	247
<b>Índice analítico</b> .....	251

## Acerca del libro

---

El presente libro intenta exponer de forma ordenada, los apuntes que durante los últimos años he ido preparando para mis clases en el curso de Postgrado de Mantenimiento de Equipos e Instalaciones que, con carácter anual, imparte la Universitat Politècnica de Catalunya en Terrassa (Barcelona) y en el Institute for International Research de Madrid, los cuales recogen mi experiencia en el ámbito del mantenimiento industrial y más específicamente, en el sector ferroviario en el que llevo trabajando más de veinticinco años.

La idea fundamental del libro está recogida en la *Parte Segunda* y consiste en la influencia que el diseño del equipo tiene en el mantenimiento posterior del mismo, tema del cual he podido comprobar que no existe una gran experiencia a pesar de su importancia. Sostengo la idea a lo largo del libro (y también profesionalmente) que el Departamento de Mantenimiento de una empresa poco puede hacer para conseguir unos costes bajos y unas fiabilidades elevadas, si el diseño no lo ha tenido en cuenta y se ha podido demostrar durante el período de garantía del equipo en servicio. Por ello, el *Capítulo 5* describe la metodología recomendada para obtener la fiabilidad deseada en el equipo durante la fase de diseño, mientras que el *Capítulo 6* describe la metodología necesaria para alcanzar la mantenibilidad; ambas partes tienen muchos aspectos en común, por lo que, en la práctica, conviene que sean llevadas a cabo simultáneamente por un mismo equipo de trabajo en colaboración con el constructor durante la fase de diseño del nuevo equipo. Ambas metodologías pretenden llenar el vacío que frecuentemente existe entre la concepción del equipo por parte de la empresa (o al menos, las expectativas que tiene puestas en dicho equipo) y que suele recogerse de forma más o menos completa en un contrato, hasta el momento en el que el equipo es entregado y puesto en servicio por el constructor.

Suelo comentar en mis clases que aquello que la empresa desea y plasma en un contrato y aquello que la empresa obtiene constituyen las dos orillas de un río el cual es necesario cruzar sin mojarse, en el mejor de los casos; pues bien, en esta imagen, las dos metodologías descritas son las piedras que deben ponerse en el cauce del río para atravesarlo felizmente. Por este motivo, no hay razón alguna para no aplicarlas sistemáticamente durante la fase de diseño de cualquier equipo, simple o complejo, ya sea un tren, una subestación eléctrica o un tramo de vía o de catenaria, pues lo que debe variar en cada caso, es el nivel de esfuerzo a aplicar para su desarrollo; es decir, el tamaño y número de piedras a colocar dependerá del caudal y ancho del río.

Sobre el coste que ello supone, hay suficientes argumentos en el *Capítulo 4* que justifican que el mayor coste y esfuerzo inicial (aunque no en demasía) en la fase de diseño queda compensado, sobradamente, por el menor coste que se producirá durante el período de mantenimiento posterior al tiempo que se consigue eliminar los costes debidos a las modificaciones del diseño, que tan frecuentes son en el ferrocarril, para intentar alcanzar, siquiera mínimamente, las expectativas planteadas en el contrato. Asumir la idea de optimizar el coste del ciclo de vida en lugar de intentar optimizar los costes de adquisición y de mantenimiento por separado facilita este tipo de decisiones.

La descripción de los temas ligados al mantenimiento de un equipo (fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad) durante su fase de diseño, requiere una base teórica que, aunque muchos lectores sin duda poseen, conviene homogeneizar y en nuestro caso, darle el alcance que precisan posteriores aplicaciones; esta es la razón por la que me pareció conveniente segregarla en mis clases, presentándola en primer lugar y así, lo he mantenido en este libro. La *Parte Primera* está dedicada, por tanto, al desarrollo de todos los aspectos básicos: el *Capítulo 1*, está dedicado a la fiabilidad y el *Capítulo 2*, a la mantenibilidad; ambos presentan un esquema similar y su objetivo es introducir y desarrollar los conceptos que después encontrarán su aplicación en los Capítulos 5 y 6 en especial, los aspectos que hacen referencia a la predicción y demostración de la fiabilidad y de la mantenibilidad; por esta razón, el desarrollo de sus contenidos no suele ser el habitual y así, a modo de ejemplo, las leyes de distribución estadística no se explican agrupadas en un solo capítulo sino en aquellos capítulos en los que su importancia es mayor: la ley exponencial y la ley de Weibull en el *Capítulo 1* de fiabilidad, la ley log-normal en el *Capítulo 2* de la mantenibilidad y la ley normal en el *Capítulo 7* destinado al análisis de los procesos.

La *Parte Tercera* del libro trata de la gestión del mantenimiento, lo cual es tanto como decir qué debe hacer el Departamento de Mantenimiento para mantener los resultados conseguidos por el diseño a lo largo de la vida útil del equipo e incluso, de mejorarlo, si ello es posible. El *Capítulo 7* analiza los elementos del sistema de gestión del mantenimiento y su capacidad para solventar las desviaciones de los resultados, mientras que el *Capítulo 8* describe las acciones a realizar para eliminar las desviaciones que puedan presentarse e incluso, para evitar que tales desviaciones lleguen a producirse, asegurando así la eficacia del mantenimiento como su primer objetivo.

El segundo objetivo del mantenimiento es la mejora de la eficiencia y a ello está destinado el *Capítulo 9*, describiendo ampliamente con numerosos ejemplos como la innovación en nuevos equipos, en nuevas herramientas y útiles de trabajo y en el rediseño de los procedimientos de trabajo pueden impactar favorablemente en el logro de este objetivo.

El libro, por tanto, pretende mantener un esquema coherente y lógico pasando de los conceptos básicos de la parte primera, a la metodología en el diseño de la parte segunda, para finalizar en las actividades más propias de la función mantenimiento de la parte tercera. Aun cuando este es el orden de lectura recomendado, obviamente el lector experimentado puede seguir el orden que más desee; en este sentido, las notas a pie de página le ayudarán a mantener la cohesión entre los diferentes capítulos anteriormente comentada, al tiempo que evitarán interrupciones innecesarias en el texto.

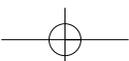
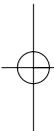
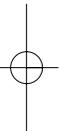
Para un mejor desarrollo de los conceptos, he preferido apoyarme en ejemplos referidos al sector ferroviario, algunos de ellos simplificados, lo que le confiere un carácter eminentemente práctico evitando así, hasta donde me ha sido posible, largas y tediosas descripciones; asimismo, se han incluido al final del libro las *tablas* utilizadas en dichos ejemplos, lo que facilitará el seguimiento de los mismos, ya de por sí, muy detallados. También, se ha incluido al final, la relación de la *bibliografía* consultada a la cual el lector más exigente podrá dirigirse en el caso de estar interesado en ampliar o profundizar en aquellos aspectos que puedan ser de su interés o en aquellos otros en los que el presente libro no se ha extendido para no salirse de su propio contexto general (algunos comentarios hay al respecto).

Sólo me resta añadir mi deseo de que este libro sirva para que muchos profesionales del sector confirmen lo que ya saben y para que unos pocos, quizás los más jóvenes, descubran un camino profesional que lejos de estar anticuado u obsoleto, goza de una salud inmejorable, ya que el mantenimiento es, sin duda, la herramienta indispensable para garantizar eso tan sencillo y tan necesario en nuestro sistema de transporte de que los trenes salgan cada día a su hora.



Parte primera

**CONCEPTOS  
BÁSICOS**



# Capítulo 1

## FIABILIDAD

---

### 1.1. DEFINICIÓN DE FIABILIDAD

Se define como *fiabilidad* de un equipo la *probabilidad* de que dicho equipo se mantenga en *funcionamiento correcto* durante un tiempo determinado y bajo unas *condiciones determinadas de marcha o actuación*; en consecuencia, si estas condiciones cambian, la fiabilidad cambiará también, por lo que deberá extremarse la prudencia a la hora de comparar valores de fiabilidad de equipos idénticos que funcionen bajo condiciones distintas.

La *fiabilidad*, que se representa por  $R(t)$ <sup>1</sup>, varía con el tiempo de funcionamiento del equipo, adoptando su valor máximo  $R(0) = 1$  en el instante inicial ( $t = 0$ ), para disminuir posteriormente a medida que el tiempo aumenta, de manera que cuando este es suficientemente grande ( $t = \infty$ ) la fiabilidad alcanza su valor mínimo  $R(\infty) = 0$ .

El valor complementario de  $R(t)$  se conoce como *función acumulada de la probabilidad de fallo*, se representa por  $F(t)$  y representa la probabilidad de que el equipo falle al cabo de un tiempo  $t$ .

Ambas funciones están relacionadas por la ecuación:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad [1.1]$$

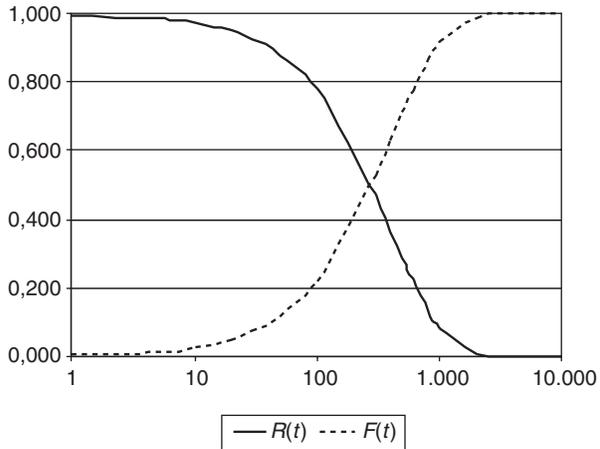
y la Figura 1.1 muestra la evolución de ambas a lo largo del tiempo.

A partir de  $R(t)$  y de  $F(t)$  podemos definir una nueva función  $f(t)$  que se denomina *función de densidad de la probabilidad de fallo*:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad [1.2]$$

---

<sup>1</sup> En este capítulo y en los siguientes, se ha seguido mayoritariamente la simbología adoptada por la Norma UNE-EN 61.703 (2003).



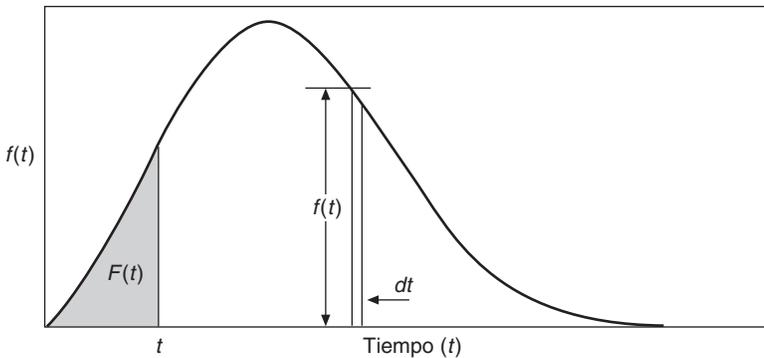
**Figura 1.1.** Variación de las funciones  $R(t)$  y  $F(t)$  a lo largo del tiempo.

De las ecuaciones [1.2] se deducen las siguientes:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt \quad [1.3]$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt$$

La función  $f(t)$  representa la probabilidad de que un equipo que estaba en funcionamiento en el instante inicial  $t = 0$  falle en el intervalo de tiempo  $(t, t + dt)$ . La variación de esta función a lo largo del tiempo tiene una forma similar a la indicada en la Figura 1.2, en donde  $F(t)$  representa el área bajo la curva en el intervalo  $(0, t)$ , mientras que  $R(t)$  se corresponde con el área bajo la curva de  $f(t)$  en el intervalo  $(t, \infty)$ .



**Figura 1.2.** Representación de la función de densidad de probabilidad de fallo.

La relación entre  $f(t)$  y  $R(t)$  es otra nueva función,  $\lambda(t)$ , conocida como *tasa de fallo*, la cual se define como la probabilidad de que un equipo que llega al instante  $t$  en perfecto funcionamiento falle en el intervalo  $(t, t + dt)$ :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad [1.4]$$

**Ejemplo 1.1:** Si disponemos de 50 componentes que funcionan en el instante inicial y de los cuales solamente funcionan 45 al cabo de 100 horas, podemos estimar la fiabilidad en este instante mediante la relación:

$$R(100) = \frac{n_{100}}{n_0} = \frac{45}{50} = 0,9 = 90\%$$

$$F(100) = 1 - R(100) = 1 - 0,9 = 0,1 = 10\%$$

Si, además, sabemos que 90 horas más tarde solo funcionan 35 componentes, podemos calcular la densidad de probabilidad de fallo  $f(t)$  de la siguiente manera:

$$f(100) = \frac{n_{100} - n_{190}}{n_0 \cdot \Delta t} = \frac{45 - 35}{50 \cdot 90} = 0,00222$$

y asimismo, la tasa de fallo:

$$\lambda(100) = \frac{n_{100} - n_{190}}{n_{100} \cdot \Delta t} = \frac{45 - 35}{45 \cdot 90} = 0,00247$$

Se puede verificar que:

$$R(100) = \frac{f(100)}{\lambda(100)} = \frac{0,00222}{0,00247} = 0,90$$

que confirma el valor encontrado inicialmente.

De la ecuación [1.4] se deduce que:

$$\lambda(t) dt = \frac{f(t) dt}{R(t)} = \frac{d[R(t)]}{R(t)} = -d[\ln R(t)] \quad [1.5]$$

de la cual, al integrar ambos términos entre 0 y  $t$ , se obtiene la *relación fundamental de la fiabilidad*:

$$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt\right] = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad [1.6]$$

Si se conoce la expresión matemática de la función  $f(t)$ , podremos calcular la media de sus valores mediante la expresión:

$$m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = MTTF \quad [1.7]$$

que en mantenimiento se conoce como la *media de los tiempos hasta el fallo* o  $MTTF^2$  y que suele emplearse como una medida sencilla de la fiabilidad del equipo. Asimismo, podemos calcular la dispersión de los valores de la función  $f(t)$  respecto del valor medio (conocida como *varianza*<sup>3</sup>) mediante la expresión:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - MTTF)^2 \cdot f(t) dt \quad [1.8]$$

En la práctica, *media* y *varianza* (o *desviación tipo*) son los parámetros que sirven para caracterizar la distribución de la función de densidad de la probabilidad de fallo  $f(t)$ .

### 1.1.1. Concepto físico de la fiabilidad

De forma general, podemos admitir que cualquier componente está definido por su resistencia  $R$  y suele soportar una carga  $C$  cuando está en funcionamiento. En la práctica, no obstante, los valores reales de  $R$  para un mismo tipo de componente suelen agruparse alrededor de un valor medio  $R_m$ ; asimismo, la carga aplicada tampoco suele ser constante en el tiempo sino que varía alrededor de un valor medio  $C_m$ .

Si las distribuciones de  $R$  y  $C$  están completamente separadas y no hay interferencia entre ellas (Figura 1.3) el componente no fallará; pero si dichas distribuciones se solapan (Figura 1.4), el fallo podrá ocurrir cuando la carga real aplicada a un componente supere su resistencia.

Si la distribución de  $R$  está definida por el par de valores  $(R_m, \sigma_R)$  y la distribución de  $C$  por  $(C_m, \sigma_C)$ , el *margen de seguridad MS* puede obtenerse del cociente:

$$MS = \frac{R_m - C_m}{(\sigma_R^2 - \sigma_C^2)^{1/2}} \quad [1.9]$$

a partir del cual, se puede calcular la fiabilidad del componente mediante la expresión<sup>4</sup>:

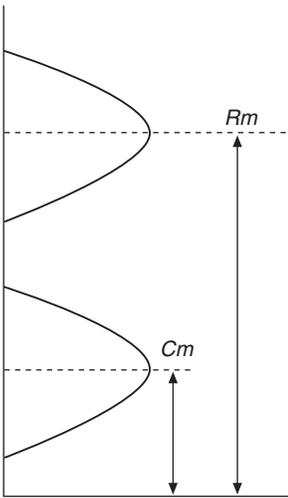
$$R = \Phi(MS) \quad [1.10]$$

que se representa gráficamente en la Figura 1.5 para valores de  $MS \geq 0$ , calculada a partir de la Tabla 5 del Anexo.

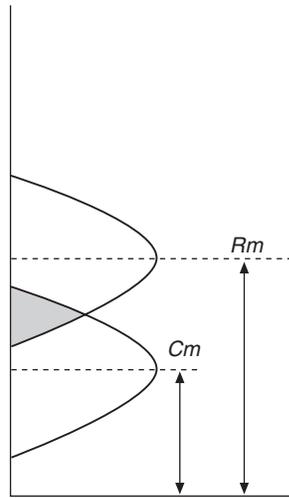
<sup>2</sup> En rigor, el *MTTF* únicamente es de aplicación para los componentes no reparables; cuando un equipo es reparable, entonces se habla de *media de los tiempos entre fallos* o *MTBF*; no obstante, a lo largo del texto utilizaremos habitualmente ambos conceptos de manera indistinta.

<sup>3</sup> Si  $\sigma^2$  se denomina *varianza*,  $\sigma$  se conoce como *desviación tipo* o *desviación estándar*.

<sup>4</sup> Esto solo es estrictamente cierto si la resistencia y la carga están distribuidas según la *ley normal*, sobre la que se tratará en el Capítulo 7.



**Figura 1.3.** Las distribuciones de los valores de la resistencia y de la carga están completamente separadas.



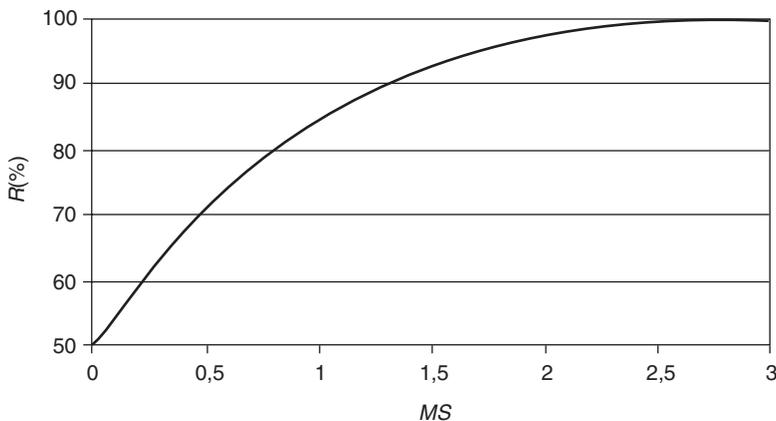
**Figura 1.4.** Las distribuciones de los valores de la resistencia y de la carga llegan a solaparse.

**Ejemplo 1.2:** Supongamos que un componente tiene una resistencia media de  $60,0 \text{ kg/cm}^2$  y una desviación tipo de  $3,0 \text{ kg/cm}^2$  y está sometido a una carga de  $46,0 \text{ kg/cm}^2$  de valor medio y  $5,5 \text{ kg/cm}^2$  de desviación tipo. Determinar su margen de seguridad y la fiabilidad asociada.

De acuerdo con lo visto anteriormente, será:

$$MS = \frac{60,0 - 46,0}{\sqrt{3,0^2 + 5,5^2}} = \frac{14,0}{6,26} = 2,24$$

y de la Figura 1.5 (o de la Tabla 5 del Anexo) obtendremos que la fiabilidad del componente será del 98,75% (o  $0,5 + 0,4875 = 0,9875$ ).



**Figura 1.5.** Valores de la fiabilidad  $R$  de un componente en función del margen de seguridad  $MS$ .

En ocasiones la resistencia del componente no se mantiene constante a lo largo del tiempo como suele ser el caso de los componentes sometidos a esfuerzos de fatiga en los que la aparición de una grieta y su desarrollo posterior acaba reduciendo la superficie útil de trabajo del componente hasta que éste no puede soportar la carga total aplicada, sobreviniendo así la rotura. En este caso, si se conocen los parámetros de desarrollo de la grieta y la sección mínima a la cual se produce la rotura podremos determinar el tiempo que falta hasta que se produzca el fallo del componente, tal y como se muestra en el Ejemplo 1.3.

**Ejemplo 1.3:** Es conocido que los carriles de una vía se agrietan debido a los esfuerzos derivados del paso de los trenes. La sección que ocupa una grieta en relación a la sección de la cabeza del carril sigue la ley siguiente [Alias (1987)]:

$$S_T = S_0 \cdot e^{0,12 \cdot T}$$

con una desviación tipo de:

$$\sigma_T = 0,19 \cdot S_T$$

siendo:

$S_0$  = el porcentaje de la sección de la grieta en el momento inicial.

$S_T$  = el porcentaje de la sección de la grieta después de soportar la vía el paso de  $T$  millones de toneladas.

Se sabe, además, que en el momento de la rotura del carril es:

$$S_R = 0,57$$

$$\sigma_R = 0,18$$

Si en el instante inicial  $S_0$  vale 0,15 se desea conocer con un nivel de confianza del 95% el tiempo que transcurrirá hasta la rotura de un carril que soporta el paso de 90.278 toneladas/día.

El cálculo de  $MS$  es:

$$MS = \frac{0,57 - 0,15 \cdot e^{0,12 \cdot T}}{\sqrt{0,18^2 + (0,19 \cdot 0,15 \cdot e^{0,12 \cdot T})^2}} \cong \frac{0,57 - 0,15 \cdot e^{0,12 \cdot T}}{0,18} = 3,167 - 0,833 \cdot e^{0,12 \cdot T}$$

ya que podemos admitir para el segundo término de la raíz cuadrada la siguiente simplificación:

$$(0,19 \cdot 0,15 \cdot e^{0,12 \cdot T})^2 = 0,0285^2 \cdot e^{2 \cdot 0,12 \cdot T} = 0,00081 \cdot e^{0,24 \cdot T} \cong 0$$

Si el nivel de confianza es del 95%, entonces  $R(MS) = 95\% = 0,95$  y de la Figura 1.5 o de la Tabla 5 del Anexo se puede obtener que  $MS = 1,650$ ; por tanto:

$$1,650 = 3,167 - 0,833 \cdot e^{0,12 \cdot T}$$

que resolviendo da una valor para  $T$  de 4,99 millones de toneladas y el número de días hasta rotura se obtendrá del cociente:

$$\text{Días hasta rotura} = \frac{4,99 \cdot 10^6}{90.278} = 55$$

## 1.2. DEFINICIÓN DE FALLO Y TIPOS DE FALLO

Se define *fallo*, al cese de la capacidad de un elemento para realizar la función requerida. Los fallos pueden clasificarse de acuerdo con su *criticidad* o con su *naturaleza*.

El concepto de *criticidad de un fallo* está relacionado con la gravedad de las consecuencias que puede provocar. Si únicamente atendemos al impacto en el servicio, los fallos pueden clasificarse en *significativos*, *importantes* y *menores*, cuyas definiciones se recogen en la Tabla 1.1.

En el caso de un servicio metropolitano, si se adopta, por ejemplo, que el periodo especificado es de 3 minutos, un *fallo significativo* será aquél que impida el movimiento del tren o que su recuperación provoque un retraso en el servicio superior a los 3 minutos; el valor medio de estos fallos permitirá obtener la *fiabilidad en servicio* de los trenes. Un *fallo importante* será aquel que provoque un retraso inferior a los 3 minutos, aunque finalmente el tren deba ser retirado del servicio en el momento oportuno y sin mayores interferencias; el valor medio de estos fallos permite conocer la *fiabilidad del parque de trenes* propiamente dicha. Finalmente, un *fallo menor* será cualquier otro fallo que no esté contemplado en los dos casos anteriores.

En el caso de las instalaciones existentes en una estación, el periodo especificado puede ser mayor si existen soluciones alternativas, como sucede con las instalaciones de acceso, con las máquinas de venta de billetes o incluso con las escaleras mecánicas para las que suele adoptarse el periodo de 24 horas.

Si además de los daños en el propio equipo, se tienen en cuenta los *daños* producidos *en las personas y en el medioambiente*, los fallos pueden clasificarse en cuatro niveles, tal y como se muestra en la Tabla 1.2, siendo necesario establecer cuantitativamente qué se entiende por importante, apreciable y despreciable, a fin de reducir al máximo la subjetividad a la hora de calificar el fallo.

**Tabla 1.1.** Categorías de fallos atendiendo a su impacto sobre la disponibilidad del servicio [adaptado de UNE-EN 50.126 (2005)].

CATEGORÍA DE FALLO	DEFINICIÓN
SIGNIFICATIVO	Fallo que impide la prestación del servicio o que provoca un retraso en el servicio superior al periodo especificado.
IMPORTANTE	Fallo que debe ser corregido para que el equipo logre el rendimiento especificado pero que no provoca un retraso superior al especificado para el fallo significativo.
MENOR	Fallo que no impide que el equipo logre el rendimiento especificado y que no cumple con los criterios para ser considerado fallo significativo o importante.

**Tabla 1.2.** Niveles de gravedad de los fallos cuando se consideran los daños al equipo y su repercusión en las personas y en el medioambiente [adaptado de UNE-EN 50.126 (2005) y 20.812 (1995)].

CATEGORÍA DE FALLO	FUNCIÓN	EQUIPO	AMBIENTE	PERSONAS
CATASTRÓFICO	Pérdida de una función esencial	Produce daños importantes		Puede causar muerte o daños corporales
CRÍTICO				Presenta riesgos despreciables de muerte o de daños personales
NO CRÍTICO	Funcionamiento degradado	No causa daños apreciables		No representa daños importantes
MENOR		Causa daños despreciables		No presenta riesgo de daños

De acuerdo con su *naturaleza*, los fallos pueden ser evidentes u ocultos al operador. Un fallo es *evidente*, cuando produce un efecto en el sistema; por ejemplo, una bomba de achique si falla hará subir el nivel de agua, lo cual podrá detectarse mediante un mecanismo de control; también, si el compresor de un tren se avería se reducirá la presión de aire y el tren frenará al poco tiempo. Por el contrario, un fallo se dice que es *oculto* cuando necesita de un evento posterior para ser detectado, lo que suele ser habitual en los sistemas de control o de detección (de incendios, por ejemplo) y en los sistemas formados por dos equipos en los que uno está en activo y el otro está en reposo hasta que el anterior falle (caso de las bombas de achique, por ejemplo). En ambos casos, se necesita un evento previo (el incendio o el fallo de la bomba principal) para confirmar que el sistema de detección o la bomba de seguridad tienen un fallo; de manera similar, la obturación del radiador de refrigeración de un compresor solo podrá detectarse cuando pare de funcionar el compresor por sobrecalentamiento.

### 1.2.1. Causas de los fallos

El concepto físico de fiabilidad explicado en el apartado 1.1.1, permite afirmar que los fallos pueden ser debidos a una resistencia inadecuada del componente, a una sobrecarga aplicada sobre el mismo o a ambas cosas a la vez.

Una *resistencia inadecuada* significa que el componente no es apto para realizar las funciones previstas, lo cual puede ser debido a un diseño deficiente (por ejemplo, tarjetas que no soportan las elevadas temperaturas del ambiente en que