

INGENIERIA DE FIABILIDAD Y ANALISIS DE RIESGOS

FRANCESCO M.G.A.F. DE CICCIO*

Uno de los factores que repercuten, de forma crucial, en la productividad de las empresas es la fiabilidad de los sistemas: métodos de trabajo, equipos, instalaciones. La optimización de la productividad, en lo que respecta al factor fiabilidad, requiere la consideración, desde la planificación estratégica de la organización, de los riesgos inherentes a la actividad empresarial.

INTRODUCCION

Normalmente, los diccionarios definen el término «riesgo» como «la posibilidad de que se produzcan daños a personas y propiedades». Si los diccionarios estuvieran escritos por Ingenieros de Fiabilidad, indicarían que «riesgo» es «la posibilidad de que se produzcan daños a personas, propiedades y medio ambiente, en un determinado espacio de tiempo».

Por razones obvias, los primeros pasos en la cuantificación de la Fiabilidad (1) se dieron en la industria aeronáutica, consolidándose más adelante en la industria aeroespacial.

A finales de la década de los 40, en Estados Unidos, los esfuerzos para incrementar la Fiabilidad se concentraron en la calidad de los productos. Se efectuaron avances importantes en el desarrollo de proyectos, materiales, instrumentos de comprobación, etc., procurando aumentar la vida útil del producto o del sistema.

Del mismo modo, se lograron notables progresos en el área del Mantenimiento, en especial en lo referente a la planificación de recursos y a los medios y técnicas dedicados al Mantenimiento Preventivo.

Desde principios de los años 50, se comenzó a dar una creciente importancia al capítulo Seguridad especialmente en el campo aeroespacial y nuclear, difundiéndose el uso de la fiabilidad de componentes en términos de tasa de fallo, vida útil probable y adecuación de los proyectos.

Ya en la década de los 60, también en los Esta-

* Director del Instituto Brasileiro de Gestao de Riscos. Ejecutivo.

(1) Una definición sucinta de Fiabilidad: La probabilidad de que un componente, dispositivo, equipo o sistema desempeñe satisfactoriamente sus funciones, por un espacio de tiempo dado y bajo un determinado conjunto de condiciones operativas.

dos Unidos, se llevaron a cabo tests funcionales de componentes y sistemas; se obtuvieron registros de fallo y se analizó cada modalidad de fallo y sus correspondientes efectos; con ello, se pretendía poder definir las acciones preventivas a adoptar. El análisis de sistemas, utilizándose diagramas de bloques de fiabilidad, se aplicó exhaustivamente como modelo para intentar alcanzar los objetivos de fiabilidad y seguridad previstos.

El complejo trabajo de valoración de riesgos de centrales de energía nuclear, patrocinado por la «United States Atomic Energy Commission» y concluido en 1974, hizo época (2). El profesor N. Rasmussen y su equipo analizaron un amplio espectro de accidentes nucleares, clasificándolos en función de sus posibilidades de ocurrencia y valorando sus consecuencias potenciales para la población y para el medio ambiente.

A partir de aquí, diversas técnicas de análisis de riesgos usadas en dicho trabajo se fueron extendiendo y siendo ampliamente adoptadas por la industria química, así como por otras, principalmente en Europa, Asia y EE. UU.

El creciente clamor de la opinión pública, en lo que se refiere a los riesgos industriales, ha tenido efectos profundos. En Europa, por ejemplo, después de los graves accidentes de Flixborough, en Inglaterra, y de Seveso, en Italia, se produjo una exhaustiva revisión de la legislación, obligándose a las empresas a realizar estudios de riesgo, previos a la construcción de nuevas plantas industriales.

FIABILIDAD, RIESGO Y SEGURIDAD

Normalmente, se produce una traslocación — y la subsiguiente confusión — entre los conceptos de fiabilidad, riesgo y seguridad.

De manera regular, se ha adoptado la noción «análisis de fiabilidad» para referirse a fallos o a la operatividad de procesos y equipos.

A su vez, el término «análisis de riesgos» se utiliza de forma más amplia para caracterizar, ade-

más de los fallos o la operatividad de procesos y equipos, el estudio de los parámetros de seguridad, traducidos a términos de posibles daños (riesgos) en el propio sistema, o bien, a personas, instalaciones y bienes, en general, de la empresa, al medio ambiente, a la comunidad o a terceros.

Un ejemplo de análisis de fiabilidad sería el estudio de frecuencia con que un reactor químico podrá sobrecalentarse debido a un mal funcionamiento de los equipos de bombeo, los intercambiadores de calor, los operadores, los sistemas de control y otros equipos y utilidades. Si ese estudio incluyese una valoración de la frecuencia con que una aparición de esa temperatura ocasiona una explosión, estaríamos, en ese caso, tratando, también, aspectos de seguridad (análisis de riesgos). Para concluir el estudio, se debería, igualmente, considerar el conjunto de consecuencias (daños humanos, materiales y financieros) y sus respectivas frecuencias.

Por este motivo, de manera general, «riesgo» («risk», en inglés), se ha definido mediante la expresión:

$$\text{Riesgo} \left[\frac{\text{Consecuencias}}{\text{Tiempo}} \right] = \text{Frecuencia} \left[\frac{\text{N.º eventos}}{\text{Tiempo}} \right] \times \text{Gravedad} \left[\frac{\text{Consecuencias}}{\text{N.º eventos}} \right]$$

Así, si se afirma que en Brasil el riesgo de un accidente fatal entre trabajadores de la industria química es del orden de $0,09 \times 10^{-6}$ por persona y hora de exposición (3), se está afirmando que ese número corresponde a una media de nueve víctimas por año en 10.000 trabajadores de la industria química.

Obviamente, la parte más importante de un análisis de riesgos es la definición de las medidas preventivas y correctivas a adoptar para un control de los riesgos, lo cual se detalla en el apartado siguiente.

(2) «WASH 1400, The Reactor Safety Study».

(3) V. referencia bibliográfica n.º 1.

METODOLOGIA DEL ANALISIS

La realización de un estudio completo de fiabilidad y riesgos en una empresa (desarrollado normalmente por equipos de ingenieros y técnicos de varias modalidades) comprende, básicamente, las siguientes fases:

Fase I: Definición del sistema a analizar e identificación de los riesgos potenciales (revisión general), mediante técnicas como «What-If/Check list» y APR (análisis preliminar de riesgos).

Fase II: Estudio cualitativo y cuantitativo de la secuencialidad de los accidentes y fallos,

mediante la aplicación de técnicas como HAZOP (estudio de operabilidad y riesgos), AMFE (análisis de modos de fallo y efectos) y AAF (análisis de árboles de fallos).

Fase III: Cálculo del volumen de material tóxico o de energía liberada por un determinado tipo de accidente o fallo; definición de la trayectoria de las toxinas letales, ondas de choque o radiaciones térmicas; valoración de los posibles efectos en la salud, y daños materiales y al medio ambiente.

El Cuadro I ofrece una visión panorámica de las técnicas de análisis antes mencionadas.

Cuadro I. Principales técnicas de análisis de riesgos

«What-If/Checklist».—Es un procedimiento de revisión de riesgos de procesos (del tipo «¿Y si ...?»), que, adecuadamente conducido, permite la identificación de un amplio espectro de riesgos; el consenso entre áreas de actuación (producción, proceso, seguridad, etc.) sobre la forma de encaminarse hacia operaciones seguras; y un informe de fácil comprensión, que sirve, además, como material de entrenamiento. Es un método básico para el desarrollo de otras técnicas de análisis.

Análisis Preliminar de Riesgos (APR).—Se trata de una técnica que permite una revisión general de los riesgos que se van a presentar en las fases operativas, clasificándolos a fin de fijar una prelación de las acciones preventivas y/o correctivas. Genera una gama de medidas de control y es imprescindible en sistemas de media y alta innovación.

Estudio de Operabilidad y Riesgos (HAZOP).—Es una técnica que tiene por objetivo analizar riesgos específicos de una planta de proceso, así como problemas operativos que puedan comprometer la capacidad de dicha planta en la obtención de la productividad proyectada. Genera una gama de medidas que permiten la reducción/eliminación de los riesgos identificados y la disminución de los errores operacionales. Es imprescindible en nuevos proyectos, ampliaciones y en los estudios de unidades ya existentes.

Análisis de Modos de Fallo y Efectos (AMFE).—Es una técnica concebida para la detección y control de riesgos originados en los equipos. Identifica componentes críticos y genera una relación de contramedidas y formas de detección precoz de fallos. Resulta especialmente útil en emergencias de procesos y utilidades. Propicia un aumento de fiabilidad del sistema a través del tratamiento de componentes causantes de fallos de efecto crítico.

Análisis de Árboles de Fallos (AAF).—Técnica de análisis cuantitativo/cualitativo, que permite abordar de manera lógica y sistemática una eventualidad altamente indeseada o «evento catastrófico». Puede proporcionar las probabilidades de ocurrencia del evento a estudio, y genera los denominados «conjuntos mínimos catastróficos» (fallos simultáneos desencadenantes de catástrofes). Produce resultados excelentes en sistemas complejos, donde otros métodos resultan inoperantes, permitiendo el estudio, por ejemplo, de los «fallos de modo común» (un riesgo disimulado y no detectable intuitivamente).

Análisis de Consecuencias y Vulnerabilidad (ACV).—Se trata de una técnica que permite la valoración cuantitativa y cualitativa de las consecuencias de los eventos catastróficos de amplia repercusión, así como la vulnerabilidad del medio ambiente, la comunidad y terceros en general.

Conviene destacar que, con la aplicación de estas técnicas, a partir de la Fase I, es posible definir las estrategias a adoptar para la administración de riesgos detectados, bien sea empleando medidas preventivas y correctivas, o bien, por ejemplo, medidas de transferencia de parte de esos riesgos al mercado de Seguros.

Por otra parte, la tendencia moderna, derivada de crecientes exigencias de la opinión pública y de la legislación de los países desarrollados, es llevar a término una cuantificación de los riesgos, sobre la base de su gravedad y frecuencia, y no solamente de una manera subjetiva y empírica.

Uno de los criterios adoptados es el de comparar los riesgos industriales con otros a los que, voluntariamente o no, estamos expuestos. Se acepta, de manera general, en los países desarrollados, que el riesgo inherente a las actividades industriales debe ser 1.000 veces menor que el riesgo cotidiano de muerte por enfermedad o accidente, que es del orden de 9×10^{-3} muertes/año (Cuadro II).

Cuadro II. Riesgo de muerte según la causa

<i>Causa</i>	<i>Riesgo de muerte/ año de exposición</i>
— Todas las causas	$9,0 \times 10^{-3}$
— Enfermedades del corazón	$3,4 \times 10^{-3}$
— Cáncer	$1,6 \times 10^{-3}$
— Accidentes laborales ...	$1,5 \times 10^{-4}$
— Todos los accidentes ..	$4,8 \times 10^{-4}$
— Vehículos motorizados .	$2,1 \times 10^{-4}$
— Homicidios	$9,3 \times 10^{-5}$
— Caídas	$7,4 \times 10^{-5}$
— Ahogamientos	$3,7 \times 10^{-5}$
— Quemaduras	$3,0 \times 10^{-5}$
— Envenenamiento por líquido	$1,7 \times 10^{-5}$
— Sofocación (objetos tragados)	$1,3 \times 10^{-5}$
— Accidentes con armas y deportes	$1,1 \times 10^{-5}$
— Aviación civil	$8,0 \times 10^{-6}$
— Transporte marítimo ...	$7,8 \times 10^{-6}$
— Envenenamiento por gas .	$7,7 \times 10^{-6}$
— Rayo	$5,6 \times 10^{-7}$
— Huracán	$4,1 \times 10^{-7}$
— Tornado	$4,1 \times 10^{-7}$
— Mordeduras	$2,2 \times 10^{-7}$

Fuente: US. DOT.

La divulgación, a través de los medios de comunicación, de las grandes catástrofes mundiales, ha provocado considerable impacto entre el público, creándose la noción de riesgo perceptible, que se superpone a la de riesgo real y que conduce, por lo general, a subestimar los pequeños accidentes cotidianos.

Las estadísticas mundiales han demostrado que uno de los mayores peligros a los que estamos supeditados son los accidentes automovilísticos, lo cual no nos impide circular diariamente por las carreteras... Consideramos, pues, ese riesgo como aceptable.

En efecto, el concepto de riesgo aceptable permite sustituir el concepto subjetivo de seguridad por otro, de índole subjetiva y dominable, que posibilita la administración científica de los riesgos inherentes a una determinada actividad.

Afortunadamente, los accidentes de elevada severidad ocurren con escasa frecuencia. Una catástrofe es, efectivamente, una eventualidad rara, con una probabilidad de ocurrencia inferior a 10^{-5} . Téngase en cuenta, además, que su elevada gravedad atrae mucho más la atención del público que los pequeños y frecuentes accidentes.

En cierto modo, es un mecanismo idéntico al que se da en las empresas, en las cuales pequeños y frecuentes accidentes no consiguen despertar el interés de los ejecutivos, en comparación con los accidentes de mayor relieve, pero de frecuencia extremadamente baja.

Cíclicamente, la comunidad mundial se ve sacudida por acontecimientos catastróficos, unos de carácter natural (inundaciones, terremotos, huracanes), otros como consecuencia de la actividad del hombre (explosiones, liberación de sustancias tóxicas o radiactivas). En lo que respecta a los primeros, poco se puede esperar de la intervención humana para dominar sus efectos, mientras que en los segundos queda la sensación, en la opinión pública, de que no se ha hecho lo suficiente para evitarlos. Hay nombres que quedarán siempre gravados en la memoria colectiva: Three Mile Island, Bophal, Vila Socó, Goiânia, ...

Antes de concluir con la metodología de los estudios de fiabilidad y riesgos, conviene hacer referencia a algunos criterios de aceptabilidad de riesgos que se han venido adoptando, particularmente por la industria nuclear.

Por ejemplo, las autoridades británicas responsables de la construcción y operación de centrales

nucleares, han establecido una curva (llamada «curva de Farmer») para distinguir las liberaciones de radiactividad permisibles de las no permisibles, en función de su impacto en el medio ambiente.

Sin embargo, en los Estados Unidos, las autoridades nucleares prefieren contabilizar ese riesgo en dólares, exigiendo que las centrales nucleares demuestren, mediante un análisis de coste/beneficio, que una reducción de la dosis radioactiva que alcance a la población existente en un radio de 50 millas no puede obtenerse con una inversión inferior a 1.000 dólares por hombre/rem.

En Europa, y más concretamente en Holanda, se exige que las plantas de proceso químico demuestren tener sus instalaciones adecuadas a un nivel de riesgo (no-fiabilidad) inferior a 10^{-7} /año, para fallos o eventos que puedan poner en peligro vidas, bienes o al medio ambiente.

De ese modo, el planteamiento en términos de análisis de fiabilidad y riesgos permite separar los riesgos aceptables de los que no lo son. A éstos, es imprescindible aplicarles los preceptos de la Ingeniería de Seguridad, en orden a reducirlos a niveles aceptables.

Tal objetivo sólo se alcanzará mediante la adopción ponderada de medidas de prevención y protección; medidas destinadas tanto a reducir las probabilidades de ocurrencia de siniestros, como a limitar la extensión de sus consecuencias.

En resumen, la gestión fundamentada en análisis de fiabilidad y riesgos permitirá definir las estrategias a seguir para una eficaz administración de los riesgos, estableciéndose así:

- cuáles son los riesgos aceptables,
- qué gravedad tendría un posible accidente,

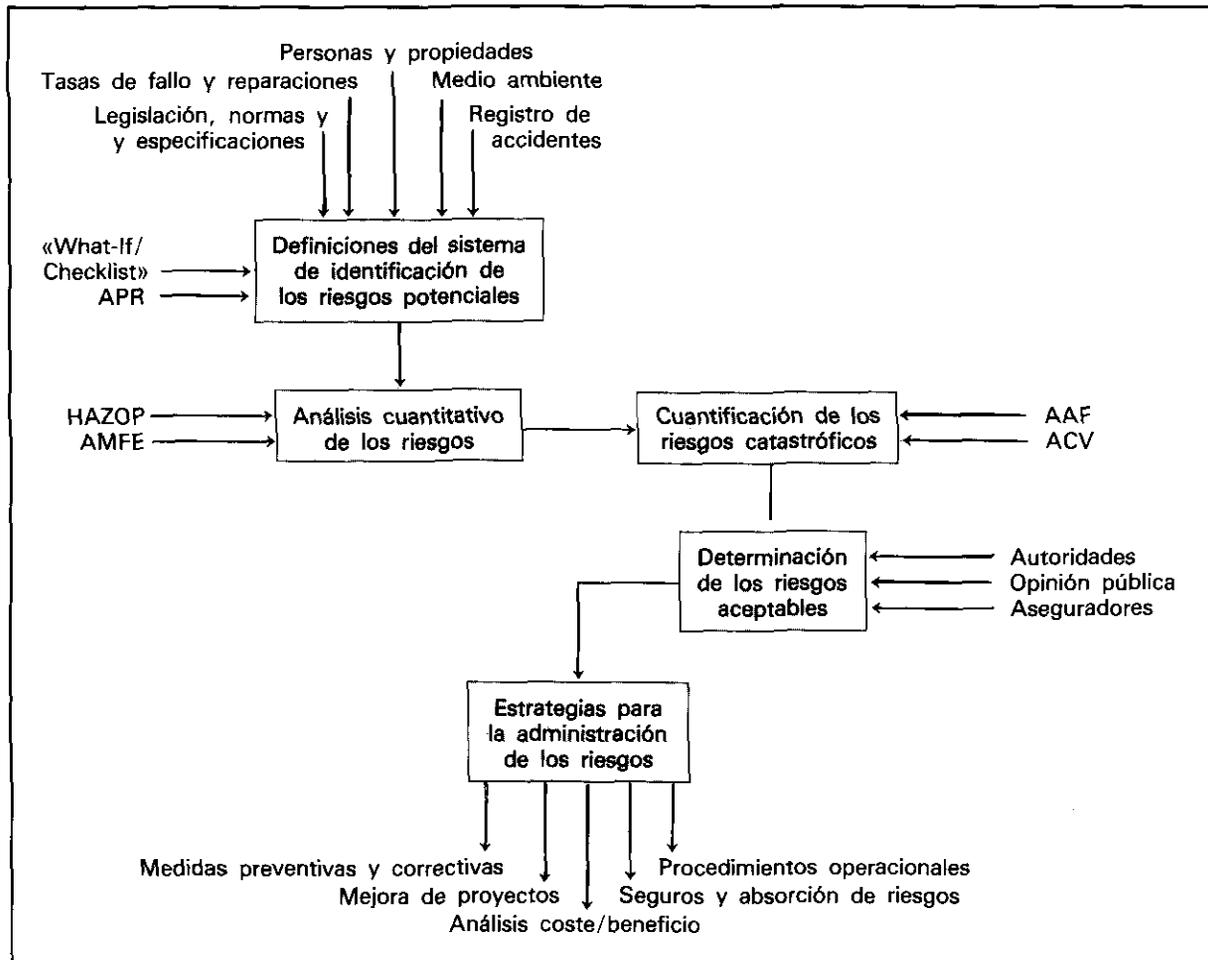


Figura 1.—Diagrama de flujos de la ingeniería y administración de riesgos.

- cuánto deberá invertirse en prevención y protección,
- cómo podrán reducirse los riesgos inaceptables,
- qué soluciones optimizarían la relación coste/beneficio y
- qué riesgos deben ser transferidos al mercado de Seguros y cuáles deberán ser absorbidos por la propia empresa.

El diagrama de flujos de la Figura 1 es una síntesis del planteamiento que se pretende mostrar en este artículo.

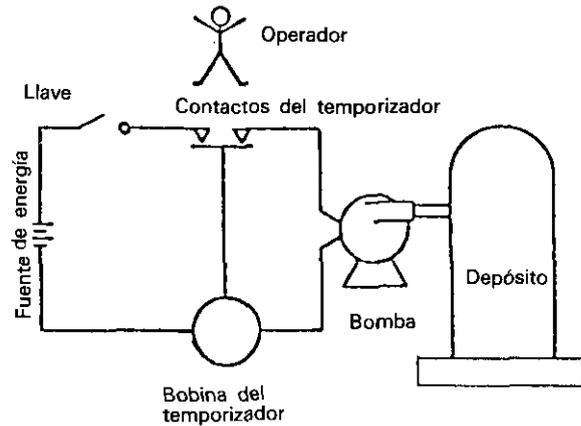


Figura 2.—Esquema de un sistema de bombeo.

UN EJEMPLO SENCILLO DE APLICACION

Mediante este ejemplo, se pretende ofrecer al lector una pequeña idea de cómo se aplican algunos de los parámetros del análisis de fiabilidad y riesgos.

No es nuestra intención —ya que no es esa la finalidad del presente artículo— dar definiciones ni explicar detalladamente los conceptos aquí empleados. Esperamos que en próximas oportunidades tengamos ocasión de desarrollar en profundidad los diversos conceptos y técnicas utilizados en los estudios cuantitativos y cualitativos de riesgos de fallo y accidente.

Vamos a considerar que el tiempo de llenado de un hipotético depósito —Figura 2— es de 10 minutos y, el de vaciado, de 50 minutos (el ciclo completo dura, pues, una hora). Tras cerrar la llave de accionamiento del sistema, el temporizador se ajusta para que abra los contactos a los 10 minutos. Si los mecanismos fallan, el operador, en ese caso, deberá cerrar manualmente la llave para evitar la ruptura del depósito por sobrepresión.

a) Despreciando fallos secundarios y otros efectos, vamos a construir un Arbol de Fallos y a identificar los «CMCs» (Conjuntos Mínimos Catastróficos) (4), que podrían conducir a la ruptura del depósito.

(4) En inglés, «Minimal Cut Set»: conjunto de eventos básicos que, al ocurrir simultáneamente, conducen al desenlace del evento-tope (en este caso, ruptura del depósito).

- b) Habiéndose obtenido de los registros de mantenimiento los datos de fallos y reparaciones (Cuadro III), vamos a calcular, usando métodos simplificados, el número esperado de fallos al año debidos a la ruptura del depósito, asumiendo que el sistema no es reparable (o que las instalaciones para reparaciones no estén disponibles).
- c) El costo del depósito es de \$ 50.000 (unidades monetarias) y el beneficio es de \$ 1.200/hora. En la hipótesis, no hay ningún técnico de mantenimiento disponible para realizar las posibles reparaciones (el costo medio de una instalación de reparaciones es de \$ 10.000/año). Cabría preguntarse, si, realmente, merece la pena tener unas instalaciones destinadas a ese fin.
- d) En este apartado, vamos a calcular el valor relativo de cada componente del sistema.

Definiciones relativas al sistema

- Evento-tope: ruptura del depósito.
- Condiciones iniciales: llave y contactos cerrados; alarma no instalada.
- Eventualidades no consideradas:
 - fallos del cableado,
 - efectos externos,
 - defectos en el drenaje del depósito,
 - «restart» del sistema durante su ciclo de operación, tras el arranque del mismo.

Cuadro III. Datos de fiabilidad

Componente	Modo de fallo	Tasa de fallo λ (h^{-1})	Tiempo de reparación τ (h)
Depósito	Ruptura (fallo básico)	10^{-7}	500
Llave	Fallo abierto	10^{-5}	10
	Fallo cerrado	10^{-6}	10
Bobina del temporizador	Fallo energizado	2×10^{-5}	10
	Quema	10^{-4}	10
Contactos del temporizador	Fallan abiertos	10^{-4}	20
	Fallan cerrados	10^{-5}	20
Fuente de energía	Salida	10^{-6}	50
	Fallo al conectar	10^{-3}	50
Bomba	Fallo al conectar	10^{-3}	30
	Se sobrecalienta	10^{-4}	30
	Cortocircuito	10^{-4}	40
Indisponibilidad del operador: $Q = 10\% = 0,10$			

Y, ahora, seguiremos el modo de planteamiento y de solución del problema.

a) El Arbol de Fallos (AF) correspondiente al evento-tope «Ruptura del depósito» se muestra en la Figura 3.

La ecuación lógica de AF es:

$$T = X_1 + [(X_2 + X_3) \times (X_4 + X_5)]$$

Y los «Conjuntos Mínimos Catastróficos» (CMCs) son los siguientes:

CMC	MODO DE FALLO	λ (h^{-1})	τ (h)	Q
X_1	Fallo básico del depósito	10^{-7}	500	0,10
X_2	Los contactos fallan cerrados	10^{-5}	20	
eX_4	Fallo del operador			0,10
X_2	Los contactos fallan cerrados	10^{-5}	20	
eX_5	La llave falla cerrada	10^{-6}	10	0,10
X_3	La bobina falla energizada	2×10^{-5}	10	
eX_4	Fallo del operador			0,10
X_3	La bobina falla energizada	2×10^{-5}	10	
eX_5	La llave falla cerrada	10^{-6}	10	

b) Puesto que hemos considerado a los componentes como no reparables, el número esperado de fallos (NEF) al año (o indisponibilidad del sistema) vendrá dado por:

$$Q_s \text{ (8.760 horas)} = \sum_{i=1}^n Q_i^* \quad (1)$$

(n = número de CMCs)

de donde Q_i^* es la indisponibilidad (o probabilidad de ocurrencia) de cada CMC, y viene dada por:

$$Q_i^* = \prod_{j=1}^n Q_j = \prod_{j=1}^n (\lambda_j \times t) \quad (2)$$

(t = tiempo; 8.760 horas, en el ejemplo).

Si los componentes fuesen considerados reparables, tendríamos:

$$Q_j = \lambda \times \tau \quad (3)$$

y $Q_i^* = \prod_{j=1}^n Q_j$, pudiéndose llegar a la «intensidad de fallo incondicional» de cada CMC (probabilidad de que un componente, o conjunto de componentes, falle, por unidad de tiempo, en un instante t, dado que el componente ha sido reparado y vuelto a su estado normal de funcionamiento), la cual vendría dada por la expresión:

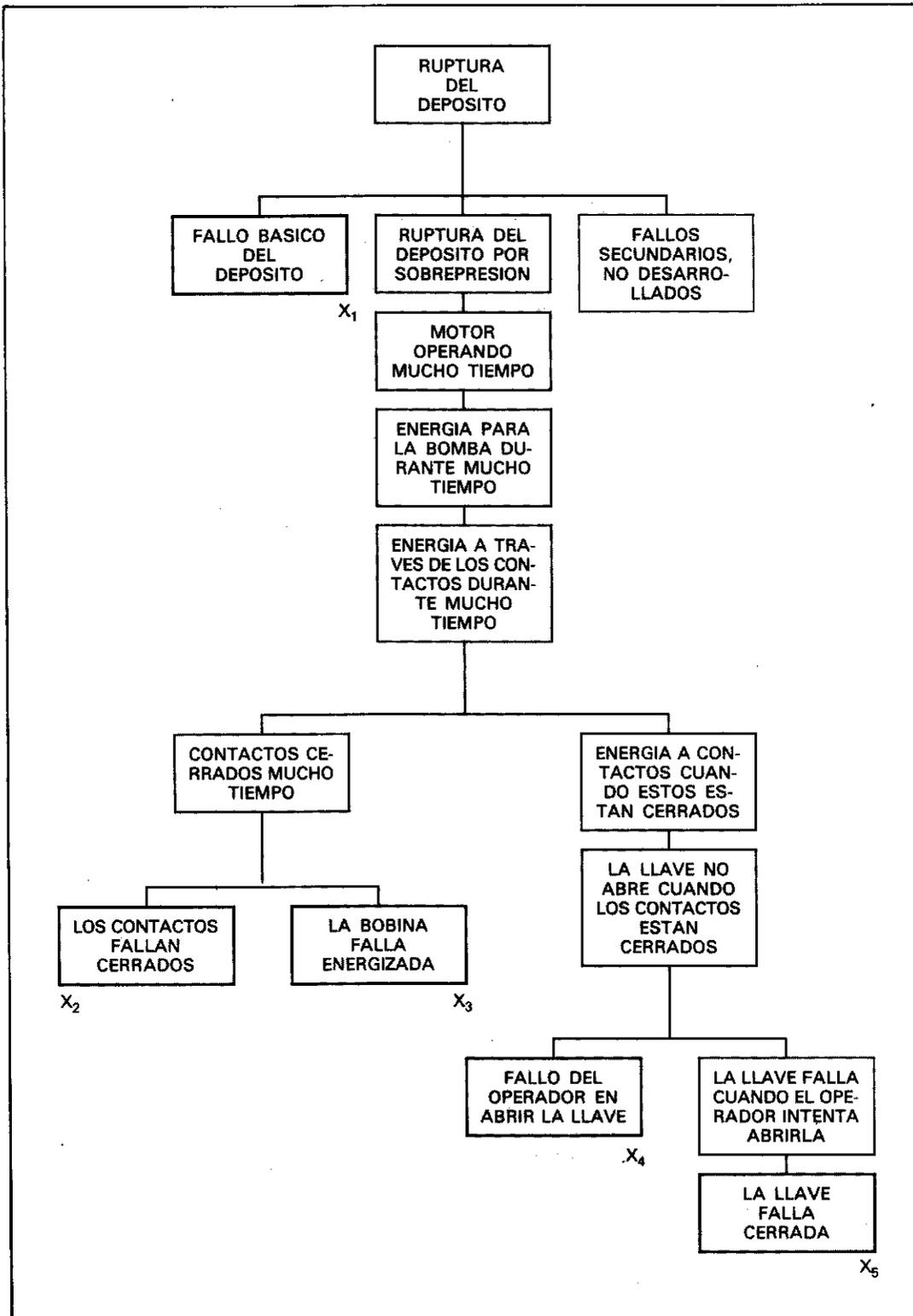


Figura 3.—Arbol de Fallos.

$$w_i^* = Q_i^* \times \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{Q_j} \cong \lambda_i^* Q_i \quad (4)$$

Para facilitar los cálculos, vamos a construir la tabla siguiente:

CMC	λ_i	NEF/año	Q_i	Q_i^*	w_i^*
X_1	10^{-7}	$8.760 \times 10^{-7} = 8,76 \times 10^{-4}$	5×10^{-5}	5×10^{-5}	10^{-7}
X_2 X_4	10^{-5}	$8.760 \times 10^{-5} \times 0,10 = 8,76 \times 10^{-3}$	2×10^{-4} 0,10	2×10^{-5}	10^{-6}
X_2 X_5	10^{-5} 10^{-6}	$8.760^2 \times 10^{-5} \times 10^{-6} = 7,67 \times 10^{-4}$	2×10^{-4} 10^{-5}	2×10^{-9}	3×10^{-10}
X_3 X_4	2×10^{-5}	$8.760 \times 2 \times 10^{-5} \times 0,10 = 1,75 \times 10^{-2}$	2×10^{-4} 0,10	2×10^{-5}	2×10^{-6}
X_3 X_5	2×10^{-5} 10^{-6}	$8.760^2 \times 2 \times 10^{-10} \times 10^{-6} = 1,53 \times 10^{-3}$	2×10^{-4} 10^{-5}	2×10^{-9}	4×10^{-10}

Con la tercera columna de la tabla, se puede calcular el NEF/año del sistema; para ello, se efectúa la suma de los valores [que hemos obtenido con la aplicación de las expresiones (1) y (2), para componentes no reparables]. Por consiguiente:

$$Q_s = Q_i^* = (8,76 \times 10^{-4}) + (8,76 \times 10^{-3}) + \dots = \underline{\underline{2,94 \times 10^{-2}}}$$

c) Si no hay ningún técnico disponible para efectuar las reparaciones, la pérdida anual esperada, debido a paralizaciones del sistema, se calcula de la siguiente forma:

– Costo de cada ruptura del depósito:

$$\begin{matrix} \$ 50.000 & + & (\$ 1.200) \times & (500) & = & \$ 650.000 \\ \downarrow & & \downarrow & \downarrow & & \\ \text{costo del} & & \text{beneficio/} & \text{tiempo de} & & \\ \text{depósito} & & \text{hora} & \text{reparación} & & \end{matrix}$$

– Y la pérdida al año esperada:

$$(2,94 \times 10^{-2}) \times (\$ 650.000) = \underline{\underline{\$ 19.110}}$$

Si existen medios para realizar el mantenimiento, entonces podemos calcular el número esperado de fallos de cada CMC mediante la expresión (4), es decir:

$$w^* = Q_i^* \times \sum_{i=1}^n \frac{i}{Q_i} \cong \lambda^*$$

Estos cálculos se encuentran en la cuarta,

quinta y sexta columnas de la tabla. Para el CMC (X_2, X_5), por ejemplo, tendríamos:

$$w^* = (2 \times 10^{-9}) \times \left\{ \frac{10^{-6}}{10^{-5}} + \frac{10^{-6}}{2 \times 10^{-4}} \right\} = 3 \times 10^{-10}$$

($\cong \lambda^* = 10^{-5} \times 10^{-6} = 10^{-11}$)

Y, en ese caso, el NEF/año del sistema sería:

$$(8.760) \times (\lambda_s) = (8.760) \times \left(\sum_{i=1}^6 w_i^* \right) =$$

$$= (8.760) \times (10^{-7} + 10^{-6} + \dots + 4 \times 10^{-10}) =$$

$$= (8.760) \times (3,1 \times 10^{-6}) = 2,72 \times 10^{-2}$$

Y el riesgo financiero:

$$(2,72 \times 10^{-2}) \times (\$ 650.000) = \underline{\underline{\$ 17.655}}$$

Por lo tanto, una instalación de reparaciones ahorraría solamente ($\$ 19.110 - \$ 17.655$) = $\$ 1.455$ /año, cantidad que no justifica su implementación. Esto se debe, principalmente, a la alta probabilidad de fallo del operador en los CMCs (X_2, X_4) y (X_3, X_4), que son los que más contribuyen al NEF.

d) A fin de establecer prioridades para la adopción de medidas preventivas, uno de los criterios que puede adoptarse es el de la importancia relativa de cada componente, que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_{\text{comp.}} = \frac{\text{Probabilidad de que ocurra el CMC que contiene el componente}}{\text{Probabilidad de fallo del sistema}}$$

Y, así, obtenemos (ver la columna NEF/año):

– Depósito

$$I_{X_1} = \frac{8,76 \times 10^{-4}}{2,94 \times 10^{-2}} = 2,97 \times 10^{-2}$$

– Contactos

$$I_{X_2} = \frac{8,76 \times 10^{-3} + 7,67 \times 10^{-4}}{2,94 \times 10^{-2}} = 0,32$$

– Bobina

$$I_{X_3} = \frac{1,75 \times 10^{-2} + 1,53 \times 10^{-3}}{2,94 \times 10^{-2}} = 0,65$$

– Operador

$$I_{X_4} = \frac{8,76 \times 10^{-3} + 1,75 \times 10^{-2}}{2,94 \times 10^{-2}} = 0,89$$

— Llave

$$I_{x_5} = \frac{7,67 \times 10^{-4} + 1,53 \times 10^{-3}}{2,94 \times 10^{-2}} = 0,08$$

Y, por consiguiente:

$$I_{x_4} > I_{x_3} > I_{x_2} > I_{x_5} > I_{x_1}$$

Como se puede comprobar, el eslabón más débil es el operador, seguido de la bobina del temporizador. El fallo básico del depósito, pese a tratarse de un CMC con tan sólo un evento, es el que menos contribuye a la probabilidad de fallo del sistema.

Los métodos simplificados que hemos utilizado en este ejemplo, se aplican con bastante frecuencia en la práctica. Sin embargo, se dan una serie de situaciones en las que, debido a la complejidad del sistema y a su variabilidad en el tiempo, deben ser aplicados conocimientos de Matemáticas superiores, especialmente de Estadística y Cálculo de Probabilidades, a fin de plantear correctamente los problemas de cuantificación de riesgos.

Afortunadamente, se dispone ya de una buena colección de programas de ordenador, que facilitan considerablemente los trabajos de análisis de fiabilidad y riesgos. Para dar al lector una idea, a continuación se relacionan algunos de ellos:

- SCHE: Convierte diagramas de bloques de fiabilidad en árboles de fallo.
- MOCUS: Obtiene los CMCs de los árboles de fallo.
- BACFIRE: Sirve de auxilio en el análisis de fallo de modo común.
- SAMPLE: Usa métodos de Montecarlo para obtener intervalos de confianza para probabilidades de fallo.
- HEUR: Calcula la fiabilidad optimizada de sistemas con restricciones de costo, peso, etc.
- MARKOV: Calcula parámetros de fiabilidad de sistemas, basado en diagramas de transición de Markov.
- RELICS: Calcula la disponibilidad (o fiabilidad) de sistemas en estado estacionario; el tiempo medio hasta fallar (TMAF) y el tiempo medio hasta la reparación (TMAR) del sistema; y la importancia relativa de cada componente.

CONCLUSION

Es muy probable que el lector de este artículo que haya entrado en contacto con este asunto por primera vez, haya encontrado algunas dificultades, especialmente en seguir el ejemplo propuesto.

Como se ha indicado más arriba, no era nuestro objetivo entrar a considerar la amplia gama de parámetros y técnicas de ingeniería de fiabilidad y de los análisis de riesgo.

Por otra parte, el primer objetivo de este artículo —que esperamos haya sido logrado— era dar al lector una visión global de las necesidades, conceptos y métodos inherentes a esta cuestión de vital importancia en nuestros días, teniendo en cuenta que las empresas (además de las crecientes exigencias en torno al cumplimiento de su función social y de la preservación del medio ambiente, entre otras) están insertas en un mercado cada vez más competitivo.

Esta competitividad se caracteriza, y se ha caracterizado siempre, por los requisitos de calidad, fiabilidad, seguridad, mantenibilidad y disponibilidad de sistemas y productos, los cuales, a fin de cuentas, se traducen a una sola palabra: productividad.

Para optimizarla, nada hay como considerar, ya desde la planificación estratégica de la organización, los riesgos inherentes a la actividad empresarial y las maneras de administrarlos, moderna y científicamente.

BIBLIOGRAFIA

1. DE CICCIO, FRANCESCO M.G.A.F.: "Brasil, 1980: estatísticas de accidentes de trabalho". São Paulo, FUNDACENTRO, 1982, p. 53.
2. DE CICCIO, FRANCESCO M.G.A.F., y FANTAZZINI, MÁRIO LUIZ: "Técnicas modernas de gerência de riscos". São Paulo, IBGR, 1985, p. 181.
3. HENLEY, ERNEST, y KUMAMOTO, HIROMITSU: "Reliability engineering assessment". Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1981, p. 561.
4. LEWIS, ELMER E.: "Introduction to reliability engineering". Nueva York, John Wiley & Sons, 1987, p. 400.

