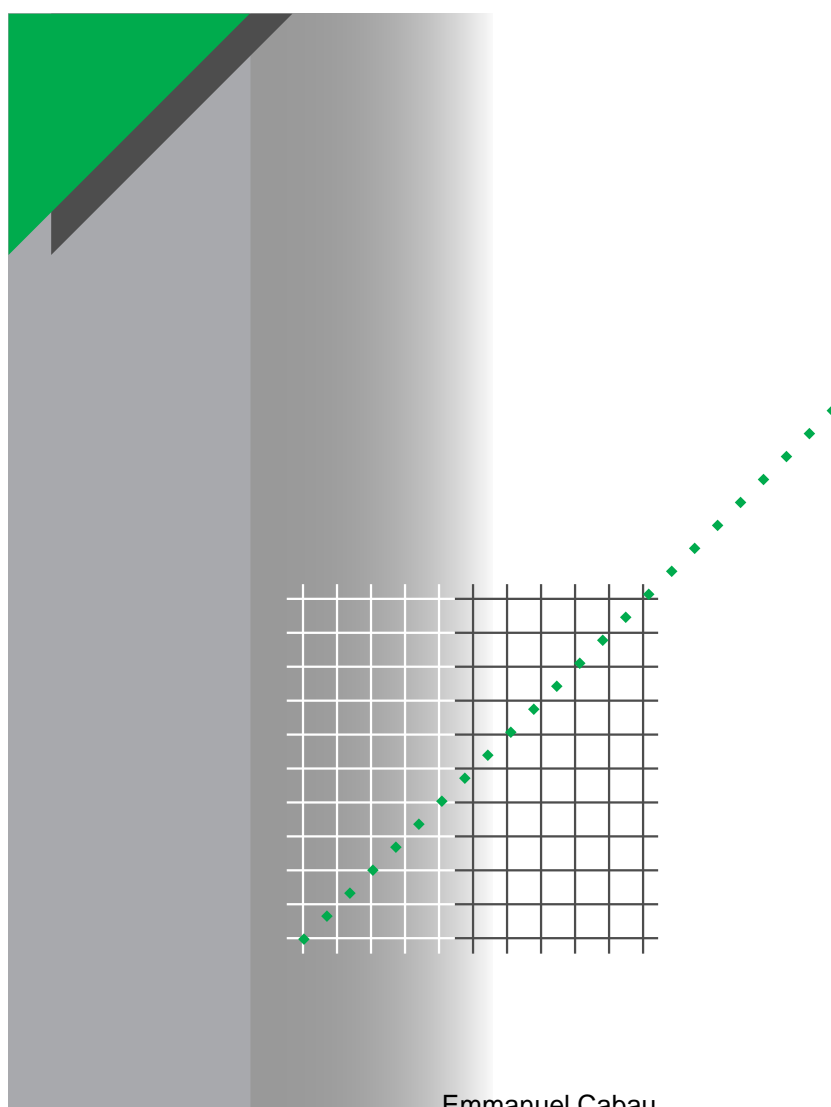


Cuaderno Técnico nº 144

Introducción a la concepción de la garantía de funcionamiento



Emmanuel Cabau

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 144 de **Schneider Electric**».

Cuaderno Técnico nº 144

Introducción a la concepción de la garantía de funcionamiento



Emmanuel CABAU

Ingeniero ENSIMAG 1989 (INPG, Grenoble), incorporado en Schneider Electric en 1990.

Se especializó primeramente en el ámbito de los programas de experimentación y técnicas estadísticas diversas, más tarde en la Dirección Científica y Técnica y previa una formación inicial en informática, participa en el desarrollo de una herramienta lógica para chequeo de instalaciones eléctricas para Schneider Services.

En 1998, asume las competencias unificadas de los estudios de seguridad de funcionamiento, con un equipo especializado en el estudio de fiabilidad de productos y procesos de Schneider Electric, básicamente en los campos: mando y control de centrales nucleares, instalaciones eléctricas, aparataje de corte, sistema de automatismos de distribución, etc.

Trad.: M. Pla

Original francés: junio 1999

Versión española: mayo 2000

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique



Terminología

Componentes electrónicos: Expresión utilizada en este texto (equivalente a la expresión francesa «logiciels»), que comprende los elementos constitutivos de un equipo electrónico: racks y tarjetas, circuitos impresos, elementos y conjuntos electrónicos.

Fiabilidad: es la probabilidad de que una entidad pueda cumplir una función requerida, en las condiciones determinadas, durante un intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$; y se expresa por: $R(t_1, t_2)$. Esta definición, corresponde a la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional), norma 191 de junio 1988.

■ Función: corresponde a la finalidad atribuida a un sistema.

■ Condiciones: define el medio y los métodos de utilización.

Tasa de fallo $\lambda(t)$: La tasa de fallo en el instante t , mide la probabilidad que ocurra un suceso intempestivamente en el intervalo $[t, t+\Delta t]$. Representa el número de sucesos (fallos) por unidad de tiempo. Su inverso es el tiempo medio entre fallos.

Disponibilidad: La disponibilidad es la probabilidad que una entidad pueda cumplir una función requerida, en las condiciones determinadas, en un instante dado t , suponiendo que el suministro de los medios externos necesarios está asegurado. Se representa por: $D(t)$. Esta definición de la CEI es igual a la de la fiabilidad pero con la diferencia fundamental en el aspecto temporal, una se refiere a un período de tiempo y la otra a un instante dado.

Mantenimiento: Actuaciones -procesos y operaciones- tendentes a la conservación de una entidad o sistema.

Mantenibilidad: La mantenibilidad es la probabilidad de que una operación dada de mantenimiento pueda ser realizada en un intervalo tiempo dado $[t_1, t_2]$, que se expresa por: $M(t_1, t_2)$. Esta definición es igualmente extraída del vocabulario internacional, normalizado por la CEI. Ha establecido que la mantenibilidad es a la reparación como la fiabilidad es al fallo.

Seguridad: La seguridad es la probabilidad de evitar un suceso peligroso. Se distingue entre las averías peligrosas y las que no lo son. La diferencia no proviene de la naturaleza de la avería sino de sus consecuencias. La noción de

seguridad está estrechamente ligada al riesgo que de ella misma depende, no solamente de la probabilidad de que ocurra, pero sí de la gravedad del hecho.

Tasa de reparación $\mu(t)$: La tasa de reparación en el instante t , mide la probabilidad que una entidad sea reparada en el intervalo $[t, t+\Delta t]$, n° de reparaciones por unidad de tiempo. Puesto que es constante, la expresión de la mantenibilidad es una ley exponencial: $M(t) = \exp(-\mu t)$. Su inverso es el tiempo medio por reparación.

Garantía de funcionamiento: (Dependability) Concepto dependiente de cuatro magnitudes interrelacionadas:

– Fiabilidad: probabilidad que el sistema no se averíe durante $[0, t]$.

– Mantenibilidad: probabilidad que el sistema sea reparado durante $[0, t]$.

– Disponibilidad: probabilidad que el sistema funcione en el instante t .

– Seguridad: probabilidad de evitar un suceso catastrófico.

Se designa con las iniciales de las cuatro magnitudes FMDS. La correspondencia con respecto a la terminología española, francesa e inglesa es la siguiente:

■ Fiabilidad - Fiabilité - Reliability,

■ Mantenibilidad - Maintenabilité - Maintainability,

■ Disponibilidad - Disponibilité - Availability,

■ Seguridad - Sécurité - Safety,

■ Garantía de funcionamiento - Sûreté de fonctionnement - Dependability.

MTTF o MTFF (Mean Time To First Failure): Tiempo medio de buen funcionamiento antes del primer fallo.

MTBF (Mean Time Between Failure): Tiempo medio entre dos fallos de un sistema reparable.

MDT (Mean Down Time): Tiempo medio del fallo, comprendiendo la detección de la avería, el tiempo de intervención, el tiempo de reparación y el tiempo de puesta en servicio.

MTTR (Mean Time To Repair): Tiempo medio de reparación.

Mortalidad Infantil: Es la tasa de fallo observada en el periodo inicial de vida de un componente, llamado tiempo de rodaje.

Introducción a la concepción de la garantía de funcionamiento

La avería en un equipo, el corte del servicio de energía, el paro en un proceso automático o el accidente son cada vez menos tolerados o aceptados, tanto por los industriales como por la población usuaria.

La garantía de funcionamiento que se expresa en términos de fiabilidad, de mantenibilidad, de disponibilidad y de seguridad es también una ciencia que ningún diseñador de producto o de instalación puede ignorar.

Este Cuaderno Técnico recoge la presentación de las nociones básicas y una exposición de los métodos de cálculo.

La ilustración con algunos ejemplos y valores numéricos permiten realizar una contraprestación a la estricta formulación y a la utilización subyacente de numerosas herramientas informáticas.

1 La importancia de la garantía de funcionamiento	1.1 En el sector urbano	p. 6
	1.2 En el sector terciario	p. 6
	1.3 En la industria	p. 6
2 Los parámetros de la garantía de funcionamiento	2.1 Fiabilidad	p. 7
	2.2 Tasa de fallo	p. 7
	2.3 Disponibilidad	p. 8
	2.4 Mantenibilidad	p. 9
	2.5 Seguridad	p. 9
3 Relaciones entre las magnitudes de la garantía de funcionamiento	3.1 Las magnitudes interactivas	p. 10
	3.2 Magnitudes que pueden contraponerse	p. 10
	3.3 Las magnitudes en función del tiempo medio	p. 11
4 Los tipos de defecto		p. 13
5 Del componente al sistema: la modelización	5.1 Las bases de datos sobre los componentes de los sistemas	p. 15
	5.2 El método APR	p. 17
	5.3 El método AMDEC	p. 18
	5.4 Los diagramas de fiabilidad	p. 19
	5.5 Los árboles de fallo	p. 21
	5.6 Los gráficos de estado	p. 25
	5.7 Las redes de Pétri	p. 26
	5.8 Elección de una técnica de modelización	p. 27
6 Mantenimiento y logística: cada vez más complejidad...	6.1 Optimización del Mantenimiento por la Fiabilidad (O.M.F.)	p. 28
	6.2 Solución Logística Integrada (S.L.I.)	p. 28
7 Conclusión		p. 29
Bibliografía y normas		p. 30

1 La importancia de la garantía de funcionamiento

El hombre primitivo dependía de su fuerza muscular. El hombre moderno está rodeado de útiles y de sistemas altamente sofisticados,

debiendo dominar aquellos que inciden realmente en su seguridad, eficacia y confort.

1.1 En el sector urbano

El ciudadano, en su vida cotidiana, está muy interesado por:

- la fiabilidad de su televisor,
- la disponibilidad de la electricidad,

- las posibilidades de reparación de su congelador o coche,
- la seguridad de su caldera de gas.

1.2 En el sector terciario

Las entidades bancarias y todo el sector terciario dan mucha importancia a:

- la fiabilidad de la informática,
- la disponibilidad de la calefacción,

- la posibilidad de reparación de los ascensores,
- la seguridad contra incendios.

1.3 En la industria

El industrial que quiere ser competitivo, no puede admitir pérdidas de producción, tanto más cuanto sean más importantes y complejos sus procesos de fabricación; su misión es buscar lo mejor en:

- fiabilidad de sus procesos de su control y mando,
- disponibilidad de sus máquinas,
- mantenimiento de las herramientas de producción,
- seguridad de las personas y del activo industrial.

Estos valores que se agrupan bajo el concepto de garantía de funcionamiento, se relacionan directamente con la noción de confianza. Este

concepto se cuantifica en términos de objetividad, se calcula en términos de probabilidad, se elabora en términos de arquitectura y la elección de componentes. se verifica con ensayos o por la experiencia.

Schneider Electric ha incorporado el concepto de garantía de funcionamiento desde mucho tiempo. Esto es así, que entre otros y después de 30 años, los productos Merlin Gerin han contribuido: por ejemplo, en el pasado reciente, a la concepción de centrales nucleares, o a la excepcional disponibilidad de la energía eléctrica en la base de lanzamiento de cohetes ARIANE, y hoy en día en la concepción de productos y sistemas destinados a cualquier sector de la actividad productiva.

2 Los parámetros de la garantía de funcionamiento

2.1 Fiabilidad

La bombilla es útil, tanto al ciudadano particular, al industrial, como a las entidades bancarias. Mientras se alumbran todos ven luz, puesto que disponen de ella.

La fiabilidad es la probabilidad que la bombilla esté en estado de funcionar en el instante (t), ella mide la aptitud de estar en un estado de funcionamiento correcto.

Definición: La fiabilidad es la probabilidad de que una entidad pueda cumplir una función requerida, en las condiciones determinadas, durante un intervalo de tiempo $[t_1, t_2]$; y se expresa por: $R(t_1, t_2)$.

Esta definición, corresponde a la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional), norma 191 de junio 1988.

Algunas nociones son fundamentales en esta definición:

■ **Función:** la fiabilidad es característica de la función atribuida a un sistema. El conocimiento de su arquitectura material es a menudo insuficiente y se deben utilizar métodos de análisis funcional.

■ **Condiciones:** el rol del medio ambiente es primordial en la fiabilidad, también hace falta conocer las condiciones de utilización. El conocimiento del material no es suficiente.

■ **Intervalo:** uno se interesa por una duración considerable y no por un instante. Por hipótesis el sistema funciona en el instante inicial, el problema es saber por cuanto tiempo. En general $t_1 = 0$ y se expresa la fiabilidad por $R(t)$.

2.2 Tasa de fallo

Conservamos el ejemplo de la bombilla. Su tasa de fallo en el instante t, se expresa $\lambda(t)$, mide la probabilidad que esta se funda intempestivamente en el intervalo $[t, t+\Delta t]$ sabiendo que ella se mantiene encendida justo hasta el instante t. La tasa de fallo, es un valor horario, que es proporcional al inverso del tiempo.

Su representación matemática es la siguiente:

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \right) \\ &= \frac{-1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (1)\end{aligned}$$

Así, por ejemplo, la tasa de fallo que mide la probabilidad para una persona de 20 años de morir durante la siguiente hora es:

$$\lambda_{(20 \text{ años})} = 10^{-6} \text{ por hora.}$$

Si representamos λ en función de la edad, obtenemos entonces una curva representada en la **figura 1**.

En primer término los elevados valores corresponden a la mortalidad infantil, después el valor de λ corresponde a los valores de la edad adulta, durante la cual permanece constante,

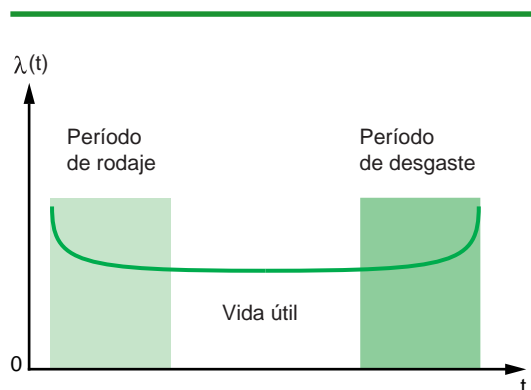


Fig. 1: Curva de bañera.

puesto que las causas de fallecimiento son, sobretodo, accidentales y no función de la edad. A partir de los 60 años, por el hecho de envejecer, λ aumenta. La experiencia nos muestra que para los componentes electrónicos, la curva obtenida es del mismo aspecto, cambiando la terminología: período de rodaje, vida útil y período de decadencia.

Durante el período de la vida útil la tasa λ es constante y la ecuación (1) nos da:

$R(t) = \exp(-\lambda t)$. Esta función se llama **exponencial**, la curva de fiabilidad es función del tiempo, en este caso corresponde a la de la **figura 2**.

La ley exponencial es una de las leyes posibles. Los dispositivos mecánicos sometidos, desde su

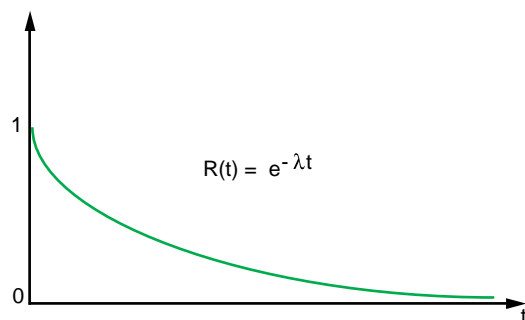


Fig. 2: Curva de fiabilidad exponencial.

inicio de funcionamiento al desgaste, pueden seguir otra ley, por ejemplo la ley de Weibull, en la que la tasa de fallo es función del tiempo. Si trazamos la curva de λ en función del tiempo, obtenemos entonces una curva, **figura 3**, que difiere de la representada en la **figura 1**.

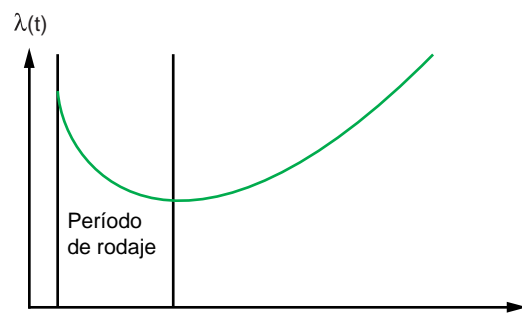


Fig. 3: Curva de fiabilidad con desgaste.

2.3 Disponibilidad

La noción de disponibilidad se ilustra muy bien con el símil de un vehículo. Un coche debe funcionar al instante de su necesidad, su historia importa poco. La disponibilidad mide esta aptitud de funcionar en un instante dado.

Definición: La disponibilidad es la probabilidad que una entidad pueda cumplir una función requerida, en las condiciones determinadas, en un instante dado t , suponiendo que el suministro de los medios externos necesarios está asegurado. Se representa por: $D(t)$.

Esta definición de la CEI es igual a la de la fiabilidad pero con la diferencia fundamental en el aspecto temporal, una se refiere a un período de tiempo y la otra a un instante dado.

En un sistema reparable, el funcionamiento al instante t no supone, forzosamente el funcionamiento durante $[0, t]$. Esta es la diferencia fundamental con respecto a la fiabilidad.

Podemos trazar la curva de la disponibilidad en función del tiempo, de un elemento reparable con las funciones exponenciales para los desfallos y las reparaciones (**figura 4**).

Podemos constatar que la disponibilidad tiende a un valor límite, que es por definición la disponibilidad asintótica. Este valor límite es una punta de tiempo que corresponde aproximadamente, al tiempo de reparación. La fiabilidad tiene siempre un límite, puesto que los

sistemas no son eternos. (Este último, punto puede ser constatado con programas lógicos - ordenadores).

Volvemos sobre el ejemplo del coche. Dos tipos de vehículos llevan problemas de disponibilidad: los que están a menudo en avería y los que raramente tienen averías, pero pasan largos tiempos en los garajes antes de ser reparados. La fiabilidad participa entonces en la disponibilidad por la aptitud a ser reparado rápidamente, esto es también importante, es la mantenibilidad.

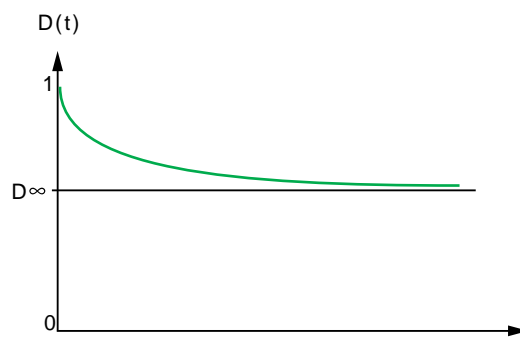


Fig. 4: Disponibilidad en función del tiempo.

2.4 Mantenibilidad

Los proyectistas buscan siempre las máximas prestaciones de sus productos y olvidan a menudo la hipótesis de la avería. Es difícil, cuando uno trabaja para que el sistema funcione, el preguntarse qué sucederá en caso de avería. Por tanto esta interrogación es indispensable. Para que un sistema esté disponible, se ha de averiar lo más raramente posible, pero también es importante que pueda ser reparado rápidamente. Se entiende por reparación todo el proceso hasta su puesta en servicio, incluyendo las demoras logísticas. La aptitud de un sistema en ser reparado se mide por la mantenibilidad.

Definición: La mantenibilidad es la probabilidad de que una operación dada de mantenimiento pueda ser realizada en un intervalo tiempo dado $[t_1, t_2]$, que se expresa por: $M(t_1, t_2)$. Esta definición es igualmente extraída del vocabulario internacional, normalizado por la CEI. Ha establecido que la mantenibilidad es a la reparación como la fiabilidad es al fallo. Hemos definido con las mismas hipótesis que para $R(t)$ la mantenibilidad $M(t)$.

La tasa de reparación $\mu(t)$ es introducida de forma similar a la tasa de fallo -ver el apartado 2.2, ecuación (1). Puesto que este es constante, la ley es exponencial y resulta la expresión: $M(t) = \exp(-\mu t)$.

2.5 Seguridad

Se distingue entre las averías peligrosas y las que no lo son. La diferencia no proviene de la naturaleza de la avería sino de sus consecuencias. El hecho de apagar todos los semáforos en una estación o de pasar intempestivamente del verde a rojo afecta al funcionamiento (paro de los trenes) pero no es directamente peligroso. Es completamente diferente del caso pasar del rojo al verde.

La seguridad es la probabilidad de evitar un suceso peligroso.

La noción de seguridad está estrechamente ligada al riesgo que de ella misma depende, no solamente de la probabilidad de que ocurra, pero sí de la gravedad del hecho. Uno puede arriesgar su vida si la probabilidad de que ocurra es muy pequeña. Si el riesgo es únicamente el de romperse una pierna, se puede aceptar una probabilidad más grande. La curva de la **figura 5** ilustra el concepto de riesgo aceptable.

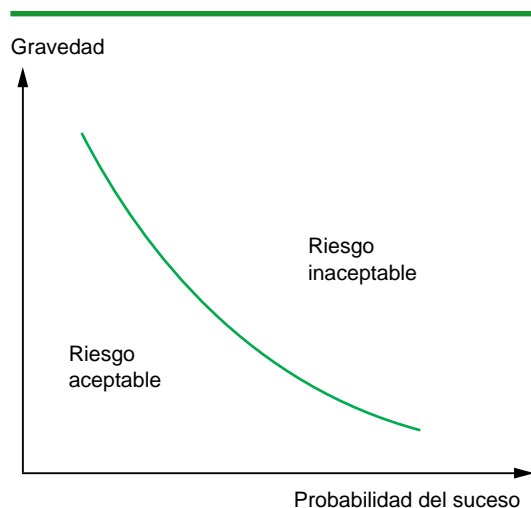


Fig. 5: El nivel de riesgo es función del par: gravedad, probabilidad del suceso.

3 Relaciones entre las magnitudes de la garantía de funcionamiento

3.1 Las magnitudes interactivas

A través de algunos ejemplos veremos que la GARANTIA DE FUNCIONAMIENTO es un concepto que se basa en 4 magnitudes cuantificables que están interrelacionadas entre sí (figura 6).

Estas cuatro magnitudes hay que tenerlas en cuenta en todos los estudios de garantía de funcionamiento.

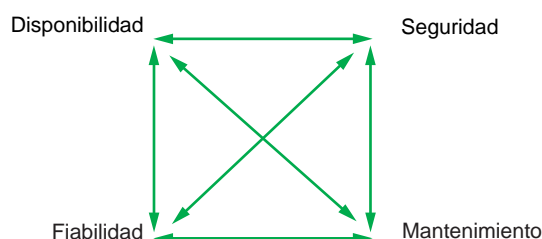


Fig. 6: Los componentes de la garantía de funcionamiento.

En algunos casos se designa la garantía de funcionamiento, con las iniciales de las cuatro magnitudes FMDS:

- **Fiabilidad:** probabilidad que el sistema no se averíe durante $[0,t]$,
- **Mantenibilidad:** probabilidad que el sistema sea reparado durante $[0,t]$,
- **Disponibilidad:** probabilidad que el sistema funcione en el instante t ,
- **Seguridad:** probabilidad de evitar un suceso catastrófico.

La correspondencia con respecto la terminología española, francesa e inglesa es la siguiente:

- **Fiabilidad** - Fiabilité - Reliability,
- **Mantenibilidad** - Maintenabilité - Maintainability,
- **Disponibilidad** - Disponibilité - Availability,
- **Seguridad** - Sécurité - Safety,
- **Garantía de funcionamiento** - Sûreté de fonctionnement - Dependability.

3.2 Magnitudes que pueden contraponerse

Ciertas magnitudes características de la seguridad pueden ser contradictorias.

La mejora de la mantenibilidad puede conllevar decisiones que degraden la fiabilidad (por ejemplo la incorporación de componentes para facilitar el montaje y desmontaje). La disponibilidad es pues un compromiso entre la fiabilidad y la mantenibilidad; un estudio de seguridad permite valorar este compromiso.

Por lo mismo, la seguridad y la disponibilidad, pueden ser contradictorias.

Hemos visto que la seguridad es la probabilidad de evitar un suceso peligroso, ella tiene generalmente su máximo cuando el sistema está inutilizado, y es entonces cuando la disponibilidad es nula: este es el caso cuando se corta una calle por riesgos de hundimientos. A la inversa para mejorar la disponibilidad de sus aparatos ciertas compañías aéreas pueden estar tentadas a descuidar el mantenimiento preventivo, disminuyendo la seguridad de vuelo.

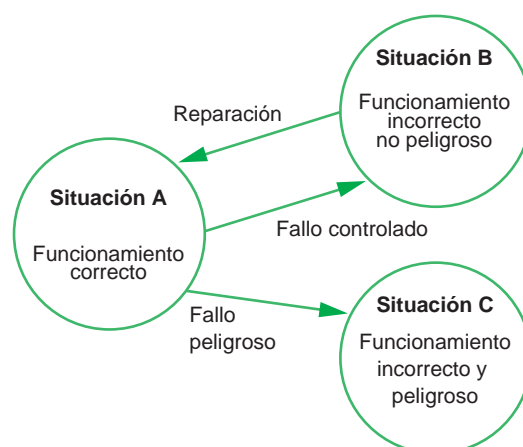


Fig. 7: Fallo controlado: disponibilidad! Fallo peligroso: seguridad!

La elección de un sistema ha de permitir el equilibrio óptimo entre la seguridad y la disponibilidad, estableciendo el cálculo y sus magnitudes.

Un sistema puede situarse en tres estados, (figura 7). Además del funcionamiento normal, se consideran dos estados de avería: uno en fallo peligroso y otro no. Con espíritu de simplificación, agrupamos los estados de avería incluyendo todos los estados degradados de funcionamiento, usando la designación de "funcionamiento incorrecto".

El tiempo de permanencia en el estado A es la característica de la fiabilidad. El tiempo transcurrido en el estado B, después de una avería no peligrosa es característica de la mantenibilidad.

La aptitud de un sistema de no pasar por el estado C es característica de la seguridad. Se constata que el estado B es una situación con más seguridad; pero es también es fuente de indisponibilidad.

3.3 Las magnitudes en función del tiempo medio

Además de las probabilidades de ocurrencia de los sucesos (fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, seguridad), las circunstancias descritas anteriormente, hacen aconsejable introducir también, como característica de seguridad, los tiempos medios entre los sucesos.

Los tiempos medios

Es útil recordar las definiciones precisas de todos los tiempos medios, puesto que habitualmente son mal utilizados. El peor utilizado es el más común, el MTBF, que es a menudo considerado como una duración de vida. En efecto para una punta de tiempo igual a MTBF, si las leyes exponenciales, y por una población homogénea, cerca de 2/3 de los dispositivos, de media, desfallecen. Si ellos

actúan en un sistema, con buena suerte están en un 63 % de tener una avería. Las definiciones y los posicionamientos de estos tiempos medios situados en el curso de la vida de un sistema son relacionados en la figura 8.

MTTF o MTFF (Mean Time To First Failure). tiempo medio de buen funcionamiento antes del primer fallo.

MTBF (Mean Time Between Failure): Tiempo medio entre dos fallos de un sistema reparable.

MDT (Mean Down Time): tiempo medio del fallo, comprendiendo la detección de la avería, el tiempo de intervención, el tiempo de reparación y el tiempo de puesta en servicio.

MTTR (Mean Time To Repair) tiempo medio de reparación.

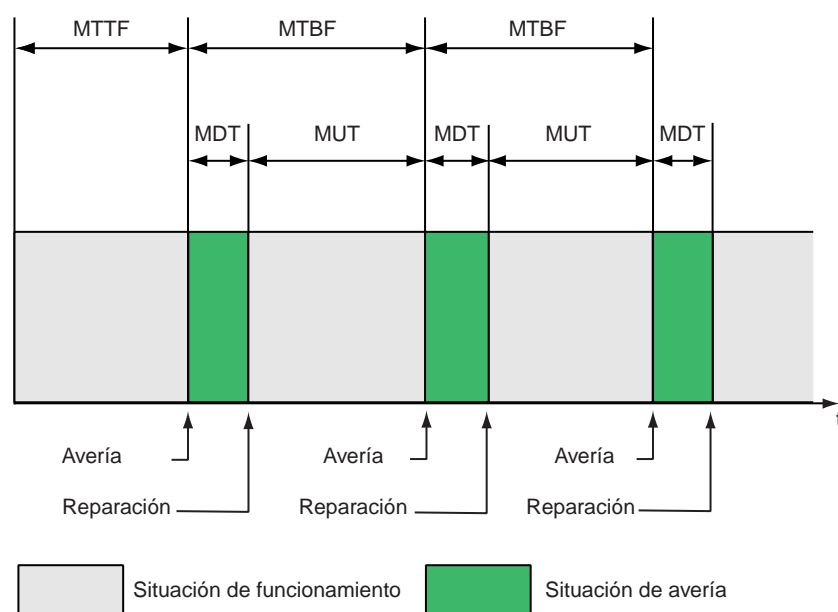


Fig. 8: Diagrama de tiempos medios de un sistema que no precisa interrupción del funcionamiento para el mantenimiento preventivo.

MUT (Mean Up Time): tiempo medio de buen funcionamiento después de una reparación.

Algunas relaciones y valores numéricos

Existen numerosas leyes entre las magnitudes reseñadas.

Para una ley exponencial $R(t) = \exp(-\lambda t)$, resulta un $MTTF = 1/\lambda$; o por un sistema no reparable $MTBF = MTTF$ (donde todas las averías son las primeras averías). Es este caso es de aplicación la fórmula clásica, ampliamente utilizada, para los componentes electrónicos (no reparables): $MTBF = 1/\lambda$.

Esta fórmula para leyes exponenciales, únicamente es aplicable, de manera estricta, para un componente no reparable (puede hacerse la salvedad de esta última hipótesis si el MDT es suficientemente bajo).

Puesto que el tiempo de reparación, a menudo también es una ley exponencial como muestra el mismo $MTTR = 1/\mu$,

entonces, $MTBF = MUT + MDT$. En general $MDT = MTTR$ pero a veces hace falta ajustar los intervalos logísticos o de arranque.

Además:

■ Disponibilidad asintótica

$$D_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} D(t) = \frac{MUT}{MDT + MUT} = \frac{MUT}{MTBF}$$

Esta fórmula ilustra la interpretación de la disponibilidad expresada en el **apartado 2.3** (ratio de tiempo de buen funcionamiento con relación al tiempo total). Este valor ($MUT/MTBF$) corresponde a la asíntota de la **figura 4**.

■ Indisponibilidad asintótica = 1 – disponibilidad asintótica

$$ID_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} (1 - D(t)) = \frac{MDT}{MDT + MUT} = \frac{MDT}{MTBF}$$

La indisponibilidad asintótica es en general más fácil de expresar numéricamente que la disponibilidad (se expresa más fácilmente 10^{-6} , que 0,999999).

Para las leyes exponenciales con las relaciones $MUT = 1/\lambda$ y $MDT = 1/\mu$ se llega a:

$$ID_{\infty} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad \text{ó} \quad D_{\infty} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

λ es a menudo despreciable frente μ , puesto que el tiempo de reparación es pequeño comparado con el tiempo medio precedente a la avería. Podemos simplificar el denominador y obtendremos:

$$ID_{\infty} = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot MTTR$$

Esta última fórmula valora, en el caso de leyes exponenciales, el compromiso de fiabilidad-mantenibilidad que permite obtener la mayor disponibilidad.

La tabla adjunta (**figura 9**), da un orden de magnitud de las tasas de fallo y de tiempos medios, antes de la primera avería, para un cierto número de componentes electrónicos y electrotécnicos.

Se constata que la fiabilidad se degrada cuando la complejidad aumenta. Ello responde a una regla básica de la concepción de la seguridad: "hacer lo más simple que sea posible". La noción de tiempo medio es a menudo mal comprendida. Las dos frases siguientes significan una misma cosa en el caso de las leyes exponenciales:

"El MTTF vale 100 años" y "la probabilidad en 100 años de producirse una avería al primer año". Esta segunda expresión inquieta más al industrial que vende 10 000 aparatos de este tipo cada año. Una media de un centenar de aparatos le caerán en avería el primer año.

Para la indisponibilidad se puede citar como ejemplo la red eléctrica estatal. Nos interesa una presencia de la energía eléctrica, conforme a las necesidades de los consumidores. La indisponibilidad es del orden de 10^{-3} que corresponde a una media de 9 horas de avería por año. Para una sala de informática, enteramente protegida por un montaje de sistemas de alimentación redundantes, se puede aplicar una disponibilidad de 1 000 ó 10 000 veces mejor.

	Resistencias	Micro procesador	Fusible y interruptor de alta intensidad, transformadores cables (100 m), jdb (10 conexiones)	Generador	Cortes breves del suministro de la Compañía
λ (/h)	10^{-9}	10^{-6}	de 10^{-7} a 10^{-6}	10^{-5}	10^{-3}
MTTF	1 000 ciclos	100 años	de 100 a 1 000 años	10 años	40 días

Fig. 9: Tasa de fallo y de MTTF de algunos elementos.

4 Los tipos de defecto

La elaboración de un sistema cuyo objetivo sea la garantía de funcionamiento, para ser satisfactorio, necesita identificar y tomar en consideración las causas posibles de los fallos. Se propone la siguiente clasificación:

Los defectos físicos. Averías

Las averías pueden ser inducidas por causas internas (rotura de un elemento) o externas (interferencias electromagnéticas, vibraciones,...)

Los fallos de diseño

Que reagrupan principalmente los errores de concepción material y los errores logísticos.

Los defectos de explotación

Que engloban los defectos generados por una mala utilización:

- material o componente empleado en un entorno para el cual no ha sido diseñado,
- error humano en la utilización del material, o consecuencia de una incorrecta operación de mantenimiento,
- sabotaje.

Las técnicas desarrolladas en este documento, toman en consideración, prioritariamente, los defectos físicos.

No obstante, el problema de los errores humanos y de los fallos logísticos no se deben menospreciar, en especial cuando los conocimientos, en estos campos, sean menos precisos que los aplicados a los defectos físicos.

Tomaremos en consideración, en este Cuaderno Técnico, los elementos de reflexión siguientes:

En materia de componentes electrónicos

- Los componentes electrónicos, debido a su complejidad, ignoran el fenómeno de envejecimiento, lo que hace necesario de validar su concepción con una gestión de garantía de funcionamiento.
- Esta gestión debe extenderse, desde la fase de diseño a la de ejecución.
- La primera etapa de la gestión puede corresponder al Análisis de los Efectos de los Errores de componentes (logiciel) (AEEL), que identifica las partes críticas y preconiza las acciones en diseño o en implantación. Frecuentemente este análisis resulta muy laborioso para ser tratado con todo detalle.

■ En la fase de diseño son utilizados los estudios especializados en electrónica adaptados a la garantía (en Schneider Electric: LUSTRE y SCADE, por ejemplo) y las técnicas de redundancia (varias versiones de un mismo circuito desarrollado independientemente).

■ En la ejecución son empleadas las técnicas de inspección formal y del ensayo de características.

■ Cuantificar de manera exacta la fiabilidad de un ordenador resulta difícil. Los mejores resultados se obtienen aplicando a su entorno operativo (software, métodos) estudios preliminares precisos. Este es el caso de Schneider Electric, por ejemplo, aplicando: SPIN (Sistema Integral de Protección Numérica), en el diseño de circuitos que rigen las centrales nucleares.

Existe un grupo de trabajo en el ámbito europeo, sobre la garantía de funcionamiento en circuitos electrónicos, donde participa Schneider Electric.

La fiabilidad humana

El aspecto cualitativo prevalece en este campo.

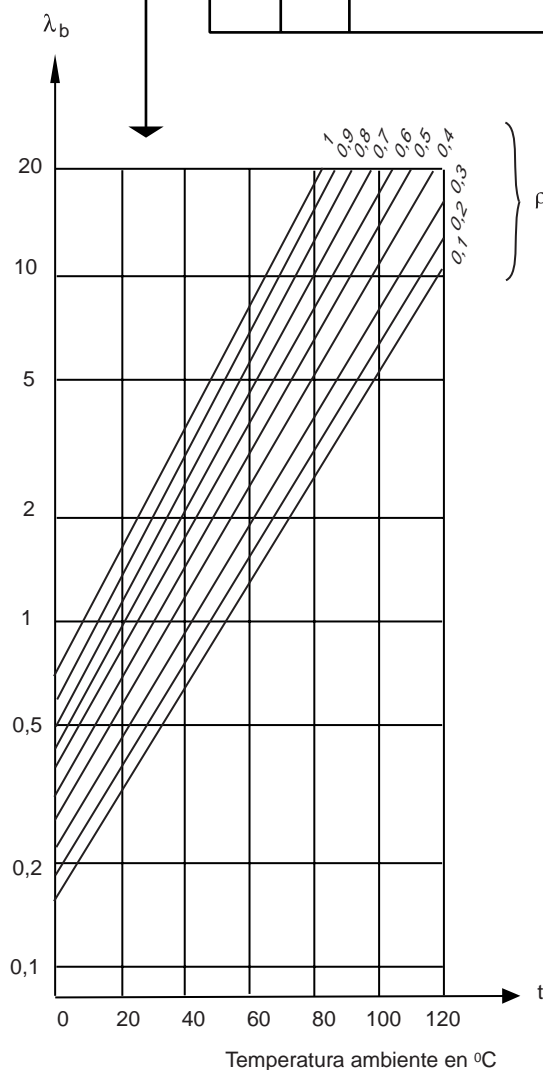
El esfuerzo prevalece en la esquematización de la operativa humana y sobre la clasificación de sus tareas y de sus errores. Los estudios más adelantados son los realizados en el campo nuclear. El comportamiento del operador es observado a la vez por dos simuladores y contrastados con la experiencia, las dos fuentes pueden ser confrontadas.

La literatura americana ha suministrado para sí misma valores numéricos que son utilizados con precaución: según el tipo de acción correspondiente a (máquinas, procesos, cognoscitivo) donde evalúa la probabilidad de error.

Los advenimientos actuales en particular las grandes catástrofes, muestran que los errores humanos son una causa esencial, no solamente a nivel del operador sino también a nivel del diseñador. Pero la libertad de acción del hombre es grande y los riesgos encontrados son importantes. El accidente de la lanzadera americana en 1987 muestra que la misma gestión del proyecto puede ser la causa: ¡Esta se remonta hasta los diseñadores de la lanzadera! Las competencias múltiples son necesarias para abordar los problemas de la fiabilidad humana, en particular la psicología y la ergonomía.

RESISTENCIAS FIJAS ACUMULADAS

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_R \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot 10^{-9} / h$$



λ_b en función de la temperatura ambiente t y del factor de carga ρ

CCTU 04 01 A
modelo RA

MIL - R - 11 (RC)
MIL - R - 39 008 (RCR)

Informaciones necesarias

Temperatura ambiente	t	
Disipación efectiva	ρ	π_R π_E π_Q
Disipación nominal		
Valor de la resistencia	R	
Entorno		
Clase de calificación		

Factor de carga ρ

$$\rho = \frac{\text{Disipación efectiva}}{\text{Disipación nominal}}$$

Clases de Certificado de calificación

	π_Q
Documento de Aceptación (PTT,...) con CCQ	0,5
Documento de Aceptación (PTT,...) sin CCQ	1,0
Certificado de Calidad CCQ de uso restringido	1,0
Certificado de Calidad CCQ de uso general	2,5
Homologación	2,5
Calificación por un cliente	5,0
Sin calificación (producto corriente)	7,5

Entorno

	π_E
En el suelo (condiciones favorables)	1
En el suelo (material fijo)	2,9
En el suelo (material móvil)	8,3
Satélite en órbita	1
Misil (lanzamiento)	29,0
Avión de transporte (zonas habitadas)	2,8
Avión de transporte (zonas no habitadas)	5,7
Avión de combate (zonas habitadas)	5,7
Avión de combate (zonas no habitadas)	11,0
Barco (zonas protegidas)	5,2
Barco (zonas no protegidas)	12,0

Valor de la resistencia

	π_R
$R \leq 100 \text{ k } \Omega$	1
$0,1 \text{ M } \Omega < R \leq 1 \text{ M } \Omega$	1,1
$1 \text{ M } \Omega < R \leq 10 \text{ M } \Omega$	1,6
$R > 10 \text{ M } \Omega$	2,5

Distribución de los fallos

Cortocircuitos	0 %
Circuito abierto	100 %

Modelo matemático

$$\lambda_b = 9 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\left[12 \left(\frac{t+273}{343} \right) + \left(\frac{\rho}{0,6} \right) \left(\frac{t+273}{273} \right) \right]}$$

Fig. 10: Ejemplo de una hoja de cálculo extraída de los cuadernos CNET.

5 Del componente al sistema: la modelización

5.1 Las bases de datos sobre los componentes de los sistemas

Corrientemente se utilizan las bases de datos descritas a continuación, pero es preferible, cuando ello sea posible de recoger los datos de los resultados de las experiencias obtenidas de los constructores de los componentes utilizados. Estos datos resultan difíciles de obtener, puesto que los constructores o no se esfuerzan en recógelos de forma sistemática, o bien, si lo hacen los conservan confidencialmente.

En electrónica

En este campo la fiabilidad es muy practicada después de numerosos años. Las dos bases de datos más utilizadas son las americanas Military Handbook 217 (F, párrafo 2), y las del tratado de fiabilidad, francés, del Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET) (figura 10), en el que Schneider Electric participa en su actualización.

Estas tablas permiten calcular la tasa de fallo, supuesto constante, de un componente en función de las características de aplicación, (entorno o tasa de carga por ejemplo), y de las del tipo concreto de componente, (número de puertas, valor de la resistencia).

Tomamos por ejemplo una resistencia de 50 k Ω sobre una tarjeta electrónica situada en un cuadro eléctrico.

Aplicamos las tablas (figura 10), para determinar los diferentes factores correctivos.

El entorno es «Fijo al suelo (material fijo)», el factor multiplicador con relación al entorno es pues:

$$\Pi_E = 2,9.$$

Para el valor de resistencia dado le corresponde un factor multiplicador:

$$\Pi_R = 1.$$

La resistencia no tiene calificación específica, lo que da el factor multiplicador relativo al factor de calidad:

$$\Pi_Q = 7,5.$$

El factor de carga ρ es característico de la aplicación, contrariamente a otros factores que son característicos del componente. Si el factor de carga es 0,7 y la temperatura ambiental

reseñada es de 90°C. El ábaco nos determina $\lambda_b = 15$.

Se obtiene entonces la tasa de fallo de la resistencia por el producto:

$$\lambda = \lambda_b \cdot \Pi_R \Pi_E \Pi_Q 10^{-9} = 0,33 \cdot 10^{-6}.$$

Si el proyecto se realiza integrando el objetivo de fiabilidad:

- los intercambios térmicos mejor estudiados permiten reducir la temperatura ambiente,

- una mejor concepción de la tarjeta electrónica permite disminuir el factor de carga ρ .

Con: $t = 60^\circ\text{C}$ y $\rho = 0,2$ el ábaco da $\lambda_b = 1,7$.

Si tomamos una componente homologada:

$\Pi_Q = 2,5$ obtenemos entonces: $\lambda = 0,012 \cdot 10^{-6}$ obteniendo una ganancia del factor de 30.

Conociendo la fiabilidad de la carga del componente se obtiene fácilmente la fiabilidad del conjunto de la tarjeta (las cuales son reparables o reemplazables), ya que en los sistemas electrónicos se aplican los métodos modulares descritos en este capítulo.

Observaciones importantes:

- El ejemplo descrito es puramente ilustrativo con el fin de mostrar el proceso de cálculo en electrónica. Los valores numéricos y los parámetros utilizados están en constante evolución y se actualizan regularmente.

- Esto es por otra parte, el motivo por el cual desde hace algunos años, los cálculos se efectúan con herramientas informáticas. El más conocido es RELEX que reúne, a partir de 1999, las dos bases de datos del Military Handbook y del CNET.

En electrotecnia y en mecánica

Las bases de datos existentes en electrotecnia y mecánica son menos conocidas que los electrónicos, entre ellas algunas son muy utilizados.

Podemos citar:

- RAC NPRD 3: rapport de Reliability Analysis Center, organismo militar americano, concerniente a los componentes y dispositivos no electrónicos.

■ IEEE STD 493: manual de datos de fiabilidad observados y concernientes a los equipos eléctricos en instalaciones eléctricas industriales.

■ IEEE STD 500: manual de datos de fiabilidad observados y concernientes a los equipos eléctricos, electrónicos y mecánicos instalados en centrales nucleares.

Utilizamos también obras de referencia que contienen los métodos de cálculo y los datos propios de ciertas especialidades. Por ejemplo la obra de Cl. Marcovici y J. Cl. Ligeron: «Utilización de técnicas de fiabilidad en mecánica».

A título de ejemplo, la **figura 11** da un extracto del RAC NPRD97 concerniente a los interruptores automáticos. Donde se representa una distribución de las diferentes formas de fallo, se observa por ejemplo, que el 34% de los fallos constatados, se producen en el cierre. La tabla de dicha figura da una estimación del valor de la tasa de fallo (valor estimado) correspondiente a la función calorífica (térmica) de los interruptores automáticos.

Podemos observar sucesivamente:

■ el entorno: siendo GF = Ground Fixed = situado en suelo industrial,

■ estimación de la tasa de fallo: se tiene $0,335 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$,

■ los extremos de un intervalo de confianza tal que la probabilidad que la tasa de fallo se encuentra en 0,6 (es decir entre 0,8 - 0,2),

■ el número de tomas utilizadas para el cálculo: 2,

■ el número de fallos observados: 3,

■ el número de horas de funcionamiento observadas: $8,944 \cdot 10^6$ horas.

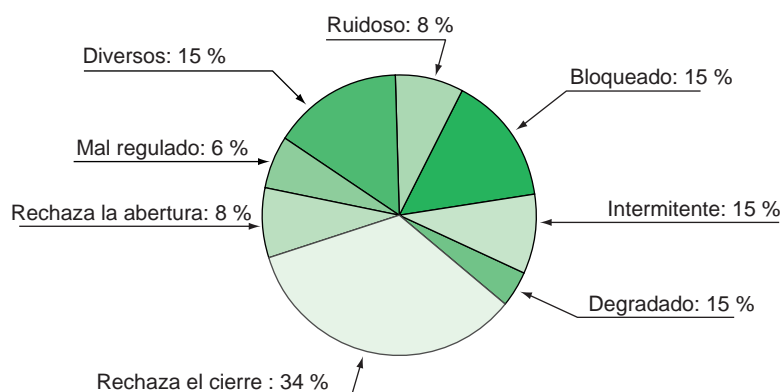
El conocimiento de las tasas de fallo globales y del reparto en módulos de fallo permite cifrar la probabilidad de diferentes sucesos con una simple operación.

Por ejemplo, para el modulo de fallo: «rechazo al cierre», se obtiene:

$$0,335 \cdot 10^{-6} \frac{34}{100} = 1,17 \cdot 10^{-7}$$

Otra aproximación es a veces más conveniente: considerar el número de maniobras en lugar de considerar el tiempo de funcionamiento. En este caso un test llevado sobre unas muestras de varias decenas de productos permite cifrar la fiabilidad (ley de Weibull).

La elección depende del tipo de fallo que uno desea estudiar, el desgaste de los contactos está unido al número de maniobras, lo mismo que la corrosión esta unida al tiempo. El tipo de utilización y las condiciones ambientales son siempre determinantes.



Parte del componente	Entorno	Código	Tasa de fallo estimado	Intervalo de confianza			% de muestras	% de fallos	Tiempo operativo en $h \cdot 10^6$
				Zona central 60 %	Zona inferior al 20%	Zona superior al 80%			
Térmica	GF	M	0,335	-	0,171	0,621	2	3	8,944

Fig. 11: Formas de fallo y datos de fiabilidad de los interruptores automáticos.

5.2 El método APR

Un APR es un Análisis Preliminar de los Riesgos que tiene por objeto identificar los peligros en una instalación industrial y sus causas (ejemplos: elementos peligrosos, situaciones de peligro, accidentes potenciales). Puede evaluar,

al mismo tiempo, la gravedad de las consecuencias derivadas de las situaciones peligrosas y de los accidentes potenciales.

Se realiza en las primeras fases del proyecto y se actualiza a medida que se desarrolla el

Funciones	Equipos considerados	Sucesos causantes de una situación grave	Situación grave	Sucesos causantes de un accidente grave	Accidente grave	Consecuencias graves	Observaciones
a							
Apertura del interruptor automático	Dialpact Interruptor automático Tarjetas electrónicas Red	Uno de los equipos falla	No abre el interruptor automático	Solicitud de apertura del interruptor automático	No para el proceso No descarga	Sobretarificación Deterioro del proceso de producción	Consecuencias derivadas del interruptor automático
			Disparo intempestivo del interruptor automático		Parada del proceso. Corte de la alimentación eléctrica	Deterioro del proceso de producción Energía no disponible	Consecuencias derivadas del interruptor automático
Cierre del interruptor automático	Dialpact Interruptor automático Tarjetas electrónicas Red	Uno de los equipos falla	No cierra el interruptor automático	Solicitud de cierre del interruptor automático	No se respeta el proceso Imposibilidad de recarga		Consecuencias derivadas del interruptor automático
			Cierre intempestivo del interruptor automático		No se respeta el proceso Sobreconsumo que supone el arranque del GE	Sobretarificación	Consecuencias derivadas del interruptor automático
b							
Transmisión de la información por un Dialpact	Dialpact Interruptor automático Tarjetas electrónicas Red	Uno de los equipos falla	Información errónea del captador: Tª indicada inferior al umbral	Sobre-consumo eléctrico del cuadro	Incendio del cuadro	Destrucción del cuadro y paro de sus servicios	
Caso directo	Dialpact Interruptor automático Tarjetas electrónicas Red	Uno de los equipos falla	Información errónea del captador: Tª indicada inferior al umbral	Sobre-consumo eléctrico del cuadro	Incendio del cuadro	Destrucción del cuadro y paro de sus servicios	
Transmisión de la información por un Dialpact	Dialpact Interruptor automático Tarjetas electrónicas Red	Uno de los equipos falla	Información errónea del captador: Tª indicada inferior al umbral			Petición de descarga inútil	Sobre-consumición sospechosa
Caso directo	Dialpact Interruptor automático Tarjetas electrónicas Red	Uno de los equipos falla	Información errónea del captador: Tª indicada inferior al umbral			Petición de descarga inútil	En este caso, la medida de la Tª es la que indica la sobre-consumición y no la medida de la corriente

Fig. 12: Ejemplo de una hoja de un APR para un Cuadro de BT en configuración «automática». Se presentan dos casos: a) el mando de los interruptores automáticos y b) el de medidas de temperatura.

proyecto, este análisis permite determinar todos los medios, todas las acciones correctivas tendientes a eliminar o a controlar las situaciones peligrosas y los accidentes potenciales.

Este método no se debe confundir con el método AMDEC, desarrollado a continuación, y que toma en consideración los modos de fallo de los elementos de un sistema. Como su nombre indica el APR es un preliminar que, partiendo del análisis funcional del sistema, presupone el fallo de cada elemento funcional (sin considerar del modo de fallo) y aplica las

consecuencias de cada fallo al general del sistema. El APR está, pues, particularmente indicado en el inicio del proyecto con el fin de evitar un peligro potencial importante.

En la tabla siguiente (**figura 12**) se encuentra un ejemplo de un APR, sin valores numéricos de la gravedad. Es un extracto de una APR realizada en un Cuadro de BT que dispone de un automatismo para detectar principalmente un sobreconsumo eléctrico en el Cuadro.

Para más detalles sobre el APR, consultar el capítulo 6 de la obra «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels» de A. Villemeur (Bibliografía).

5.3 El método AMDEC

AMDEC es un Análisis de Modos de Fallo, de sus Efectos y de su estado Crítico. Un modo de fallo es un efecto derivado de la observación del fallo de un elemento del sistema.

Esta definición de la CEI (publicación 812) muestra que el método se basa en la descomposición del sistema en elementos. La base de datos permite conocer el comportamiento de cada elemento. La arquitectura material y funcional del sistema permite inducir todos los efectos de cada uno de los modos de fallo de todos los elementos del sistema.

Incluimos en las AMDEC una evaluación del estado crítico de cada fallo (**figura 13**). Este estado crítico depende de dos factores: la probabilidad de que ocurra el fallo y la gravedad de las consecuencias.

Una AMDEC permite estudiar la influencia de los fallos de los componentes del sistema. El interés de este método esencialmente cualitativo, es la exhaustividad. Por el contrario, le falta para ser completo, el incorporar los efectos que se hayan manifestado, ello es el objeto de los métodos descritos a continuación en este mismo capítulo.

Elemento	Funciones	Modos de fallo	Causas	Efectos	Evaluación del estado crítico	Observac.
Interruptor automático	Interruptor	Rechazo de apertura	Contactos soldados	Defecto en el corte	2	
Interruptor automático	Interruptor	Rechazo de cierre	Mecánicas	Falta alimentación	2	
Interruptor automático	Protección contra cortocircuito	Rechazo apertura	Contactos soldados	Sin protección	4	
Interruptor automático	Paso de corriente	Apertura intempestiva	Reglaje defectuoso	Corte de alimentación	3	
Interruptor automático	Paso de corriente	Calentamiento	Contactos defectuosos	Deterioro de la electrónica	2	

Fig. 13: Ejemplo de una hoja AMDEC.

5.4 Los diagramas de fiabilidad

Los diagramas de fiabilidad son una forma muy simple de representar un conjunto de componentes no reparables. El cálculo de la fiabilidad del sistema así representado, es posible para las conexiones serie-paralelo, en redundancia K/N (N elementos/K elementos suficientes) y en puente. Su aplicación a los sistemas reparables es mucho menos sistemático.

Los sistemas serie-paralelo

Dos elementos se dice que están en serie si el funcionamiento de los dos es necesario para asegurar el funcionamiento del conjunto. Dos elementos se dice que están en paralelo si el funcionamiento, al menos, de uno de ellos es suficiente para asegurar el funcionamiento del conjunto (**figura 14**).

En el momento que dos elementos están situados en serie, el uno y el otro, deben funcionar; en consecuencia se debe, pues, multiplicar sus fiabilidades para obtener la fiabilidad del conjunto:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t).$$

En el momento que dos componentes están situados en paralelo se dice que el uno o el otro funciona. Es muy práctico de utilizar la fiabilidad en este caso. Para que el sistema esté en avería hace falta que el uno y el otro, o sea, ambos componentes estén averiados

$$1 - R(t) = [1 - R_1(t)][1 - R_2(t)]$$

Las dos formulas son pues:

■ En serie:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t)$$

■ En paralelo:

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)$$

En el caso del sistema en paralelo, 1 y 2 se dice que están en redundancia (**figura 14**). Esta redundancia se llama pasiva si el elemento 2 está en paro en tanto que el elemento 1 está funcionando. Este es el caso de un grupo eléctrico.

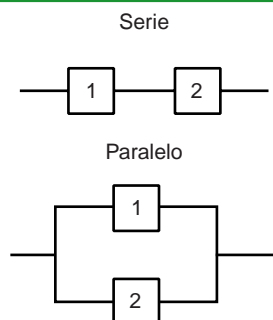


Fig. 14: Sistemas en serie y en paralelo.

Si 1 y 2 funcionan simultáneamente la redundancia se llama activa, esto es lo que suponemos aquí.

Para los componentes no reparables se calcula la fiabilidad del conjunto, sabiendo que las leyes aplicables a los dos componentes son exponenciales, se obtiene:

■ En serie:

$$R(t) = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]$$

R(t) sigue una ley exponencial:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

■ En paralelo:

$$R(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \exp(-\lambda_2 t) - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]$$

R(t) no sigue una ley exponencial.

La tasa de fallo no es constante.

Todas estas formulas se generalizan por asociación a un sistema de n componentes no reparables, en serie o en paralelo. Se pueden combinar ambas formulas.

Los sistemas de redundancia K/N

Un sistema compuesto por N elementos se dice que está en redundancia K/N si K elementos son suficientes para asegurar su función. La redundancia es generalmente presupuesta activa (**figura 15**).

Sea $R_i(t)$ la fiabilidad del elemento $n = i$ no reparables de un sistema. Un cálculo simple de la fiabilidad del conjunto puede realizarse con la búsqueda de las combinaciones favorables:

■ sistema 2/3

$$R = R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3 - 2R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$$

■ sistema serie (N/N)

$$R(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t)$$

Cuando k es pequeño es muy fácil de calcular $1 - R(t)$, por ejemplo:

■ sistema paralelo (1/N)

$$1 - R(t) = \prod_{i=1}^N [1 - R_i(t)]$$

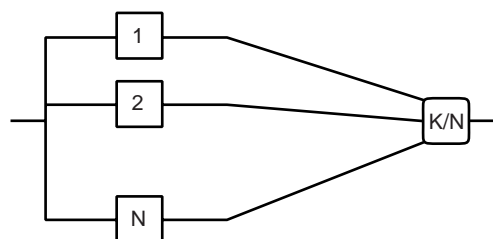


Fig. 15: Los sistemas redundantes K/N.

■ sistema (K/N)

En el caso que todas los N elementos sean idénticos, para toda i: $R_i(t) = r(t)$.

Se puede en este caso, calcular fácilmente la fiabilidad del conjunto por la fórmula

$$R(t) = \sum_{i=K}^N C_N^i r(t)^i [1-r(t)]^{N-i}$$

Los sistemas en (red) puente

Se denominan así los sistemas que no se ajustan a una combinación serie-paralelo. Podemos reducir estos sistemas, por iteración, al caso representado (figura 16).

Para calcular la fiabilidad de este sistema a partir de las de cinco componentes no reparables es necesario utilizar el teorema de las probabilidades condicionales:

$R = R_3.R$ (correspondiendo a 3 elementos en funcionamiento) + $(1 - R_3).R$ (correspondiendo a 3 elementos averiados).

Deducimos entonces $R(t)$ de los resultados del estudio de los dos diagramas de la figura 17.

Ejemplo: fiabilidad de un sistema de detección de intrusión

El sistema está constituido por dos captadores, un sensor de vibración y una célula fotoeléctrica, y dos alarmas, cada una unida a un único captador. La función del sistema es excitar una alarma en caso de intrusión, por activación de los captadores. La duración de misión se establece en tres meses, ésta es la duración máxima de una ausencia. Consideramos cada elemento como no reparable durante este periodo. El mantenimiento se realiza antes de cada ausencia y el sistema es considerado entonces como nuevo. El sistema se representa en el esquema de la figura 18.

El objetivo es valorar la mejora aportada en términos de fiabilidad con la utilización de un adaptador permanente a las dos alarmas para la recepción de la señal de los captadores. El sistema así constituido está representado en el esquema de la figura 19.

Los datos de fiabilidad: todos los componentes son no reparables y siguen una ley exponencial:

Sensor de vibración: $\lambda_1 = 2 \cdot 10^{-4}$

Célula fotoeléctrica: $\lambda_2 = 10^{-4}$

Adaptador: $\lambda_3 = 10^{-5}$

Alarmas: $\lambda_4 = \lambda_5 = 4 \cdot 10^{-4}$

■ Cálculo para el esquema A (figura 18)

A efectos de la fiabilidad, resultan dos cadenas en paralelo, cada una incorpora dos elementos en serie:

□ fiabilidad cadena 1: $R_1(t) \cdot R_4(t)$,

□ fiabilidad cadena 2: $R_2(t) \cdot R_5(t)$, resultando para el sistema: $R_A(t) = R_1(t).R_4(t) + R_2(t).R_5(t) - R_1(t).R_4(t).R_2(t).R_5(t)$.

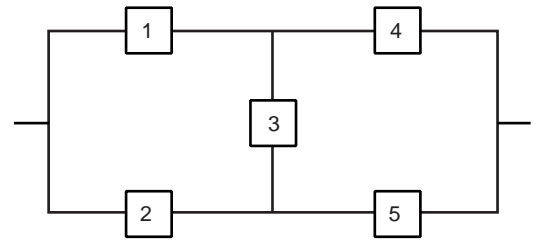


Fig. 16: Sistema en puente.

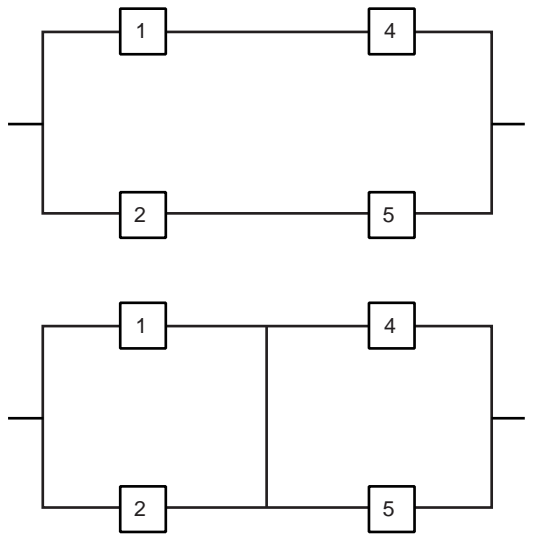


Fig. 17: Descomposición de un sistema en puente.

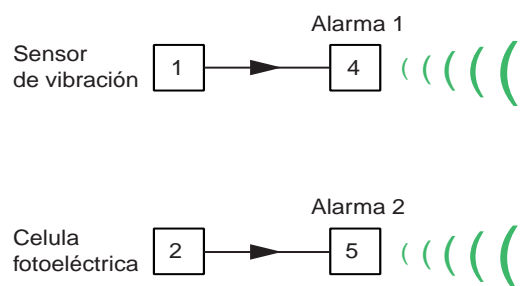


Fig. 18: Alarmas sin acoplarse: esquema A.

Si aplicamos $R_i(t) = \exp(-\lambda_i \cdot t)$ para $t = 3$ meses = 2 190 h, obtenemos: $R_A = 0,51$.

■ cálculo para el esquema B (figura 19)

Esta vez tenemos un esquema en (red) puente. Cuando el adaptador está averiado, tenemos el esquema de la figura 17. Puesto que están funcionando 1 y 2 en paralelo a la vez que están en serie con 4 y 5 que a su vez están en

paralelo. La fiabilidad del sistema aplicando el esquema de la **figura 17** es:

$$R_B = (1 - R_3) \cdot R + R_3 \cdot (R_1 + R_2 - R_1 \cdot R_2) \cdot (R_4 + R_5 - R_4 \cdot R_5)$$

Obtenemos esta vez: $R_B = 0,61$.

Comprobamos que la mejora es muy poco sensible, a pesar de que el adaptador sea excelente. La consideración de este ejemplo de cálculo nos permite jugar un poco en interés del coste de un sistema.

Caso de elementos reparables

En el caso de elementos reparables no podemos utilizar sistemáticamente los diagramas de fiabilidad:

- cuando dos elementos reparables 1 y 2 están en paralelo, la correlación de $R(t)$; $R_1(t)$ y $R_2(t)$ no son aplicables. En efecto, el funcionamiento del sistema sobre $[0, t]$, puede corresponder a un funcionamiento en alternancia entre 1 y 2. Con dos elementos no reparables, uno por lo menos debe funcionar sobre el conjunto del período $[0, t]$, en consecuencia pueden fallar los dos pero no el mismo tiempo,
- la relación $R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t)$ es cierta para dos elementos reparables en serie.
- para dos elementos reparables ésta es la valoración de la disponibilidad, que es la mayor solicitada. Utilizamos entonces el diagrama de la fiabilidad, y las mismas fórmulas que para el cálculo de la fiabilidad:

□ en serie:

$$D(t) = D_1(t) - D_2(t)$$

□ en paralelo:

$$D(t) = D_1(t) + D_2(t) - D_1(t) \cdot D_2(t)$$

NOTA: Estas fórmulas sólo son válidas para casos simples.

La relación $D(t) = D_1(t) + D_2(t) - D_1(t) \cdot D_2(t)$ no es muy válida si únicamente se dispone, por ejemplo, de un solo reparador. Este aspecto secuencial, espera la reparación de un elemento para reparar el siguiente, no puede ser modelizado por un simple diagrama. Los gráficos de estado (introducidos más adelante) son aplicados en estos casos.

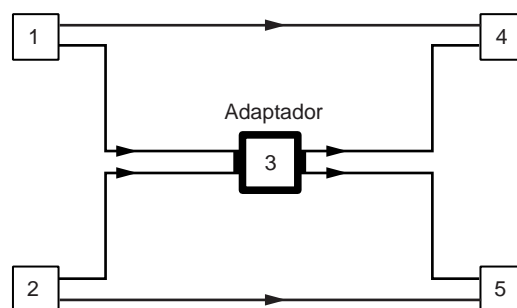


Fig. 19: Cadenas acopladas: esquema B.

5.5 Los árboles de fallo

Nos permiten calcular la probabilidad de «fallo» de un sistema, y consisten en una representación gráfica de la combinación de sucesos independientes, que son origen de la aparición de algún suceso indeseable o catastrófico.

A partir de estos árboles, salvo en los casos más simples, el cálculo de la probabilidad de un suceso se determina por medio de la informática científica y técnica; a continuación se reajusta, eventualmente, la concepción del sistema para disminuir la probabilidad de fallo.

Principio del método

La construcción del árbol se basa sobre el análisis del sistema y sobre la elección del suceso indeseado que uno desea estudiar. La primera: etapa es la búsqueda de causas inmediatas del suceso cumbre, después las "causas de las causas" inmediatas y así sucesivamente. A título de ejemplo, se representa un caso simple: el esquema en la **figura 20** y en la **figura 21** el árbol de fallo correspondiente.

Una sección es una combinación de sucesos elementales que conducen al suceso indeseable.

El análisis del árbol obtenido se descompone en dos fases:

■ **el análisis cualitativo:** permite obtener las secciones mínimas, es decir las combinaciones mínimas por inclusión que conducen al suceso indeseado. El orden de una sección es el número de sucesos elementales que la componen,

■ **el análisis cuantitativo:** se realiza a partir de secciones mínimas y de probabilidades de que ocurran los sucesos básicos. Se obtiene así una aproximación de la probabilidad de que ocurra el suceso cumbre. Es necesario asegurar sistemáticamente la validación de la aproximación. Según las probabilidades consideradas el árbol puede ser utilizado para estudiar la disponibilidad o la fiabilidad.

Dos ejemplos simples de cuantificación:

□ retroproyector con una lámpara instalada y una de recambio. El suceso no deseado es: la avería de la lámpara del proyector (**figura 22**).

Resultando dos casos sobre mil, la posibilidad de estar averiada la lámpara.

□ alimentación de una lámpara de 220 V. El suceso indeseado es: que la lámpara no alumbre (**figura 23**)

Se constata que la probabilidad de avería es entonces de 0,001. Un caso sobre mil de que la lámpara no alumbre. El suceso de que la «lámpara funda» es dominante.

Es posible efectuar un cálculo matemático exacto de la posibilidad de que ocurra. Se basa en un método recurrente sin utilizar las «secciones»: se aplican las formulas de cálculo de probabilidades para cada nudo a partir del cálculo realizado en las ramas incidentes por debajo.

La hipótesis de independencia de los sucesos debe ser verificada, aunque el cálculo sea exacto. Este cálculo exacto permite validar los cálculos aproximados, aunque esto, en la práctica, se realiza raramente: en general, las combinaciones resultantes de las secciones mínimos son unas probabilidades de sucesos muy débiles, pues están compuestas de múltiples sucesos elementales; haciendo esto frecuentemente inútil y costoso en tiempo el calcular estas probabilidades.

Aplicación del árbol de fallo con la utilización de secciones: disponibilidad de una red de distribución eléctrica BT

La **figura 25** representa el árbol de fallo elaborado para estudiar la disponibilidad de una parte de red de distribución de BT (**figura 24**). Nos interesa la disponibilidad de energía eléctrica, considerando únicamente dos niveles de energía: correcto (presencia de energía), fallo (ausencia de energía). El suceso cumbre

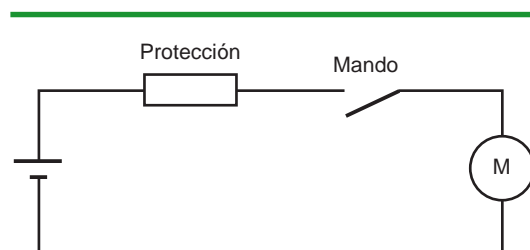


Fig. 20: Cadena de alimentación de un motor. El suceso indeseable es: el motor no arranca.

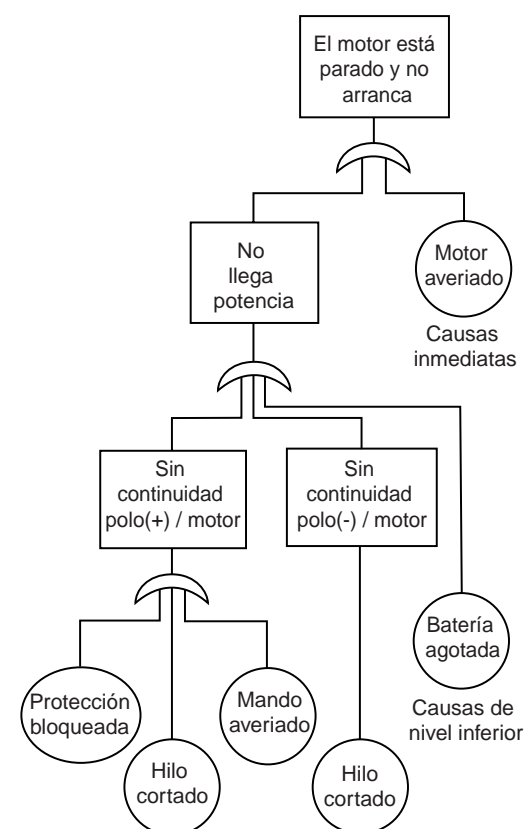


Fig. 21: Árbol de fallo correspondiente a la **figura 20**.

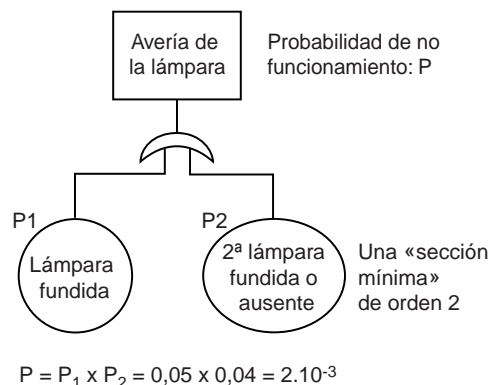


Fig. 22: Árbol de fallo de un retroproyector.

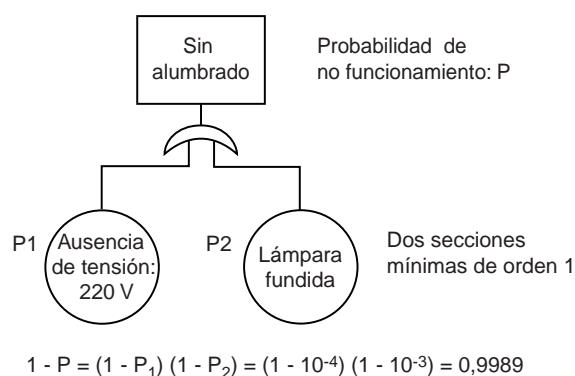


Fig. 23: Árbol de fallo de una lámpara.

no deseado es la ausencia de energía en el puesto designado E. La construcción del árbol (figura 25) corresponde a la aplicación de las siguientes hipótesis:

■ Consideramos únicamente 2 modos de fallo, para los interruptores automáticos: apertura intempestiva y rechazo de apertura en cortocircuito.

■ Cada ramal del transformador puede alimentar sólo el conjunto de la red principal de la cual la salida E forma parte.

■ Las dos entradas de Compañía suministradora se suponen de dos estaciones transformadoras diferentes.

Así reducimos el modo de fallo común a la indisponibilidad de AT en la Compañía. A cada

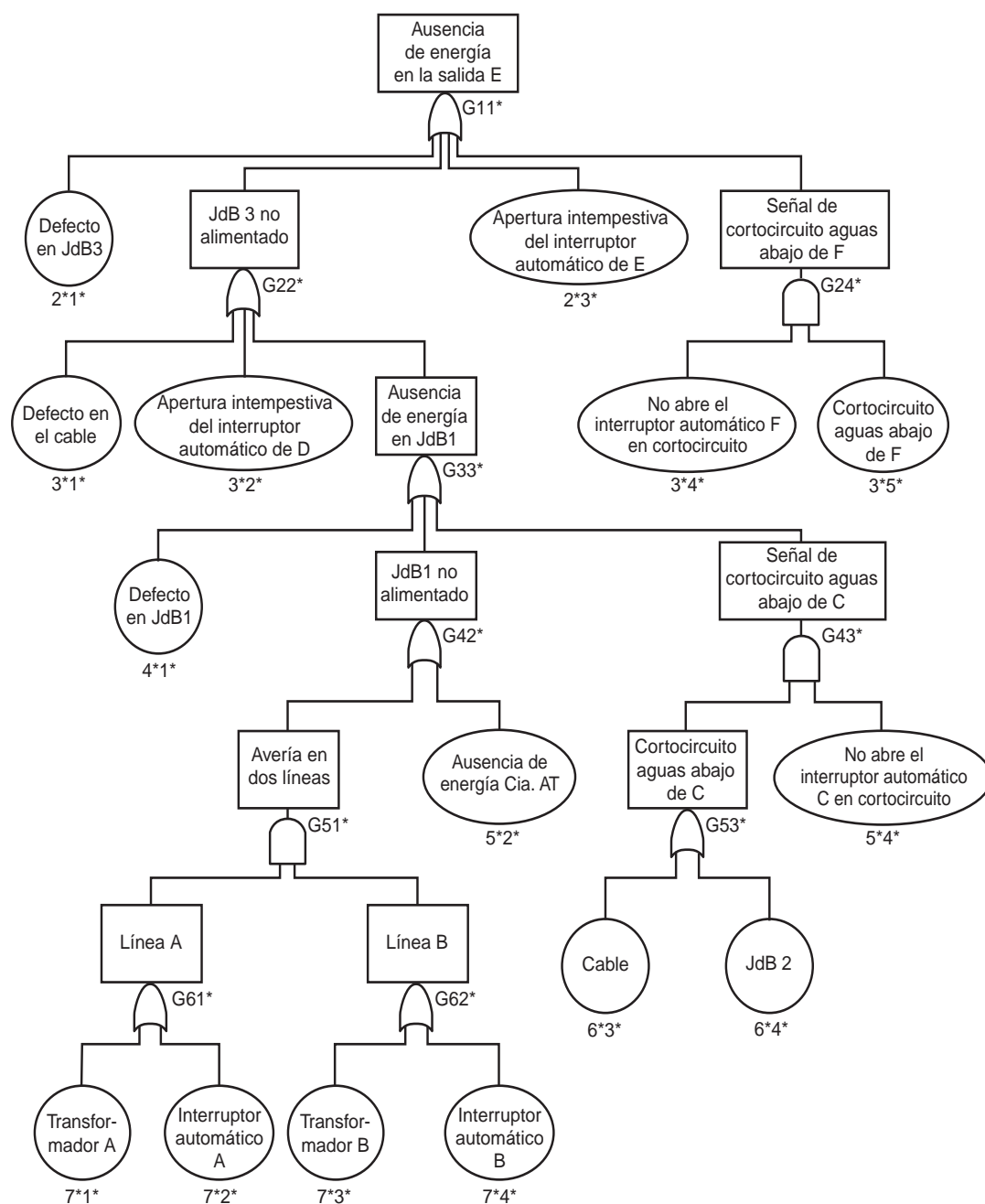


Fig. 25: Árbol de fallo correspondiente a la red de la figura 24.

suceso en el árbol le corresponde una probabilidad de ocurrir, en este caso, una indisponibilidad. Los sucesos elementales se calculan por la fórmula:

$ID \approx \lambda \cdot MTTR$, con:

λ : la tasa de fallo del elemento, para modo de avería concreto, obtenido de los registros experimentales;

MTTR: es el tiempo medio de reparación que depende del elemento y de la instalación (tecnología, situación geográfica, contrato...).

A veces uno mejora una probabilidad cuando ésta es desconocida. Por ejemplo uno toma 10^{-2} como la más alta probabilidad de aparición de un cortocircuito aguas abajo de F.

La **figura 26** da los resultados obtenidos por una indisponibilidad sobre la salida E son 10^{-5} que corresponde a 5 min. por año. La búsqueda de las secciones mínimas, permite no solamente obtener la probabilidad de ocurrir el suceso cumbre, sino también la contribución de cada uno de las secciones. La misma **figura 26** da el listado de las secciones mínimas y su contribución expresada en %. Esta medida de la contribución se llama magnitud.

El examen de las amplitudes relativas muestra que el cable de unión del juego de barras (1) al juego de barras (3), (3er nivel inferior), es crítico, aunque con menor medida, que en los dos juegos de barras a que esta unido. Constatamos que la mejora de estos elementos vuelve a hacer crítico el suministro de la Compañía. Para mejorar aún más la disponibilidad se deberá recurrir a una fuente autónoma de socorro, del tipo de generador diesel. El estudio de la disponibilidad de una alimentación eléctrica, es detallado en el Cuaderno Técnico nº 184 de Schneider Electric «Estudio de la seguridad de las instalaciones eléctricas».

Observaciones sobre los árboles de fallo

Los secciones con configuraciones y estrategias de mantenimiento complejas son difícilmente modelizables por un árbol de fallo. Por ejemplo, cuando dos componentes están en redundancia, el fallo del segundo componente solo tiene sentido si falla el primer componente. Este aspecto temporal de unas averías no puede ser tomado en consideración en un árbol de fallo, al contrario que en los gráficos de estado y en las redes de Pétri, descritas más adelante.

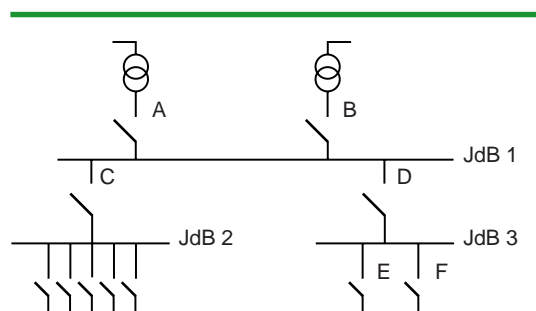


Fig. 24: Red de distribución en BT.

Indisponibilidad: $1,1 \cdot 10^{-3}$

Lista de secciones mínimas (señaladas sobre el árbol) y su contribución en %:

1	: 2*1*	: 9,5
2	: 2*3*	: 1,6
3	: 3*1*	: 68,0
4	: 3*2*	: 1,6
5	: 3*4*, 3*5*	: 0,013
6	: 4*1*	: 9,5
7	: 5*2*	: 9,9
8	: 5*4*, 6*3*	: 9,1 E-6
9	: 5*4*, 6*4*	: 3,2 E-6
10	: 7*1*, 7*3*	: 0,00058
11	: 7*1*, 7*4*	: 1,3 E-5
12	: 7*2*, 7*3*	: 1,3 E-5
13	: 7*2*, 7*4*	: 2,7 E-7

Fig. 26: Contribución de los elementos de la red a la indisponibilidad.

5.6 Los gráficos de estado

Los gráficos de estado (llamados también gráficos de Markov) permiten una modelización sobre ciertas hipótesis. Las etapas sucesivas son: la construcción de un gráfico, la resolución de ecuaciones de base y la interpretación de los resultados en términos de fiabilidad y de disponibilidad. La resolución es muy simplificada para el cálculo de límites con valores independientes del tiempo.

Construcción del gráfico

El gráfico representa todos los estados del sistema y las transiciones posibles entre los estados. Las transiciones entre estados corresponden a sucesos que afectan el funcionamiento de los componentes del sistema. Estos sucesos son en general los fallos o las reparaciones. Resulta que las tasas de transición entre estados están esencialmente compuestas de tasas de fallo o de reparación (a veces ponderadas por probabilidades del tipo de rechazo de arranque a la solicitud).

El gráfico de la **figura 27**, representa el comportamiento de un sistema que comprende un único elemento reparable.

Hipótesis

Un modelo de funcionamiento es llamado Markoviano, si se cumplen las condiciones siguientes:

- la evolución del sistema sólo depende del estado que ocupa y no del pasado,
- las transiciones se realizan según leyes exponenciales. Las tasas son constantes,
- el número de estados es finito,
- dos transiciones no pueden ser simultáneas.

Ecuaciones

Sobre las hipótesis descritas en el párrafo anterior la posibilidad de estar en el estado E_i en el instante $t + dt$ resulta:

$P_i(t + dt) = P(\text{el sistema está en el estado } E_i \text{ en el instante } (t) \text{ y } (y) \text{ el resto}) + P(\text{el sistema viene de otro estado } E_j).$

En un gráfico de (n) estados obtenemos (n) ecuaciones diferenciales que dan el siguiente planteamiento:

$$\frac{d\Pi(t)}{dt} = \Pi(t) \cdot [A]$$

en donde: $\Pi(t) = [P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)]$

$[A]$ se denomina matriz de la transición del gráfico

La resolución informática de esta ecuación en forma matricial permite obtener la probabilidad $P_i(t)$ de estar en el estado (i) en el instante (t) conociendo las tasas de transición del gráfico y el estado inicial.

Cálculo de los diferentes valores

La disponibilidad es la probabilidad de encontrarse en un estado de funcionamiento después:

$$D(t) = \sum_i P_i(t)$$

P_i = probabilidad de permanecer en estado de funcionamiento E_i .

La fiabilidad es la probabilidad de estar en un estado de marcha sin pasar nunca por un estado de avería.

Hemos construido un gráfico, en el cual se suprimen todas las transiciones que parten de un estado de avería hacia a un estado de funcionamiento y obtenemos las probabilidades $P'_i(t)$ y entonces resulta:

$$R(t) = \sum_i P_i(t)$$

Hemos observar que dos valores se deducen de forma simple:

- el tiempo medio de ocupación de un estado (i) :

$$T_i = \frac{1}{\sum (\text{tasa de salida de estado } i)}$$

- la frecuencia de ocupación de un estado (i) :

$$f_i = \frac{P_i}{T_i}$$

El cálculo en tiempos medios MTTF, MTTR, MUT, MDT, MTBF se obtienen por cálculo matricial y utilizando ciertas relaciones expuestas en el apartado 3.

Para la MTTF hace falta elegir una distribución inicial de las probabilidades de estar en cada uno de los estados.

Aplicaciones: onduladores en paralelo

Un ondulador es un aparato que permite mejorar la calidad de la energía eléctrica. Se sitúa aguas arriba de los receptores sensibles, tales como los ordenadores y sus periféricos. Estudiamos una instalación de onduladores en redundancia 2/3. La indisponibilidad no es el único valor a

Parámetros constantes:

Indisponibilidad	: 1,199360 E-07	Disponibilidad	: 9,999999 E-01
MTTF	: 4,169167 E+07	MTTR	: 8,333667 E+00
MUT	: 4,169167 E+07	MDT	: 5,000333 E+00
MTBF	: 4,169167 E+07		

Fig. 29: Valores relativos al esquema de la **figura 28**.

considerar: el MTTF permite conocer el tiempo medio antes del primer corte en la aplicación. Son estos valores con los que se construyen los gráficos de estado. Los tres onduladores son idénticos, esto nos permite unificar los estados correspondientes a un mismo número de onduladores averiados. Las tasas de fallo y de reparación de onduladores se representan λ y μ (**figura 28**).

El número del estado corresponde a la cantidad de onduladores en avería. Cada ondulador que funciona en un estado E_i aporta una tasa de salida (I) generando el estado E_{i+1} .

Estas tasas son respectivamente 3λ , 2λ y λ . En efecto para pasar del estado 0 al estado 1 hay tres posibilidades de fallo; para pasar del estado 1 al estado 2 hay dos posibilidades de fallo, etc.

Los estados de marcha son los estados 0 y 1. En nuestra hipótesis, el número de reparadores es suficiente para que tres reparaciones puedan

realizarse simultáneamente. Las tasas de transición correspondientes a reparaciones son pues proporcionales al número de onduladores averiados en el estado considerado. Los datos numéricos son los siguientes:

$$\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}; \mu = 10^{-1} \text{ h}^{-1}$$

La **figura 29** da los resultados obtenidos por el cálculo de valores independientes en el tiempo. Se observa que el MTTF vale $4,17 \cdot 10^7$ horas mientras que sin redundancia (sistema 3/3) la MTTF vale $1/3 \text{ I} = 1,67 \cdot 10^4$ horas.

Para la indisponibilidad asintótica se pasa de $1,19 \cdot 10^{-7}$ para el sistema estudiado a $6 \cdot 10^{-4}$ sin redundancia (sistema 3/3). La diferencia entre estos dos valores se observa muy bien en el gráfico. En el caso de la redundancia 2/3 la indisponibilidad se calcula acumulando las probabilidades de dos estados de avería son: $ID = P_2 + P_3$, y sin redundancia se suman los tres estados de avería: $ID = P_1 + P_2 + P_3$.

5.7 Las redes de Pétri

Un sistema se representa por unos emplazamientos, unas transiciones (enlaces) y unas fichas (semáforos). El paso de una transición por una ficha corresponde a un suceso posible, funcional o disfuncional, del sistema. Estas transiciones pueden estar asociadas a cualquier ley de probabilidades, contrariamente a los gráficos de estado que suponen unas transiciones siguiendo las leyes exponenciales. Únicamente la simulación permitía la solución de tales cálculos.

La red de Pétri de la **figura 30** representa los distintos fallos que puede sufrir un sistema «distribución eléctrica» (por ejemplo el de una industria). Este sistema está compuesto de una entrada Compañía suministradora y de grupos electrógenos que se activan si esta falla.

■ A la transición nº 1 está asociada la probabilidad de fallo de «alimentación de la Compañía suministradora».

■ A la transición nº 2 está asociada la probabilidad de arranque y de no arranque de los grupos electrógenos.

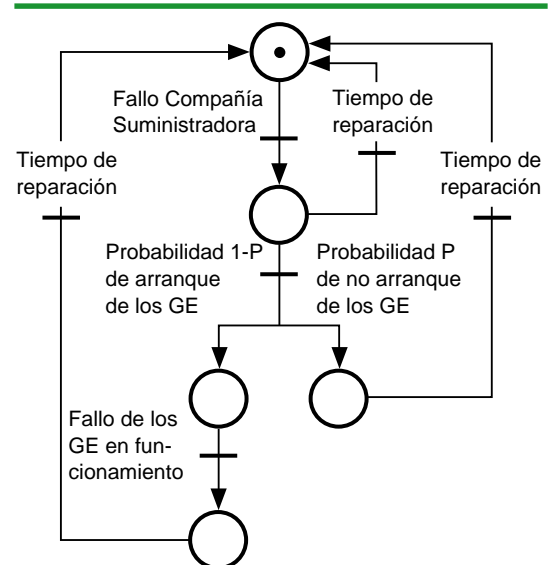


Fig. 30: Modelización de la distribución eléctrica por red de Pétri.

■ A la transición nº 3 está asociada la probabilidad de fallo en funcionamiento de los grupos electrógenos.

La modelización de un sistema por redes de Pétri es la imagen más próxima al funcionamiento real del sistema estudiado. Por ejemplo, un tiempo de reparación constante es un caso frecuente y en consecuencia puede ser modelizado tal cual en una red de Pétri. En cambio si se hubiera modelizado con gráficos de estado (técnica precedente), estaríamos obligados a suponer que el tiempo de reparación sigue una ley exponencial.

Teniendo en cuenta los límites asociados a la simulación, aquella técnica no se puede utilizar sistemáticamente: para obtener más precisión, es necesario realizar un gran número de simulaciones y el tiempo de cálculo puede ser excesivo si la estimación de las medidas está relacionada a sucesos poco frecuentes. Aunque es cierto que el aumento de potencia ofrecida por los ordenadores personales tiende a flexibilizar este inconveniente.

5.8 Elección de una técnica de modelización

Para realizar la elección de una técnica de modelización, se presenta una tabla detallada en el Cuaderno Técnico nº 184 "Estudios de la seguridad en las instalaciones eléctricas", sin embargo deben tenerse en cuenta las carencias principales de cada uno de los tres métodos utilizados (árboles de fallo, gráficos de estado, redes de Pétri), puesto que los gráficos de fiabilidad suponen unas limitaciones de los sistemas que raramente coinciden totalmente con la complejidad industrial actual, a saber:

■ los árboles de fallo no pueden tratar el aspecto temporal de los fallos, como consecuencia la propia estructura variable en la reconfiguración del propio árbol, operación frecuente, en particular en los casos de distribución eléctrica,

■ los gráficos de estado suponen que las duraciones de vida y de reparación de los componentes del sistema siguen todas ellas una ley exponencial, hecho poco realista en ciertos casos (duración de componentes mecánicos sometidos a desgaste, tiempos de reparación constante...),

■ las redes de Pétri son complicadas para su puesta a punto, ya que la definición de errores realizada durante el proceso de modelización no es muy buena y los tiempos de simulación pueden ser muy largos puesto que se implican sucesos complejos.

Con la mejora de los medios de cálculo, la tendencia es aplicar de forma cada vez más decidida las redes de Pétri, salvo en los casos con sistemas muy simples o en los que la aplicación de los otros dos métodos es más rápida para la obtención de resultados equivalentes.

6 Mantenimiento y logística: cada vez más complejidad...

En la concepción de la Garantía de funcionamiento interviene el mantenimiento: se tolera más fácilmente que un sistema entre frecuentemente en avería si es posible repararlo instantáneamente. Así, para un riesgo de avería

dada existe un óptimo en términos de mantenimiento y de stock de piezas de recambio para garantizar un nivel de fiabilidad y/o de disponibilidad dados.

6.1 Optimización del Mantenimiento por la Fiabilidad (O.M.F.)

Este método aparecido en los años 60 en el campo de la aeronáutica, ha sido incorporado por algunas Compañías suministradoras de fluido eléctrico en 1990 para el mantenimiento del parque nuclear y se tiende a aplicar en un buen número de instalaciones industriales complejas donde se realizan operaciones de mantenimiento. Este método persigue tres objetivos:

- reducir los costes de mantenimiento sin degradación de la fiabilidad,
- mejorar la seguridad y la disponibilidad de las instalaciones (poniendo más atención a las frecuencias y a los elementos a mantener),

- controlar la duración de vida de la aparamenta algunas veces superior a la duración del curso de los operadores del mantenimiento).

Se apoya en dos reglas de «sentido común»:

- clasificar los fallos del sistema por orden de prioridad con el fin de asignarles un mantenimiento adaptado: si es necesario el prevenir el fallo, entonces el mantenimiento debe ser preventivo; si basta con reparar la avería cuando se produce puede ser correctivo,
- emplear los registros estadísticos experimentales sobre los fallos pasados para orientar el mantenimiento sobre los componentes menos fiables.

6.2 Solución Logística Integrada (S.L.I.)

Este modo resulta indispensable cuando se debe, por ejemplo, asegurar la disponibilidad de varias secciones a partir de centros logísticos geográficamente distantes: ¿Cuántas piezas de recambio deben disponerse para el conjunto del sistema? ¿Es preferible almacenarlas cerca de cada uno de las secciones o bien en un solo depósito?

El S.L.I. tiene pues por objetivos:

- Controlar la relación «coste global de posesión/disponibilidad operacional».
- Tener en cuenta las exigencias de apoyo en la concepción del sistema (de aquí proviene el término «integrada»)

Este procedimiento globalizado se traduce en particular por la optimización compleja de lotes de recambio, optimización imposible de realizar «manualmente», con un papel y un lápiz. Estos cálculos se efectúan con la ayuda de programas informáticos que hacen referencia a varios campos de las matemáticas aplicadas (probabilidades, investigación operacional).

Para más detalles se puede consultar «L'analyse du soutien logistique et son enregistrement» (Bibliografía).

7 Conclusión

La garantía de funcionamiento, noción cada vez más importante en términos de confort, de eficacia, de seguridad, actualmente se controla y calcula. Esta se aplica en la concepción de los aparatos, las estructuras y los sistemas. Con mayor frecuencia entra a formar parte de las especificaciones de suministro y de las cláusulas contractuales.

La existencia de los métodos y herramientas en este campo, permiten hoy en día aplicar sistemáticamente los estudios de garantía de

funcionamiento en el diseño y en las actuaciones de garantía de la calidad.

La combinación de la aplicación intuitiva, los cálculos aproximados y de los definitivos, permite comparar las configuraciones, y valorar los riesgos para obtener el mejor resultado, es decir todo aquello que corresponde a las necesidades claramente expresadas.

En fin, los métodos de optimización permiten reducir los costes de mantenimiento y de logística, permitiendo el nivel de funcionamiento exigido.

Bibliografía y normas

Normas

- CEI 160191/UTEC20310 : Liste des termes de base, définitions et mathématiques applicables à la fiabilité.
- CEI 362/UTEC20313 : Guide pour l'acquisition des données de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité à partir des résultats d'exploitation des dispositifs électroniques.
- CEI 305/UTE C20321 à 20327: Essai de fiabilité des équipements.
- CEI 706/X 60310 ET 60312: Guide maintenabilité de matériel.
- CEI 812/x 60510: Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes.
Procédure d'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE).
- CEI 863/x 60520 : Prévion des caractéristiques de fiabilité, maintenabilité et disponibilité.
- CEI 61508: Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité.

Cuadernos Técnicos de Schneider Electric

- Seguridad de funcionamiento y cuadros eléctricos de baja tensión. P. ROMANET-PERROUX . 1998. Cuaderno Técnico n° 156.
- Estudio de la seguridad de las instalaciones eléctricas. S. LOGIACO. 1999, Cuaderno Técnico n° 184.

Participación de Schneider Electric en diferentes grupos de trabajo:

- Groupe statistiques du comité 56 (normes de fiabilité) de la CEI.
- Sécurité du logiciel au groupe Européen EWICS - TC7: computer and critical applications.

Obras diversas

- Military Handbook 217 F (notice 2) Department of Defense (US) -1995.
- Recueil de données de fiabilité du CNET (Centre National d'Etudes des Télécommunications) - 1999.
- Documents Std 493 et 500 de l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 1984 et 1997.
- Document NPRD97 (Nonelectronics Parts Reliability Data du Reliability Analysis Center (Department of Defense US) -1997.
- «Fiabilité des systèmes». PAGES et M. GONDRAN. Eyrolles 1983.
- «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels» VILLEMEUR. Eyrolles 1988.
- Vocabulaire Electrotechnique International VEI 191 -Juin 1988.
- Actes de la 15e conférence Inter Ram à Portland, Oregon -Juin 1988.
- «Techniques de fiabilité en mécanique». Cl. MARCOVICI et J. Cl. LIGERON - Pic 1974.
- «L'analyse du soutien logistique et son enregistrement». M. PREVOST et C. WAROQUIER. Technique et Documentation (Lavoisier 1994).