

JOSÉP LLUÍS ARQUES I PATÓN
Dr. Enginyer Industrial

**ENGINYERIA I GESTIÓ
DEL MANTENIMENT
EN EL SECTOR
FERROVIARI**



Índice

Sobre el llibre	XI
Agraïment	XV
Citacions	XVII
Dedicatòria	XIX

Primera Part: CONCEPTES BÀSICS

Capítol 1: Fiabilitat	3
1.1. Definició de fiabilitat	3
1.1.1. Concepte físic de fiabilitat	6
1.2. Definició y tipus de fallada	9
1.2.1. Causes de les fallades	10
1.3. Mesura de la fiabilitat quan la taxa de fallada es constant	11
1.4. Variabilitat de la taxa de fallada	13
1.4.1. Determinació de la variació de la taxa de fallada	15
1.4.2. Influència del període en la mesura de la fiabilitat	20
1.5. Predicció de la fiabilitat	23
1.5.1. Interval de confiança de la fiabilitat	25
1.6. Fiabilitat dels equips complexos	30
1.7. Demostració de la fiabilitat	38
1.7.1. Esquema progressiu	40

Capítol 2: Mantenibilitat	45
2.1. Definició de mantenibilitat	45
2.2. Tipus de manteniment	46
2.2.1. Aplicabilitat de cada tipus de manteniment	47
2.3. Mesura de la mantenibilitat quan la taxa de restauració és constant.....	51
2.4. Variabilitat de la mantenibilitat	51
2.4.1. Interval de confiança de la mesura de la mantenibilitat.....	54
2.5. Predicció de la mantenibilitat	58
2.6. Mantenibilitat dels equips complexos	63
2.7. Demostració de la mantenibilitat	66
Capítol 3: Disponibilitat	69
3.1. Definició de disponibilitat	69
3.2. Mesura de la disponibilitat	69
3.3. Predicció de la disponibilitat	72
3.4. Disponibilitat dels equips complexos	76

Segona part:

INFLUÈNCIA DEL DISSENY EN EL MANTENIMENT

Capítol 4: Cost del cycle de vida	81
4.1. Factors que influeixen en els costos del manteniment	81
4.2. El cost del cycle de vida	83
4.2.1. Avaluació de l'LCC en funció del cost del programa de fiabilitat en el disseny	84
4.3. Eficàcia y eficiència	89
Capítol 5: La fiabilitat en el disseny	95
5.1. Metodologia per introduir la fiabilitat en el disseny	95
5.2. Plec de condicions tècniques i operatives	97
5.2.1. Fiabilitat operacional	101
5.3. Predicció de la fiabilitat	103
5.4. Inspecció de la fabricació	109
5.5. Demostració de la fiabilitat	110

Capítol 6: La mantenibilitat en el disseny	115
6.1. Metodologia per introduir la mantenibilitat en el disseny	115
6.2. Plec de condicions tècniques i operatives	116
6.2.1. Mantenibilitat operacional	118
6.3. Predicció de la mantenibilitat	120
6.3.1. Anàlisi funcional	120
6.3.2. Avaluació de la mantenibilitat	122
6.4. Demostració de la mantenibilitat	128
6.5. Documentació de manteniment	131
6.6. Recanvi de primera dotació	142

Tercera part: LA GESTIÓ DEL MANTENIMENT

Capítol 7: Elements del sistema de gestió	149
7.1. Principi bàsic de la gestió del manteniment	149
7.2. Llei de distribució del resultats	149
7.3. Concepte i causes de desviació	153
7.3.1. Causes de les desviacions	156
7.4. Fases del procés de millora	158
7.4.1. La capacitat del procés aplicada al manteniment	162
7.4.2. Causes de fallada derivades del concepte de capacitat	164
Capítol 8: Actuació davant les desviacions	167
8.1. Primer objectiu del manteniment	167
8.1.1. L'eficàcia en la gestió	167
8.2. Registre de dades	168
8.2.1. Indicadors	168
8.2.2. Gràfics de control	169
8.2.3. El quadre de commandament	177
8.3. Detecció de las desviacions a partir dels gràfics de control	178
8.4. Avaluació de les causes	180
8.5. Accions correctives i avaluació, aprovació i execució	187
8.6. Millora del procés davant causes comunes de desviació	188
8.6.1. Assaig factorial	190
8.6.2. Mètode Taguchi	195

Capítol 9: Millora de l'eficiència	199
9.1. Segon objectiu del manteniment	199
9.1.1. Millora de l'eficiència	200
9.1.2. Indicadors d'eficiència	201
9.1.3. Limitacions pràctiques	203
9.2. Innovació en equips nous	206
9.3. Innovació en noves eines i estris de treball	208
9.4. Innovación en les tasques de manteniment	210
9.5. Efectivitat tècnica d'una acció de manteniment	215
9.5.1. Manteniment predictiu	216
9.5.2. Inspeccions de fallades	220
9.5.3. El manteniment de millora	221
9.6. Efectivitat econòmica d'una acció de manteniment	222
9.6.1. Període del manteniment preventiu	223
9.6.2. Període d'una inspecció	225
9.6.3. Decisió de reparar o substituir	227
9.6.4. Execució de la millora	229
Annex Taules	233
Bibliografia	247
Índex analític	251

Sobre el llibre

Aquest llibre té com a objectiu exposar de manera ordenada els apunts que durant els últims anys he anat preparant per a les classes que imparteixo al curs de post-grau de Manteniment d'Equips i Instal·lacions que, amb caràcter anual, ofereix la Universitat Politècnica de Catalunya a Terrassa (Barcelona) i a l'Institute for International Research de Madrid, els quals recullen la meva experiència en l'àmbit del manteniment industrial i, més específicament, en el sector ferroviari, en el qual fa més de 25 anys que hi treballa.

El llibre gira al voltant d'una idea fonamental, recollida a la *Segona Part*: la influència que el disseny de l'equip té en el seu manteniment posterior, tema sobre el qual he pogut comprovar que no hi ha massa experiència, tot i la seva importància. Sostinc la idea al llarg del llibre (i també professionalment) que el Departament de Manteniment d'una empresa pot fer poca cosa per aconseguir uns costos baixos i unes fiabilitats elevades si el disseny no ha tingut en compte aquests factors i ho ha pogut demostrar durant el període de garantia de l'equip en servei. Per això, el *Capítol 5* descriu la metodologia recomanada per obtenir la fiabilitat desitjada a l'equip durant la fase de disseny, mentre que el *Capítol 6* analitza la metodologia necessària per assolir la mantenibilitat; ambdues parts tenen molts aspectes en comú, per la qual cosa, a la pràctica, convé que siguin portades a terme conjuntament per un mateix equip de treball amb la col·laboració del constructor durant la fase de disseny del nou equip. Les dues metodologies pretenen omplir el buit que sovint hi ha entre la concepció de l'equip per part de l'empresa (o almenys, les expectatives que hi té posades en aquest), que se sol recollir de manera més o menys completa en un contracte, i el moment en què l'equip és lliurat i posat en servei pel constructor.

A les meves classes acostumo a comentar que el que l'empresa desitja i plasma en un contracte i el que l'empresa obté constitueixen les dues ribes d'un riu que cal

travessar sense mullar-se, en el millor dels casos; doncs bé, en aquesta imatge, les dues metodologies descrites són les pedres que cal anar posant en el curs del riu per travessar-lo amb èxit. Per aquest motiu, no hi ha cap raó per no aplicar-les sistemàticament durant la fase de disseny de qualsevol equip, simple o complex, ja sigui un tren, una subestació elèctrica o un tram de via o de catenària, atès que el que ha de variar en cada cas és el nivell d'esforç que cal aplicar per al seu desenvolupament; és a dir, les dimensions i el nombre de pedres que cal posar al riu dependran del seu cabal i la seva amplitud.

Sobre el cost que això suposa, al *Capítol 4* hi ha prou arguments que justifiquen que el major cost i esforç inicial (tot i que no en excés) a la fase de disseny queda compensat àmpliament pel menor cost que es produirà durant el període de manteniment posterior, al temps que s'aconsegueix eliminar el costos deguts a les modificacions del disseny, que tan freqüents són en el ferrocarril, per intentar assolir, encara que sigui mínimament, les expectatives plantejades al contracte. Assumir la idea d'optimitzar el cost del cicle de vida en lloc d'intentar optimitzar els costos d'adquisició i de manteniment per separat facilita aquest tipus de decisions.

La descripció dels temes relacionats amb el manteniment d'un equip (fiabilitat, mantenibilitat i disponibilitat) durant la seva fase de disseny requereix una base teòrica que, encara que molts lectors sens dubte posseeixen, convé homogeneïtzar i, en el nostre cas, donar-li l'abast que requereixen aplicacions posteriors; aquesta és la raó per la qual em va semblar convenient segregar-la a les meves classes i presentarla en primer lloc, i així ho he fet en aquest llibre. La *Primera Part* està dirigida, per tant, al desenvolupament de tots els aspectes bàsics: el *Capítol 1* està dedicat a la fiabilitat, i el *Capítol 2*, a la mantenibilitat; tots dos presenten un esquema similar i tenen com a objectiu introduir i desenvolupar els conceptes que després trobaran la seva aplicació en els capítols 5 i 6, en especial els aspectes que fan referència a la predicció i demostració de la fiabilitat i la mantenibilitat; per aquesta raó, el desenvolupament dels seus continguts no sol ser l'habitual, i així, a tall d'exemple, les lleis de distribució estadística no s'expliquen agrupades en un sol capítol, sinó en els capítols en què la seva importància és més gran: la llei exponencial i la llei de Weibull, al *Capítol 1* de fiabilitat, la llei log-normal, al *Capítol 2* de la mantenibilitat, i la llei normal, al *Capítol 7*, destinat a l'anàlisi dels processos.

La *Tercera Part* del llibre tracta la gestió del manteniment, la qual cosa és tant com dir què ha de fer el Departament de Manteniment per mantenir els resultats aconseguits pel disseny al llarg de la vida útil de l'equip i, fins i tot, millorar-lo, si és possible. Al *Capítol 7* s'analitzen els elements del sistema de gestió del manteniment i la seva capacitat per solucionar les desviacions dels resultats, mentre que al *Capítol 8* es descriuen les accions que cal realitzar per eliminar les desviacions que es puguin presentar i fins i tot, per evitar que es puguin arribar a produir i assegurar d'aquesta manera l'eficàcia del manteniment com a primer objectiu.

El segon objectiu del manteniment és la millora de l'eficiència; el *Capítol 9* tracta precisament aquest assumpte descrivint àmpliament i amb nombrosos exemples com la innovació en nous equips i noves eines i estris de treball i el redisseny

dels procediments de treball poden tenir un impacte favorable en el compliment d'aquest objectiu.

El llibre, per tant, pretén mantenir un esquema coherent i lògic passant dels conceptes bàsics de la primera part a la metodologia en el disseny de la segona part, per acabar amb les activitats més pròpies de la funció de manteniment de la tercera part. Tot i que aquest és l'ordre de lectura recomanat, òbviament el lector experimentat pot seguir l'ordre que més li convingui; en aquest sentit, les notes a peu de pàgina l'ajudaran a mantenir la cohesió entre els diversos capítols comentada anteriorment, alhora que evitaran interrupcions innecessàries en el text.

Per a un millor desenvolupament dels conceptes, he preferit recolzar-me en exemples referits al sector ferroviari, alguns d'ells simplificats, fet que confereix al text un caràcter eminentment pràctic i m'ha permès evitar, fins on m'ha estat possible, descripcions llargues i tedioses; així mateix, s'han inclòs al final del llibre les *taules* utilitzades en els exemples esmentats, per si mateixos molt detallats, fet que en facilitarà el seguiment. També s'ha inclòs al final la llista de la *bibliografia* consultada, a la qual el lector més exigent es podrà dirigir si desitja ampliar o aprofundir els aspectes que puguin ser del seu interès o els temes en què aquest llibre no s'ha estès per no sortir del seu context general (hi ha alguns comentaris sobre això).

Només em resta afegir el meu desig que aquest llibre serveixi perquè molts professionals del sector confirmin el que ja saben i perquè alguns altres, potser els més joves, descobreixin un camí professional que, lluny d'estar antiquat o obsolet, gaudeix d'una salut immillorable, ja que el manteniment és, sens dubte, l'eina indispensable per garantir això tan senzill i tan necessari en el nostre sistema de transport: que els trens surtin cada dia a la seva hora.

Primera part

**CONCEPTES
BÀSICS**

FIABILITAT

1.1. DEFINICIÓ DE FIABILITAT

La *fiabilitat* d'un equip es defineix com la *probabilitat* que aquest es mantingui en funcionament correcte durant un temps determinat i en unes *condicions determinades* de marxa o actuació; per tant, si aquestes condicions canvien, la fiabilitat també canvia, i per això cal extremar la prudència a l'hora de comparar valors de fiabilitat d'equips idèntics que funcionin en condicions diferents.

La *fiabilitat*, que es representa per $R(t)$ ¹, varia amb el temps de funcionament de l'equip; adopta el seu valor màxim $R(0) = 1$ en l'instant inicial ($t = 0$), i posteriorment disminueix a mesura que el temps augmenta, de manera que quan aquest és prou gran ($t = \infty$) la fiabilitat assoleix el seu valor mínim $R(\infty) = 0$.

El valor complementari de $R(t)$ es coneix com a *funció acumulada de la probabilitat de fallada*, s'expressa per $F(t)$ i representa la probabilitat que l'equip falli al cap d'un temps t .

Les dues funcions estan relacionades per l'equació:

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

i la Figura 1.1 mostra l'evolució de les dues al llarg del temps.

A partir de $R(t)$ i de $F(t)$ podem definir una nova funció $f(t)$ que es denomina *funció de densitat de la probabilitat de fallada*:

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

¹ En aquest capítol i en els següents, s'ha seguit majoritàriament la simbologia adoptada per la norma UNE-EN 61.703 (2003).

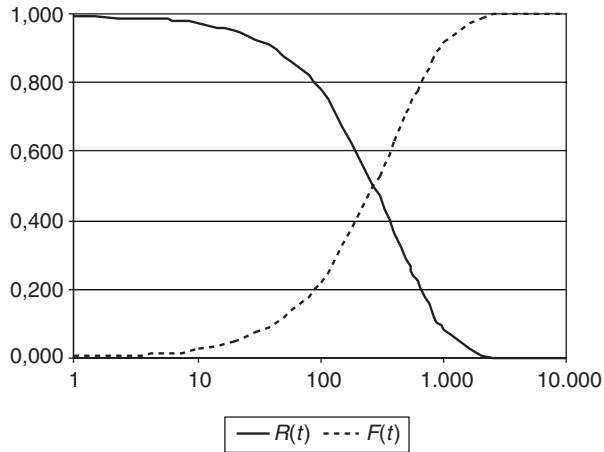


Figura 1.1. Variació de les funcions $R(t)$ i $F(t)$ al llarg del temps.

De les equacions [1.2] se'n dedueixen les següents:

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

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

La funció $f(t)$ representa la probabilitat que un equip que estava en funcionament en l'instant inicial $t = 0$ falli en l'interval de temps $(t, t + dt)$. La variació d'aquesta funció al llarg del temps té una forma similar a la indicada a la Figura 1.2, on $F(t)$ representa l'àrea sota la corba en l'interval $(0, t)$, mentre que $R(t)$ es correspon amb l'àrea sota la corba de $f(t)$ en l'interval (t, ∞) .

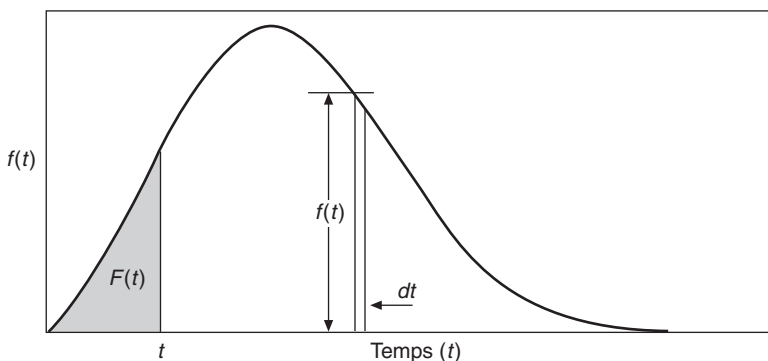


Figura 1.2. Representació de la funció de densitat de probabilitat de fallada.

La relació entre $f(t)$ i $R(t)$ és una nova funció, $\lambda(t)$, coneguda com a *taxa de fallada*, la qual es defineix com la probabilitat que un equip que arriba a l' instant t en perfecte funcionament falli en l'interval $(t, t + dt)$:

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

Exemple 1.1: Si tenim 50 components que funcionen en l' instant inicial i al cap de 100 hores només en funcionen 45, podem estimar la fiabilitat en aquest instant mitjançant la relació:

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

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

Si, a més, sabem que 90 hores més tard només funcionen 35 components, podem calcular la densitat de probabilitat de fallada $f(t)$ de la manera següent:

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

I així mateix, la taxa de fallada:

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

Es pot verificar que:

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

que confirma el valor trobat inicialment.

De l'equació [1.4] es dedueix 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 qual, en integrar els dos termes entre 0 i t , s'obté la *relació fonamental de la fiabilitat*:

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

Si es coneix l'expressió matemàtica de la funció $f(t)$, podem calcular la mitjana dels seus valors mitjançant l'expressió:

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

que en manteniment es coneix com la *mitjana dels temps fins a la fallada* o $MTTF^2$ i que se sol emprar com una mesura senzilla de la fiabilitat de l'equip. Així mateix, podem calcular la dispersió dels valors de la funció $f(t)$ respecte del valor mitjà (coneguda com a *variància*³) mitjançant l'expressió:

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

En la pràctica, *mitjana* i *variància* (o *desviació tipus*) són els paràmetres que serveixen per caracteritzar la distribució de la funció de densitat de la probabilitat de fallada $f(t)$.

1.1.1. Concepte físic de fiabilitat

De manera general, podem admetre que qualsevol component està definit per la seva resistència R i sol suportar una càrrega C quan està en funcionament. En la pràctica, no obstant això, els valors reals de R per a un mateix tipus de component se solen agrupar al voltant d'un valor mitjà R_m ; així mateix, la càrrega aplicada tampoc sol ser constant en el temps, sinó que varia al voltant d'un valor mitjà C_m .

Si les distribucions de R i C estan completament separades i no hi ha interferència entre elles (Figura 1.3) el component no fallarà, però si les distribucions esmentades se solapen (Figura 1.4) la fallada pot tenir lloc quan la càrrega real aplicada a un component superi la seva resistència.

Si la distribució de R està definida pel parell de valors (R_m, σ_R) i la distribució de C per (C_m, σ_C) , el *marge de seguretat* MS es pot obtenir del quocient:

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

a partir del qual es pot calcular la fiabilitat del component mitjançant l'expressió⁴:

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

que es representa gràficament a la Figura 1.5 per a valors de $MS \geq 0$, calculada a partir de la Taula 5 de l'Annex.

² En rigor, l' $MTTF$ només és aplicable per als components no reparables; quan un equip és reparable, es parla de *mitjana dels temps entre fallades* o $MTBF$; no obstant això, al llarg del text empremem habitualment els dos conceptes de manera indistinta.

³ Si σ^2 es denomina *variància*, σ es coneix com a *desviació tipus* o *desviació estàndard*.

⁴ Això només és estrictament cert si la resistència i la càrrega estan distribuïdes segons la *lleï normal* sobre la qual es parlarà en el Capítol 7.

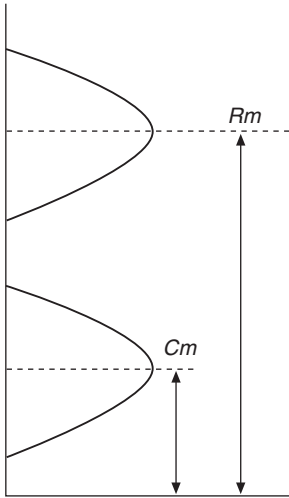


Figura 1.3. Les distribucions dels valors de la resistència i de la càrrega estan completament separades

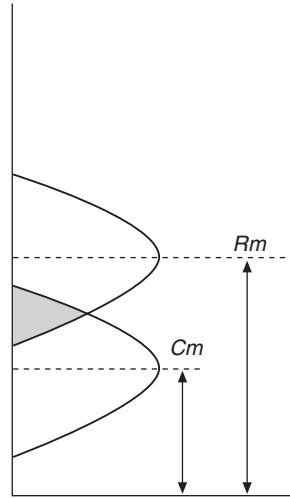


Figura 1.4. Les distribucions dels valors de la resistència i de la càrrega s'arriben a solapar

Exemple 1.2: Suposem que un component té una resistència mitjana de $60,0 \text{ kg/cm}^2$ i una desviació típica de $3,0 \text{ kg/cm}^2$ i està sotmès a una càrrega de $46,0 \text{ kg/cm}^2$ de valor mitjà i $5,5 \text{ kg/cm}^2$ de desviació típica. Determinem-ne el marge de seguretat i la fiabilitat associada.

D'acord amb el que hem vist anteriorment, serà:

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

i de la Figura 1.5 (o de la Taula 5 de l'Annex) obtindrem que la fiabilitat del component serà del 98,75% (o $0,5 + 0,4875 = 0,9875$).

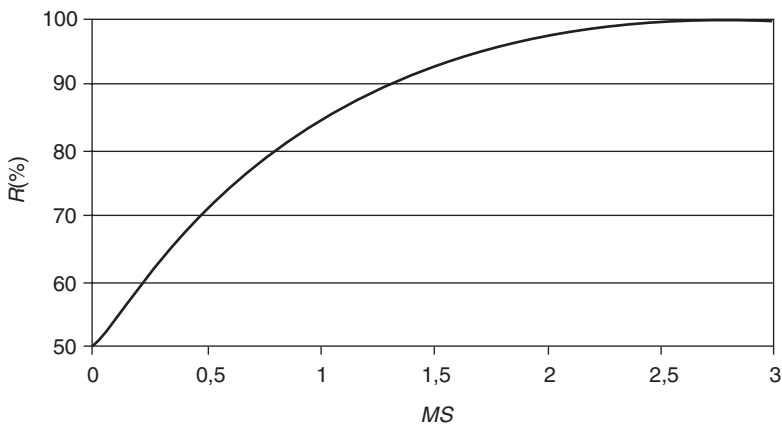


Figura 1.5. Valors de la fiabilitat R d'un component en funció del marge de seguretat MS .

De vegades la resistència del component no es manté constant al llarg del temps, com sol ser el cas dels components sotmesos a esforços de fatiga en els quals l'aparició d'una esquerda i el seu desenvolupament posterior acaba reduint la superfície útil de treball del component fins que aquest no pot suportar la càrrega total aplicada, de manera que es produeix la ruptura. En aquest cas, si es coneixen els paràmetres de desenvolupament de l'esquerda i la secció mínima a la qual es produeix la ruptura, podem determinar el temps que falta fins que es produeixi la fallada del component, tal com es mostra a l'Exemple 1.3.

Exemple 1.3: És sabut que els carrils d'una via s'esquerden a causa dels esforços derivats del pas dels trens. La secció que ocupa una esquerda amb relació a la secció del cap del carril segueix la llei següent [Alias (1987)]:

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

amb una desviació tipus de:

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

on:

S_0 = és el percentatge de la secció de l'esquerda en el moment inicial.

S_T = és el percentatge de la secció de l'esquerda després de suportar la via el pas de T milions de tones.

Se sap, a més, que en el moment de la ruptura del carril és:

$$S_R = 0,57$$

$$\sigma_R = 0,18$$

Si en l'instant inicial S_0 val 0,15 es vol conèixer amb un nivell de confiança del 95% el temps que transcorrerà fins a la ruptura d'un carril que suporta el pas de 90.278 tones/dia.

El càlcul de MS és:

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

ja que podem admetre per al segon terme de l'arrel quadrada la simplificació següent:

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

Si el nivell de confiança és del 95%, llavors $R(MS) = 95\% = 0,95$, i de la Figura 1.5 o de la Taula 5 de l'Annex es pot obtenir que $MS = 1,650$; per tant,

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

que resolent dóna una valor per a T de 4,99 milions de tones, i el nombre de dies fins a la ruptura s'obté del quocient:

$$\text{Dies fins a la ruptura} = \frac{4,99 \cdot 10^6}{90.278} = 55$$

1.2. DEFINICIÓ I TIPUS DE FALLADA

Es defineix *fallada* com el cessament de la capacitat d'un element per realitzar la funció requerida. Les fallades es poden classificar d'acord amb la seva *criticitat* o la seva *natura*.

El concepte de *criticitat d'una fallada* està relacionat amb la gravetat de les conseqüències que pot provocar. Si només tenim en compte l'impacte en el servei, les fallades es poden classificar en *significatives*, *importants* i *menors*, les definicions de les quals apareixen a la Taula 1.1.

En el cas d'un servei metropolità, si s'adopta, per exemple, que el període especificat és de 3 minuts, una *fallada significativa* és la que impedeix el moviment del tren o la que fa que la seva recuperació provoqui un retard en el servei superior als 3 minuts; el valor mitjà d'aquestes fallades permet obtenir la *fiabilitat en servei* dels trens. Una *fallada important* és la que provoca un retard inferior als 3 minuts, encara que finalment el tren hagi de ser retirat del servei en el moment oportú i sense més interferències; el valor mitjà d'aquestes fallades permet conèixer la *fiabilitat del parc de trens* pròpiament dita. Finalment, una fallada menor és qualsevol altra fallada que no estigui prevista en els dos casos anteriors.

En el cas de les instal·lacions d'una estació, el període especificat pot ser més llarg si hi ha solucions alternatives, com passa amb les instal·lacions d'accés, amb les màquines de venda de bitllets o fins i tot amb les escales mecàniques, per a les quals se sol adoptar el període de 24 hores.

Si a més dels danys a l'equip es tenen en compte els *danys produïts en les persones i en el medi ambient*, les fallades es poden classificar en quatre nivells, tal com es mostra a la Taula 1.2. Cal establir quantitativament què s'entén per important, apreciable i negligible, per reduir al màxim la subjectivitat a l'hora de qualificar la fallada.

Taula 1.1. Categories de fallades segons el seu impacte sobre la disponibilitat del servei [adaptat d'UNE-EN 50.126 (2005)]

CATEGORIA DE FALLADA	DEFINICIÓ
SIGNIFICATIVA	Fallada que impedeix la prestació del servei o que provoca un retard en el servei superior al període especificat.
IMPORTANT	Fallada que ha de ser corregida perquè l'equip assoleixi el rendiment especificat però que no provoca un retard superior a l'especificat per a la fallada significativa.
MENOR	Fallada que no impedeix que l'equip assoleixi el rendiment especificat i que no compleix els criteris per ser considerada fallada significativa o important.

Taula 1.2. Nivells de gravetat de les fallades quan es consideren els danys a l'equip i la seva repercussió en les persones i el medi ambient [adaptat d'UNE-EN 50.126 (2005) i 20.812 (1995)]

CATEGORIA DE FALLADA	FUNCIO	EQUIP	AMBIENT	PERSONES
CATASTRÒFICA	Pèrdua d'una funció essencial	Produeix danys importants		Pot causar mort o danys corporals
CRÍTICA				Presenta riscos negligibles de mort o de danys personals
NO CRÍTICA	Funcionament degradat	No causa danys apreciables		No representa danys importants
MENOR		Causa danys negligibles		No presenta risc de danys

D'acord amb la seva *natura*, les fallades poden ser *evidents* o *ocultes* per a l'operador. Una fallada és *evident* quan produeix un efecte en el sistema; per exemple, una bomba de buidatge, si falla, fa pujar el nivell d'aigua, fet que es pot detectar mitjançant un mecanisme de control; així mateix, si el compressor d'un tren s'avaïria es redueix la pressió d'aire i el tren frena al cap de poc temps. Per contra, es diu que una fallada és *oculta* quan requereix un esdeveniment posterior per ser detectada, fet que sol ser habitual en els sistemes de control o de detecció (d'incendis, per exemple) i en els sistemes formats per dos equips, un d'ells en actiu i l'altre en repòs fins que el primer falla (és el cas de les bombes de buidatge, per exemple). En els dos casos, cal un esdeveniment previ (l'incendi o la fallada de la bomba principal) per confirmar que s'ha produït una fallada al sistema de detecció o a la bomba de seguretat; de manera similar, l'obturació del radiador de refrigeració d'un compressor només es pot detectar quan el compressor deixa de funcionar per sobreescalfament.

1.2.1. Causes de les fallades

El concepte físic de fiabilitat explicat a l'apartat 1.1.1 permet afirmar que les fallades es poden deure a una resistència inadequada del component, a una sobrecàrrega aplicada sobre aquest o a totes dues coses alhora.

Una *resistència inadequada* significa que el component no és apte per realitzar les funcions previstes a causa d'un disseny deficient (per exemple, targetes que no suporten les elevades temperatures de l'ambient en què treballen), d'un muntatge

defectuós o d'un manteniment inadequat (per exemple, pel fet de no greixar amb la periodicitat establerta o no incorporar la quantitat de greix exigida).

La *sobrecàrrega* es pot produir ocasionalment o constantment al llarg del temps i pot tenir un caràcter intencionat o casual. Un exemple de sobrecàrrega ocasional és el que té lloc quan es connecta involuntàriament un aparell de 24 V a la xarxa de 220 V; un exemple de sobrecàrrega ocasional intencionada és el que es produeix en els motors elèctrics d'una locomotora quan el maquinista injecta sorra a les rodes per evitar-ne el patinatge continuat en condicions de poca adherència de la via. Finalment, un exemple de sobrecàrrega constant no intencionada és el que es produeix quan s'augmenta la càrrega transportada d'una locomotora per solucionar un coll d'ampolla però que després roman indefinidament o per un període llarg per oblit del personal de programació.

De vegades, encara que la resistència inicial sigui l'adequada, les condicions de treball a què se sotmet el component produeixen una *disminució progressiva de la seva resistència al llarg del temps* fins a arribar a ser inferior a la càrrega aplicada; és el cas dels materials sotmesos a fatiga, desgast o corrosió, per exemple. També pot passar que l'*acció combinada de diverses càrregues* pugui provocar una debilitació de la resistència del component; un exemple és el fenomen de fluència que es produeix en els materials sotmesos a altes temperatures i esforços de tracció com el dels discos o les sabates de fre d'un tren per la seva acció continuada en pendents prolongats⁵.

1.3. MESURA DE LA FIABILITAT QUAN LA TAXA DE FALLADA ÉS CONSTANT

L'equació [1.6] permet conèixer la fiabilitat quan se sap la variació de la taxa de fallada amb el temps; la solució serà específica per a cada tipus de funció de $\lambda(t)$ i no és possible establir criteris generals.

No obstant això, quan la taxa de fallada és constant i independent del temps, és a dir, quan:

$$\lambda(t) = \text{constant} = \lambda$$

l'equació [1.6] és de fàcil solució, igual que la resta de les funcions descrites a l'apartat 1.1, ja que:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad [1.11]$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad [1.12]$$

⁵ Sobre alguns aspectes d'aquest tema en tornarem a parlar en els Capítols 7 i 9.