



**Dirección General
de Protección Civil**



GUIA TECNICA
Métodos cuantitativos
para el análisis de riesgos

	Pág.
PRESENTACION	5
CAPITULO 1. INTRODUCCION	11
1.1 Objeto	13
1.2 Alcance	13
1.3 Consideraciones generales	14
CAPITULO 2. METODOS PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS	17
2.0 Introducción	19
2.1 Bases matemáticas	19
2.1.1 Teoría de probabilidades	19
2.1.2 Estadística	28
2.2 Fiabilidad: conceptos básicos	31
2.2.1 Fiabilidad/disponibilidad de distintos tipos de componen- tes	31
2.2.2 Tasa de fallos	36
2.2.3 Leyes de distribución de la tasa de fallos	39
2.2.4 Fiabilidad y disponibilidad de un sistema	41
2.3 Determinación de la tasa de fallo de un suceso básico ...	42
2.3.1 Consideraciones generales	42
2.3.2 Banco de datos de fiabilidad de componentes	46
2.3.3 Determinación del fallo humano	49
2.4 Determinación de frecuencias de sucesos complejos	58
2.4.1 Método del árbol de fallos	58
2.4.1.1 <i>Descripción</i>	58
A) Elaboración del árbol de fallos	61
B) Cuantificación del árbol de fallos	62
C) Análisis de incertidumbre	63
D) Análisis de importancia	65
2.4.1.2 <i>Ambito de aplicación</i>	67
2.4.1.3 <i>Recursos necesarios</i>	67
2.4.1.4 <i>Soportes informáticos</i>	68

2.4.1.5	<i>Ventajas/inconvenientes</i>	68
2.4.1.6	<i>Ejemplos</i>	70
	A) Descripción del árbol de fallos.....	70
	B) Resultados cualitativos	79
	C) Resultados cuantitativos	81
	D) Análisis de importancia	83
	E) Análisis de incertidumbre.....	86
	F) Mejoras a introducir	87
2.4.2	Método del árbol de sucesos	92
2.4.2.1	<i>Descripción</i>	92
2.4.2.2	<i>Ambito de aplicación</i>	94
2.4.2.3	<i>Recursos necesarios</i>	94
2.4.2.4	<i>Soportes informáticos</i>	94
2.4.2.5	<i>Ventajas/inconvenientes</i>	95
2.4.2.6	<i>Ejemplos</i>	95
2.4.3	Método del Análisis de causas/consecuencias	98
2.4.4	Métodos para la determinación del fallo de modo común.	99
2.4.4.1	<i>Descripción</i>	99
	A) Clasificación de los fallos de causa común	99
	B) Técnicas de evaluación	100
2.4.4.2	<i>Ejemplos</i>	102
2.4.5	Análisis de importancia	104
2.4.6	Resumen	104
CAPITULO 3. METODOS PARA EL CALCULO DE LOS ALCANCES DE DETERMINADOS EFECTOS		107
CAPITULO 4. METODOS PARA EL CALCULO DE DAÑOS		113
CAPITULO 5. METODOS PARA LA DETERMINACION DEL RIESGO.		117
5.1	Conceptos generales	119
5.1.1	Riesgo global e individual	119
5.1.2	Riesgo social	120
5.1.3	Riesgo de muerte y daños	121
5.1.4	Otros conceptos	122

5.2	Cálculo del riesgo	123
5.3	Curvas de isorriesgo	124
5.4	Métodos alternativos de determinación del riesgo	125
5.5	Criterios de aceptación	126
5.6	Ejemplos	127

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Grados de estado de componentes	34
Figura 2.2	Disponibilidad de un componente reparable y no reparable	36
Figura 2.3	Curva de la bañera	37
Figura 2.4	Curvas de la bañera para distintos tipos de componentes.	38
Figura 2.5	Representaciones gráficas de diferentes leyes de distribución	39
Figura 2.6	Disponibilidad de un componente reparable y sometido a revisiones periódicas	44
Figura 2.7	Metodología SHARP	50
Figura 2.8/I	Esquema general de la técnica THERP	52
Figura 2.8/II	Ejemplo de la técnica THERP	54
Figura 2.9	Ejemplo de la técnica OAT	55
Figura 2.10	Ejemplo de la técnica HCR	56
Figura 2.11	Método TESEO	57
Figura 2.12	Método del árbol de fallos. Ejemplo: Esquema del depósito de amoníaco	71
Figura 2.13	Método del árbol de fallos. Ejemplo: Arbol de fallos de la rotura de depósito de amoníaco 72, 73, 74 y	75
Figura 2.14	Esquema general de un árbol de sucesos	93
Figura 2.15	Método del árbol de sucesos. Ejemplo	96
Figura 3.1	Evolución de un escape de fluido	110
Figura 5.1/I	Definición de probabilidad de ocurrencia según el RMPP	125
Figura 5.1/II	Definición de severidad de consecuencias según el RMPP	126
Figura 5.2	Ejemplo de curvas isorriesgo	134
Figura 5.3	Ejemplo de una curva de riesgo social publicada por el HSE	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Propiedades de una Algebra de Boole 21, 22, 23, 24 y	25
Tabla 2.2	Características de distintas distribuciones	40
Tabla 2.3	Fiabilidad de un sistema	41
Tabla 2.4	Modelos de representación de la in fiabilidad/indisponibi- lidad de un sistema	45 y 46
Tabla 2.5	Bancos de datos de fiabilidad de componentes	47
Tabla 2.6	Simbología del árbol de fallos	60
Tabla 2.7	Códigos de cálculo de árboles de fallos	69
Tabla 2.8	Relación de componentes básicos para el ejemplo de árbol de fallos	76, 77 y 78
Tabla 2.9	Resumen de técnicas para la determinación de frecuen- cias	105
Tabla 3.1	Modelos de cálculo de alcance de determinados efectos.	112
Tabla 5.1	Resumen de la evaluación del riesgo en la situación ac- tual de la instalación	128 y 129
Tabla 5.2	Resumen de la evaluación del riesgo en situación mejo- rada de la instalación	132 y 133

ABREVIATURAS

ACR Análisis Cuantitativo de Riesgos.

PRESENTACION

Los Reales Decretos 886/1988 y 952/1990, junto con la Directriz Básica para la Elaboración y Homologación de los Planes Especiales del Sector Químico, constituyen la normativa estatal de aplicación de la Directiva 82/501/CEE y modificaciones, relativa a la Prevención de Accidentes Mayores en determinadas actividades industriales.

La Directriz Básica fue desarrollada con el objeto de establecer, sin menoscabo de las competencias de las Comunidades Autónomas en esta materia, los requisitos exigibles a los planes de emergencia del sector químico, considerándose un documento autosuficiente para la elaboración de dichos planes.

Para facilitar la aplicación de la Directriz Básica, sobre todo en lo que se refiere a ciertos aspectos técnicos, se dispuso que habrían de elaborarse unas Guías Técnicas de **carácter recomendatorio general**, para la revisión o el desarrollo de ciertos documentos técnicos previstos en la misma.

Con este fin, la Dirección General de Protección Civil ha elaborado, entre otras, una trilogía de guías que describen las distintas metodologías de Análisis de Riesgos existentes, presentando la primera de ellas una visión general de conjunto, para pasar a especificar en las otras dos las metodologías de análisis cualitativos y las metodologías de análisis cuantitativos, fijando criterios de selección para la elección de uno u otro método.

El desarrollo de estas Guías Técnicas se ha basado en el análisis de documentos publicados en otros países con propósitos similares y en las experiencias obtenidas de su aplicación.

Esta Dirección General de Protección Civil considera que, con las presentes Guías, se ha conseguido una herramienta de trabajo y consulta eficaz para los órganos de las Administraciones Públicas que han de revisar y aprobar los correspondientes estudios de seguridad, objetivo inicial, así como para los industriales de las empresas que estén o no afectadas por la legislación citada, y para aquellas organizaciones, entidades o personas interesadas en las metodologías de análisis de riesgos.

FRANCISCO CRUZ DE CASTRO
Director General de Protección Civil

1.1 OBJETO

Esta Guía junto con la Guía Técnica: «Métodos cualitativos para el análisis de riesgos» completa y profundiza la Guía Técnica: «Metodologías para el análisis de riesgos. Visión general».

Su objeto consiste en describir y analizar los distintos métodos cuantitativos que se pueden utilizar para completar tres de las etapas principales de un análisis de riesgos: la determinación de las frecuencias de los sucesos considerados, la evaluación de sus consecuencias (de forma muy general) y, por último, el cálculo del riesgo.

Como tal esta Guía encuentra su principal aplicación en los Análisis Cuantitativos de Riesgos, ACR en adelante.

Con la elaboración de esta guía, encuadrada en la colección de Guías Técnicas que la Dirección General de Protección Civil está realizando, termina la trilogía que, sobre *Metodologías de Análisis de Riesgos en el Sector Químico*, estaba previsto realizar en la Directriz Básica del Riesgo Químico.

1.2 ALCANCE

Con respecto del alcance de esta Guía destacan dos puntos fundamentales.

En primer lugar, no se pretende un desarrollo exhaustivo de todos los conceptos matemáticos asociados al cálculo de frecuencias, sino una presentación breve y práctica de las nociones elementales aplicables.

En segundo término, conviene resaltar que algunos de los aspectos que se citan (fallo humano, fallo de modo común, etc.) todavía no tienen un tratamiento totalmente satisfactorio y se estudian actualmente alternativas. La guía expone los métodos existentes hoy en día con sus limitaciones, también derivadas del hecho de que han sido desarrolladas para su aplicación al campo nuclear.

Para cada uno de los métodos que contempla esta Guía se consideran los siguientes apartados:

-
- Descripción del método.
Se hace una presentación general del método.
 - Ambito de aplicación.
Se indica cuáles son las aplicaciones principales de la técnica empleada.
 - Recursos necesarios:
Se citan los recursos materiales y humanos que requiere el uso de la técnica empleada.
 - Soportes informáticos:
Se reseñan los códigos de ordenador que se pueden utilizar para facilitar la aplicación del método.
 - Ventajas e inconvenientes:
Se señalan los principales beneficios y desventajas que puede reportar la aplicación del método.
En su caso, también se hace una comparación con otros métodos parecidos.
 - Ejemplos:
Se ilustra el método con uno o varios casos prácticos extraídos generalmente de estudios reales.

Se agrupan todos los métodos en un cuadro resumen al final de cada capítulo.

1.3 CONSIDERACIONES GENERALES

Los ACR difícilmente pueden conducir a unos valores de riesgos absolutos, por lo que se pone especial énfasis a la determinación en todos y cada uno de los cálculos, de los márgenes de incertidumbre sobre los resultados. Las razones que justifican esta situación son múltiples:

- Resultan escasos los datos de fiabilidad genéricos en el campo químico. Esto es debido en parte a la gran diversidad de instalaciones existentes y a la poca experiencia industrial, hasta el momento, de recogida y puesta en común de datos en este campo.

- Existen al mismo tiempo, dificultades en la aplicación de datos generales a plantas muy distintas en cuanto a tipo de componentes, condiciones de operación, etc.
- La disparidad de los criterios adoptados por quienes elaboran bs estudios pueden conducir a variaciones significativas en cuanto a los valores de riesgo.
- Los modelos utilizados presentan una serie de limitaciones que, a su vez condicionan los resultados, etc.

Sin embargo, los métodos cuantitativos, encuentran su justificación frente a los cualitativos en una serie de aspectos:

- La determinación de frecuencias accidentales, por ejemplo, facilita la planificación territorial ya que el dimensionado de los recursos se suele llevar a cabo sobre la base de «accidentes» más probables.
- El cálculo de frecuencias está estrechamente ligado, en la mayoría de los casos, al estudio de las causas por las cuales se produce un accidente; en esta medida, incide directamente sobre la prevención de accidentes, que no deja de ser el objetivo último de estos estudios.
- El cálculo de frecuencias constituye también una base de comparación para evaluar el efecto de determinadas mejoras en la instalación, con el fin de reducir el riesgo derivado de la misma.
- Constituyen una base para determinar los riesgos individuales y sociales.

2.0 INTRODUCCION

En un análisis cuantitativo de riesgos existe la necesidad de cuantificar la frecuencia o probabilidad de una serie de sucesos, en el sentido más amplio del término. Básicamente, se puede considerar la necesidad de cuantificación de los siguientes sucesos:

Iniciadores: En esta categoría se incluyen sucesos externos, fallos de operación, humanos o pérdidas de inventario. Estos sucesos tienen una determinada frecuencia de ocurrencia en el tiempo, generalmente expresada en ocasiones por año.

Los sucesos que condicionan la evolución de un suceso iniciador: En esta categoría se incluyen indisponibilidades de sistemas de seguridad, fenómenos físicos (ignición, explosión, etc.). Estos sucesos se caracterizan por su probabilidad de ocurrencia.

Se considera *Suceso Básico* a un evento simple cuya frecuencia/probabilidad se puede determinar de forma directa.

Se distinguen de los *Sucesos Complejos* para los cuales la obtención de la frecuencia/ probabilidad no es inmediata.

En este capítulo se describen en primer lugar las bases matemáticas de la teoría de probabilidades y estadística; a continuación se presentan los métodos de obtención de las frecuencias/probabilidades de los sucesos simples; y, por último, se describen los métodos a utilizar para calcular sucesos complejos.

2.1 BASES MATEMATICAS

La determinación cuantitativa de las frecuencias de los accidentes se basa en la teoría matemática de las probabilidades de la cual se hace una breve exposición.

2.1.1 Teoría de probabilidades

Se define un *experimento aleatorio* como cualquier proceso de observaciones cuyos resultados son no determinísticos, es decir que existe más de una posibilidad de resultado. Es el típico caso del lanzamiento de un dado.

La totalidad de los resultados posibles de un experimento recibe el nombre de *espacio muestral*. Los resultados de un experimento se pueden considerar como elementos del espacio muestral que puede ser discreto (número finito o infinito numerable de elementos) o continuo.

Se denomina *suceso* al resultado o conjunto de resultados de un experimento que, por tanto, puede definirse como un subconjunto determinado de un espacio muestral.

La teoría de conjuntos permite llevar a cabo una serie de combinaciones sobre los conjuntos a través de tres operaciones: la *unión* (\cup), la *intersección* (\cap) y la *complementariedad* (\bar{A} , notación de complementario de un conjunto A) de conjuntos.

Se pueden definir los siguientes tipos de sucesos:

Suceso cierto es aquel que ocurre siempre. El subconjunto asociado es el espacio muestral entero.

Suceso imposible es aquel que nunca se produce como consecuencia de un experimento. El subconjunto asociado es el conjunto vacío.

Sucesos idénticos son sucesos que se producen o no simultáneamente para cada observación del experimento.

Suceso complementario (\bar{A}) o contrario de un suceso determinado, es el que ocurre siempre y cuando no ocurra el suceso y viceversa.

Sucesos incompatibles, mutuamente independientes o también excluyentes, son sucesos que no pueden ocurrir al mismo tiempo.

Suceso dependiente o condicionado (A/B), es el suceso (A) cuya ocurrencia viene condicionada por la ocurrencia de otro suceso (B).

Se dice que S , un subconjunto de sucesos del espacio muestral, tiene una estructura de álgebra de Boole con respecto de las operaciones de unión, intersección y complementariedad, cuando el espacio muestral es finito.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Las propiedades que caracterizan un álgebra de Boole son las reseñadas en la tabla 2.1 (según *Fault Tree Handbook* 1986), donde se indican también la representación de los diagramas de Venn.

Se considera que una álgebra de sucesos es una sigma-álgebra cuando el espacio muestral es además contable.

TABLA 2.1/I PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE

Notación matemática	Notación técnica	Nombre
(1a) $X \cap Y = Y \cap X$	$X \cdot Y = Y \cdot X$	Ley Conmutativa
(1b) $X \cup Y = Y \cup X$	$X + Y = Y + X$	
(2a) $X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$	$X \cdot (Y \cdot Z) = (X \cdot Y) \cdot Z$	Ley asociativa
(2b) $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$	$X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$	
(3a) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$	$X \cdot (Y + Z) = (X \cdot Y) + (X \cdot Z)$	Ley Distributiva
(3b) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$	$X + (Y \cdot Z) = (X + Y) \cdot (X + Z)$	
(4a) $X \cap X = X$	$X \cdot X = X$	Ley de Impotencia
(4b) $X \cup X = X$	$X + X = X$	
(5a) $X \cap (X \cup Y) = X$	$X \cdot (X + Y) = X$	Ley de Absorción
(5b) $X \cup (X \cap Y) = X$	$X + X \cdot Y = X$	
(6a) $X \cap \bar{X} = \emptyset$	$X \cdot \bar{X} = \emptyset$	Complementariedad
(6b) $X \cup \bar{X} = \Omega = 1$	$X + \bar{X} = \Omega = 1$	
(6c) $\overline{(\bar{X})} = X$	$\overline{(\bar{X})} = X$	
(7a) $\overline{(X \cap Y)} = \bar{X} \cup \bar{Y}$	$\overline{(X \cdot Y)} = \bar{X} + \bar{Y}$	Teorema de Morgan
(7b) $\overline{(X \cup Y)} = \bar{X} \cap \bar{Y}$	$\overline{(X + Y)} = \bar{X} \cdot \bar{Y}$	
(8a) $\emptyset \cap X = \emptyset$	$\emptyset \cdot X = \emptyset$	Operaciones con \emptyset y Ω
(8b) $\emptyset \cup X = X$	$\emptyset + X = X$	
(8c) $\Omega \cap X = X$	$\Omega \cdot X = X$	
(8d) $\Omega \cup X = \Omega$	$\Omega + X = \Omega$	
(8e) $\bar{\emptyset} = \Omega$	$\bar{\emptyset} = \Omega$	
(8f) $\bar{\Omega} = \emptyset$	$\bar{\Omega} = \emptyset$	
(9a) $X \cup (X \cap Y) = X \cup Y$	$X + (X \cdot Y) = X + Y$	Estas referencias no tienen nombre pero son frecuentemente utilizadas en los procesos de reducción
(9b) $\bar{(X \cap X \cup Y)} = \bar{X} \cap \bar{Y} = \bar{(X \cup Y)}$	$\bar{(X \cdot (X + Y))} = \bar{X} \cdot \bar{Y} = \bar{(X + Y)}$	

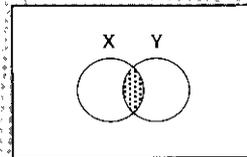
* Ω : Espacio muestral. En notación técnica, se substituye a menudo por 1 y \emptyset por 0.
 †: Conjunto vacío.

TABLA 2.1/II PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE

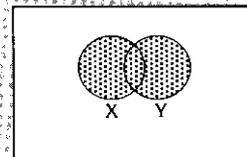
NOTACION MATEMATICA.

DIAGRAMA DE VENN.

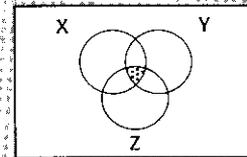
(1a) $X \cap Y = Y \cap X$



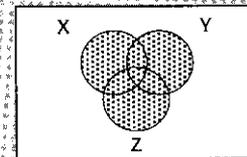
(1b) $X \cup Y = Y \cup X$



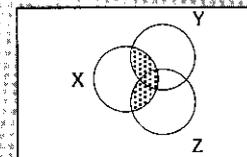
(2a) $X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z$



(2b) $X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z$



(3a) $X \cap (Y \cup Z) = (X \cap Y) \cup (X \cap Z)$



(3b) $X \cup (Y \cap Z) = (X \cup Y) \cap (X \cup Z)$

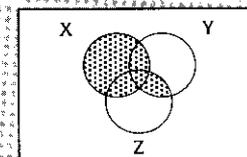


TABLA 2.1/III PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE

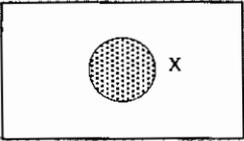
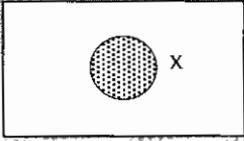
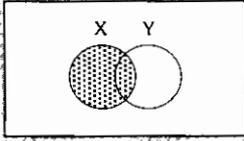
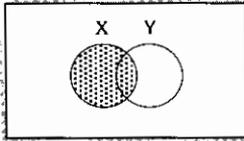
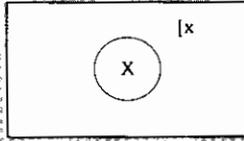
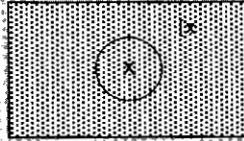
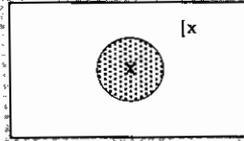
NOTACION MATEMATICA	DIAGRAMA DE VENN
(4a) $X \cap X = X$	
(4b) $X \cup X = X$	
(5a) $X \cap (X \cup Y) = X$	
(5b) $X \cup (X \cap Y) = X$	
(6a) $X \cap \bar{X} = \emptyset$	
(6b) $X \cup \bar{X} = Q = 1^*$	
(6c) $\overline{(\bar{X})} = X$	

TABLA 2.1/IV PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE

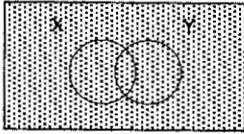
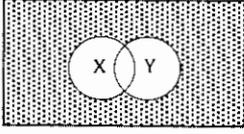
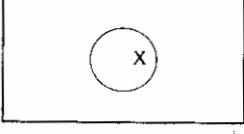
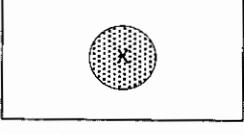
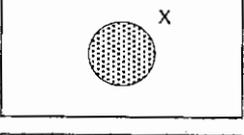
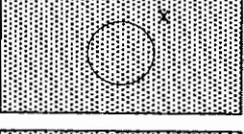
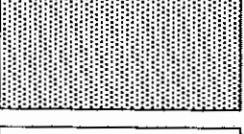
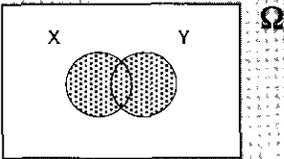
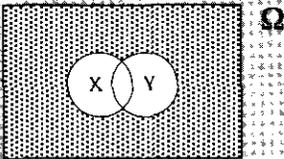
NOTACION MATEMATICA	DIAGRAMA DE VENN
(7a) $[(X \cap Y) = [X \cup Y]$	
(7b) $[(X \cup Y) = [X \cap Y]$	
(8a) $\emptyset \cap X = \emptyset$	
(8b) $\emptyset \cup X = X$	
(8c) $\Omega \cap X = \Omega$	
(8d) $\Omega \cup X = \Omega$	
(8e) $[\emptyset = \Omega$	
(8f) $[\Omega = \emptyset$	

TABLA 2.1/V PROPIEDADES DE UN ALGEBRA DE BOOLE

NOTACION MATEMATICA	DIAGRAMA DE VENN
(9a) $X \cup (X \cap Y) = X \cup Y$	
(9b) $X \cap (X \cup Y) = X \cap Y = (X \cup Y)$	

Definición de la función probabilidad

En un experimento aleatorio se pueden obtener una serie de resultados: A, B,...Z. Se repite N veces el experimento y se obtiene n veces el resultado A. La frecuencia relativa del suceso «obtención de A» es n/N.

Se define la probabilidad de obtención del resultado A como:

$$P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N}$$

Esta definición empírica de la probabilidad, conocida como interpretación frecuencial de la probabilidad, se formaliza matemáticamente de la siguiente manera:

Dado un espacio muestral finito Ω y un suceso A de Ω, se define la probabilidad de A, P(A), como el valor de la función de probabilidad P que cumple los siguientes axiomas:

1. Para cualquier suceso A de Ω, $0 \leq P(A) \leq 1$
2. $P(\Omega) = 1$
3. Si A y B son sucesos mutuamente excluyentes de Ω, $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

Como consecuencia de esta definición se cumplen las siguientes propiedades:

Si $P(A) = 1$, A es el suceso cierto.

Si $P(A) = 0$, A es el suceso imposible

$P(\bar{A}) = 1 - P(A)$

siendo \bar{A} el suceso complementario de A (definido pág. 20).

Los teoremas fundamentales de la función de probabilidad son los siguientes:

Teorema de las probabilidades totales o de Poincaré:

Permite calcular la probabilidad de la unión de N sucesos A_i :

$$P(\cup_{i=1, N} A_i) = \sum_1^N P(A_i) - \sum_{i,j \text{ } i \neq j}^N P(A_i \cap A_j) + \sum_{i,j,k \text{ } i \neq j \neq k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) + \dots + (-1)^{N-1} P(A_1) \dots P(A_N)$$

donde, A_i es uno de los N sucesos considerados y $p(A_i)$ su probabilidad. El primer sumando representa la suma de las probabilidades de los sucesos considerados y los restantes términos la resta/suma de las intersecciones de dos a dos, tres a tres, etc. de los sucesos.

En el caso particular de dos sucesos, la expresión se simplifica a:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

Teorema de las probabilidades compuestas

Este teorema permite calcular la probabilidad de sucesos condicionados. Cualquiera que sean los sucesos A y B del espacio muestral:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B/A) \text{ si } P(A) \neq 0 \text{ (1)}$$

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A/B) \text{ si } P(B) \neq 0 \text{ (2)}$$

donde $p(A/B)$ representa la probabilidad de que, habiendo ocurrido el suceso B, se produzca el suceso A (ver pág. 20).

2. Métodos para la determinación de frecuencias

En el caso particular de sucesos independientes se verifica:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$

Teorema de Bayes

Este teorema amplía el anterior proporcionando una expresión más general que permite calcular la probabilidad de que ocurra un determinado suceso A_i (entre sucesos excluyentes que definen un espacio muestral), condicionado por la ocurrencia de un suceso B , que ocurre siempre y cuando se produce al menos uno de estos sucesos A_i .

Este teorema también se denomina el teorema de la probabilidad de las causas, porque conocidas las probabilidades $p(A_i)$ –o probabilidades a priori–, permite calcular las probabilidades $p(A_i/B)$ o probabilidades a posteriori.

Para cualquier conjunto de n sucesos mutuamente excluyentes A_i que definen el espacio muestral, se cumple:

$$\sum_{i=1}^n p(A_i) = 1$$

La probabilidad de que se produzca B es:

$$p(B) = p(A_1 \cap B) + p(A_2 \cap B) + \dots$$

aplicando el teorema de las probabilidades compuestas:

$$p(B) = p(A_1) \cdot p(B/A_1) + p(A_2) \cdot p(B/A_2) + \dots$$

Es decir:

$$p(B) = \sum_{i=1}^n p(A_i) p(B/A_i) \quad (3)$$

Por otra parte, partiendo del teorema citado e igualando los dos términos de la derecha de las expresiones (1) y (2) de la pág. 26, se tiene:

$$p(A_i) \cdot p(B/A_i) = p(B) \cdot p(A_i/B)$$

De donde:

$$p(A_i/B) = \frac{p(B/A_i) \cdot p(A_i)}{p(B)}$$

Sustituyendo $p(B)$ por el valor obtenido en (3) se obtiene la probabilidad de que ocurra uno de los sucesos excluyentes A_i , dado que se ha producido el suceso B es:

$$p(A_i/B) = p(B/A_i) \cdot p(A_i) / \sum_{i=1}^n p(A_i) p(B/A_i)$$

Esta expresión deducida para el caso discreto, tiene su equivalente para funciones de distribución continuas. Bajo esta forma, este teorema encuentra una de sus aplicaciones en el caso de los bancos de datos de fiabilidad.

Partiendo de una distribución estadística a priori genérica para la fiabilidad de un determinado tipo de componente, se puede obtener su distribución estadística a posteriori, teniendo en cuenta los resultados de unas pocas pruebas sobre una muestra de componentes específicos. Como ejemplos de esta aplicación se podrían citar:

- Para calcular la distribución correspondiente a la fiabilidad de un componente de diseño nuevo se puede partir de la distribución correspondiente a los componentes de diseño más antiguo (distribución a priori) y se contrasta con los resultados obtenidos sobre una muestra reducida de componentes de nuevo diseño. La distribución a posteriori es una modificación de la distribución ya existente que toma en cuenta las evidencias observadas sobre la muestra.
- Para generar un banco de fiabilidad de componentes en una instalación en la cual por distintos motivos existen muy pocos datos de fiabilidad disponibles (planta con poca experiencia operativa, por ejemplo), se puede partir de los datos de un banco genérico (resumen de datos de fuentes dispersas) y obtener, alterando las distribuciones sobre la base de los pocos datos disponibles, unas distribuciones más próximas a la realidad de la instalación.

2.1.2 Estadística

En la mayoría de los casos, en un experimento aleatorio interesa además del resultado, una descripción numérica determinada (por ejemplo probabilidad de que el número de fallos en un ensayo sea uno, dos, etc.)

Se define como *variable aleatoria* a una función X que asocia valores numéricos a elementos del espacio muestral.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Se define la *función de probabilidad* (también denominada función de densidad o ley de probabilidad) de la variable aleatoria a la función $f(x)$ que asocia a cada valor de la variable aleatoria la probabilidad de que la variable tome este valor.

Una *variable aleatoria discreta* se puede representar como:

$$f(x_i) = P \{X = x_i\}$$

donde x_1, \dots, x_n son los n posibles valores discretos de la variable aleatoria X (pudiendo ser n infinito; P es la función de probabilidad y f la ley de probabilidad. Como consecuencia de la definición de probabilidad se cumple:

$$\sum_{i=1}^n f(x_i) = 1$$

$f(x) \geq 0$ para cualquier x

Para una *variable aleatoria continua* se extiende la expresión anterior a:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot dx = 1$$

Se define a la *función de distribución de la variable aleatoria* (también denominada función de densidad acumulada) a la función $F(x)$:

$$F(x_n) = P \{X \leq x_n\}$$

De forma que la probabilidad de que X sea inferior o igual a $x_{n'}$ es:

$$F(x_{n'}) = \sum_{i=1}^{n'} f(x_i)$$

(variable aleatoria discreta)

$$= \int_{-\infty}^{x_{n'}} f(x) dx$$

(variable aleatoria continua)

$F(x)$ es una función monótona creciente, varía entre $[0,1]$ y será discreta o continua según la variable aleatoria.

Los parámetros más importantes de una variable aleatoria se expresan en función de la ley de densidad de la siguiente forma.

Media o esperanza matemática: es la ponderación de los distintos valores posibles en función de sus densidades correspondientes.

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x_i)$$

(variable aleatoria discreta)

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx$$

(variable aleatoria continua)

Varianza: es la medida de la dispersión de los valores con respecto de la media.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 f(x_i) \quad (v. a. discreta)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (v. a. continua)$$

Mediana: Es el valor x_m de la variable aleatoria X para el cual la probabilidad de obtener un valor inferior es $1/2$.

$$\sum_{k=m}^n f(x_k) = \sum_{k=1}^m f(x_k) = 1/2 \quad (v. a. discreta)$$

$$\int_{-\infty}^{x_m} f(x) dx = \int_{x_m}^{+\infty} f(x) dx = 1/2 \quad (v. a. continua)$$

Moda: Es el valor de X para el cual la función $f(x)$ es máxima.

2.2 FIABILIDAD: CONCEPTOS BASICOS

2.2.1 Fiabilidad/disponibilidad de distintos tipos de componentes

Se puede definir un *sistema* como una entidad determinística que comprende un conjunto discreto de elementos que interaccionan.

Se denomina *componente* a cualquier elemento de un sistema.

La definición más ampliamente admitida de la *fiabilidad de un componente* es: «probabilidad de que desempeñe la función para la cual ha sido diseñado bajo una condiciones determinadas y durante un espacio de tiempo especificado». En esta definición se desprenden cuatro conceptos importantes:

1. La importancia de las condiciones de trabajo del componente.
2. La definición de la función del componente que implícitamente conduce a la noción de fallo o *modo de fallo*.
3. La dependencia respecto del tiempo.
4. Tal como se define es una probabilidad y por tanto es un valor comprendido entre [0,1].

Fallo de un componente: puede abarcar desde la pérdida de prestaciones o no funcionamiento a pleno rendimiento, hasta una interrupción completa de la misión a realizar (fallo catastrófico).

Modo de fallo: se puede definir como la modalidad mediante la cual el componente deja de funcionar. Va estrechamente unido a la causa que produce el fallo o al modelo matemático utilizado para representarlo. Ejemplo: no apertura de una válvula de seguridad o apertura intempestiva.

La expresión matemática general de la fiabilidad $R(t)$ de un componente que está operando, es:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (0)$$

donde t es el tiempo de operación considerado y $\lambda(t)$ es la tasa de fallo del componente. Esta expresión se deduce del siguiente desarrollo.



Se define en primer lugar la variable aleatoria z como: «instante en que se produce el fallo de un sistema».

La función de distribución $F(t)$ de esta variable aleatoria se define, entonces, como la probabilidad de que el sistema falle entre el instante $t = 0$ y t . Se supone que el sistema está operativo en el instante $t = 0$.

$$F(t) = P \{z \leq t\}$$

$F(t)$: función de distribución de la variable aleatoria Z .

z : instante del fallo.

t : tiempo.

$P \{ \}$: probabilidad.

La probabilidad complementaria de $F(t)$ o probabilidad de que el sistema sobreviva a un tiempo t se define como la fiabilidad del sistema $R(t)$:

$$R(t) = 1 - F(t) = P \{z > t\} \quad (1)$$

La función de densidad de la variable aleatoria representa la probabilidad de que el fallo ocurra entre t y $t + \Delta t$.

$$f(t) \Delta t = P \{t \leq z \leq t + \Delta t\} \quad (2)$$

se cumple también que:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt} \quad (3)$$

Se define a la tasa de fallos instantánea $\lambda(t)$, de tal forma que, $\lambda(t) \Delta t$, representa, la probabilidad de que el fallo del sistema ocurra entre t y $t + \Delta t$, suponiendo que estaba operativo en t . Es decir:

$$\lambda(t) \Delta t = P \{t < z < t + \Delta t / z > t\} \quad (4)$$

Esta probabilidad es una probabilidad condicionada de dos sucesos y tal como se indicaba en la pág. 26 (Teorema de las probabilidades compuestas) puede escribirse como:

$$P \{t < z < t + \Delta t / z > t\} = \frac{P \{t < z < t + \Delta t \cap z > t\}}{P \{z > t\}}$$



2. Métodos para la determinación de frecuencias

que a su vez es igual a:

$$\frac{P\{t < Z < t + \Delta t\}}{P\{Z > t\}}$$

en esta expresión se identifica (1) y (2) por lo que substituyendo en (4) resulta:

$$\lambda(t) \Delta t = \frac{F(t) \Delta t}{R(t)} \quad (5)$$

de donde y utilizando (3):

$$\lambda(t) = \frac{-dR(t)}{dt R(t)}$$

es decir,

$$\lambda(t) dt = \frac{-dR(t)}{R(t)}$$

Integrando entre 0 y t:

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{-dR(t)}{R(t)} = -\ln [R(t)]$$

ya que $R(0) = 1$ (el sistema esta operativo en el instante $t = 0$).

De donde, finalmente se obtiene la expresión general de la fiabilidad de un sistema (expresión (0) de la página 31):

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (0)$$

Esta expresión es una función de distribución tal como se definió en el apartado 2.1.2 y su función de densidad de fallos se expresa, tal como se indica en la expresión (3) de la pág. 32, como derivada de la fiabilidad con respecto del tiempo; así:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (6)$$

(ya que $f(t) = \lambda(t) \cdot R(t)$ ver (5))

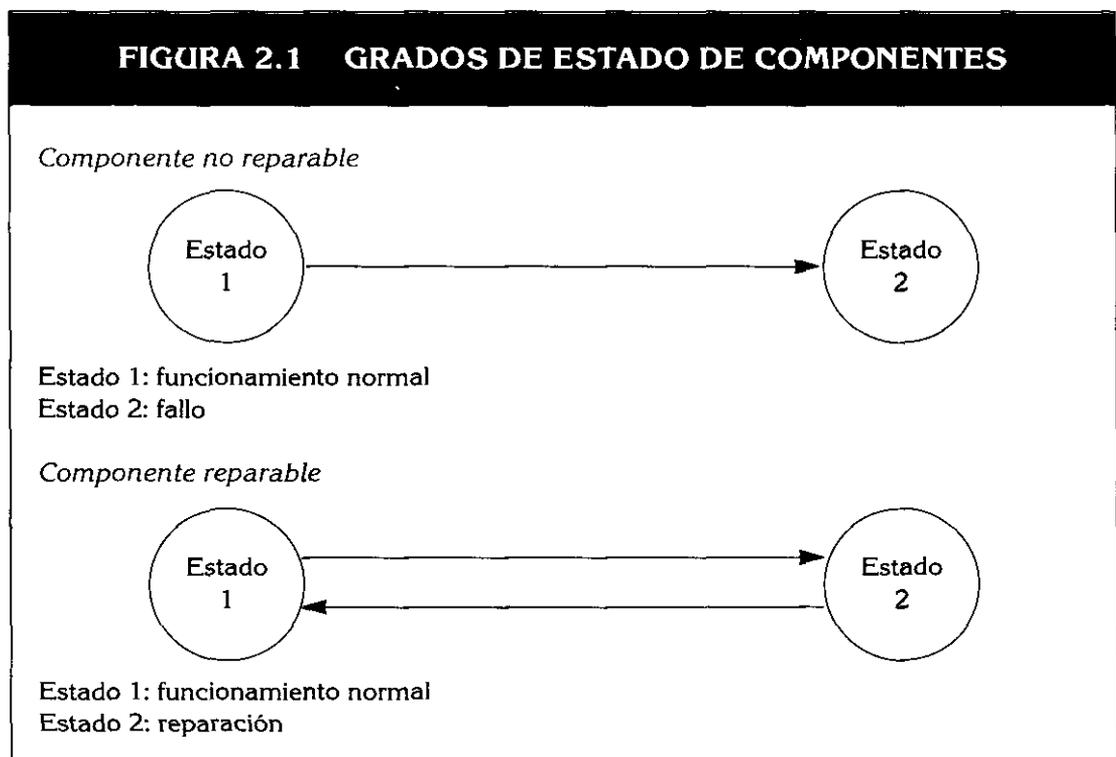
La media o esperanza matemática de esta función se conoce como *MTTF* (*Mean Time To Failure* o tiempo medio hasta el fallo) y representa la vida media del componente; se expresa como:

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

El concepto complementario de $R(t)$ es, la *infiabilidad* $F(t)$ o probabilidad de que se produzca el fallo del componente durante el período de tiempo t . Se expresa como:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

La expresión (1) corresponde a componentes no reparables. Si se considera que el componente es reparable esto significa que tras un fallo el componente entra en un ciclo de reparación (ver figura 2.1). Se define en este caso el concepto de



2. Métodos para la determinación de frecuencias

mantenibilidad $M(t)$ como la probabilidad de que un componente se repare en un período de tiempo comprendido entre 0 y t . Se puede dar a $M(t)$ un tratamiento similar al comentado para la fiabilidad $R(t)$, definiéndose una tasa parecida a la $\lambda(t)$, la tasa de reparación o $\mu(t)$. En el caso de componentes reparables, la disponibilidad es la variable que representa más adecuadamente al componente.

Disponibilidad de un componente: es la probabilidad $A(t)$ de que el componente esté operativo en un instante t .

Su expresión matemática es la siguiente:

$$A(t) = \frac{1}{\lambda + \mu} (\mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)t})$$

donde λ es la tasa de fallos y μ la tasa de reparación adoptando en ambos casos una distribución exponencial.

Se asume que el componente se reincorpora al sistema «como nuevo».

Se define el tiempo medio de reparación como *MTTR* (*Mean Time To Repair* o tiempo medio de reparación) como:

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt$$

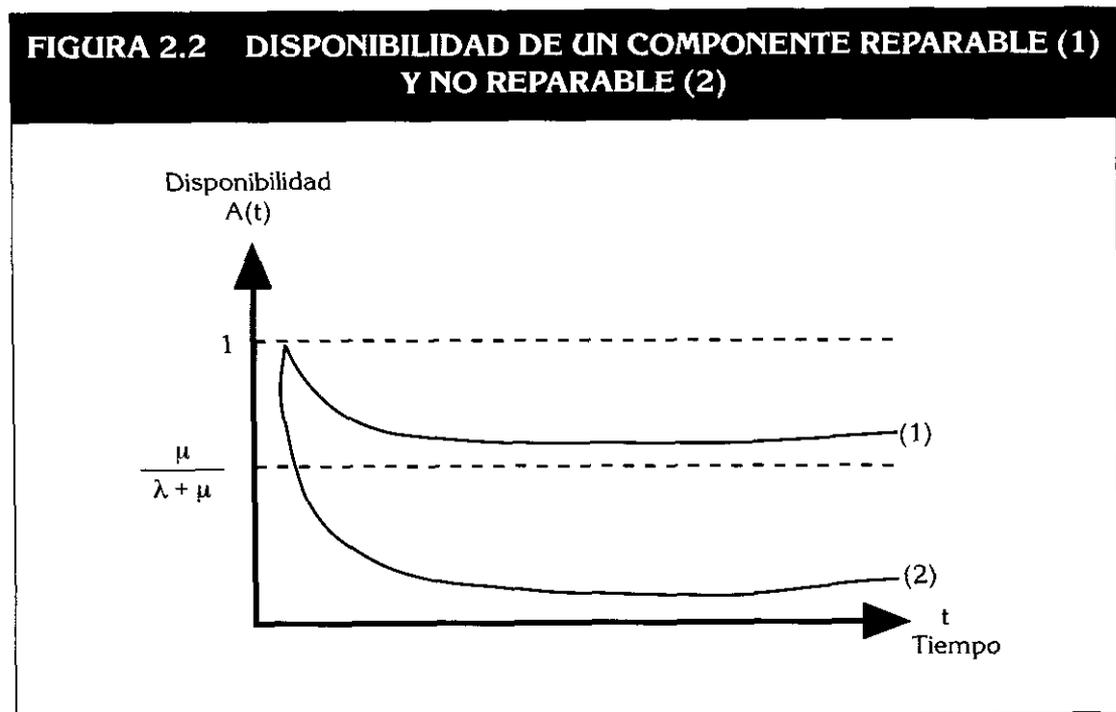
El concepto dual de *MTTF* es en este caso el de *MTBF* (*Mean Time Between Failure* o tiempo medio entre fallos) que cumple:

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

El concepto complementario de la disponibilidad de un componente es el de su *indisponibilidad* $Q(t)$ que se define como:

$$Q(t) = 1 - A(t)$$

Para componentes no reparables coinciden los valores de fiabilidad y disponibilidad. (Ver figura 2.2).



2.2.2 Tasa de fallos

Si la variable aleatoria t representa el instante de fallo de un componente y $f(t)$ la función de densidad correspondiente, entonces la expresión:

$$f(t) \cdot \Delta t = P \{t \leq t \leq t + \Delta t\}$$

representa la probabilidad de que el fallo del componente ocurra entre t y un diferencial $t + \Delta t$.

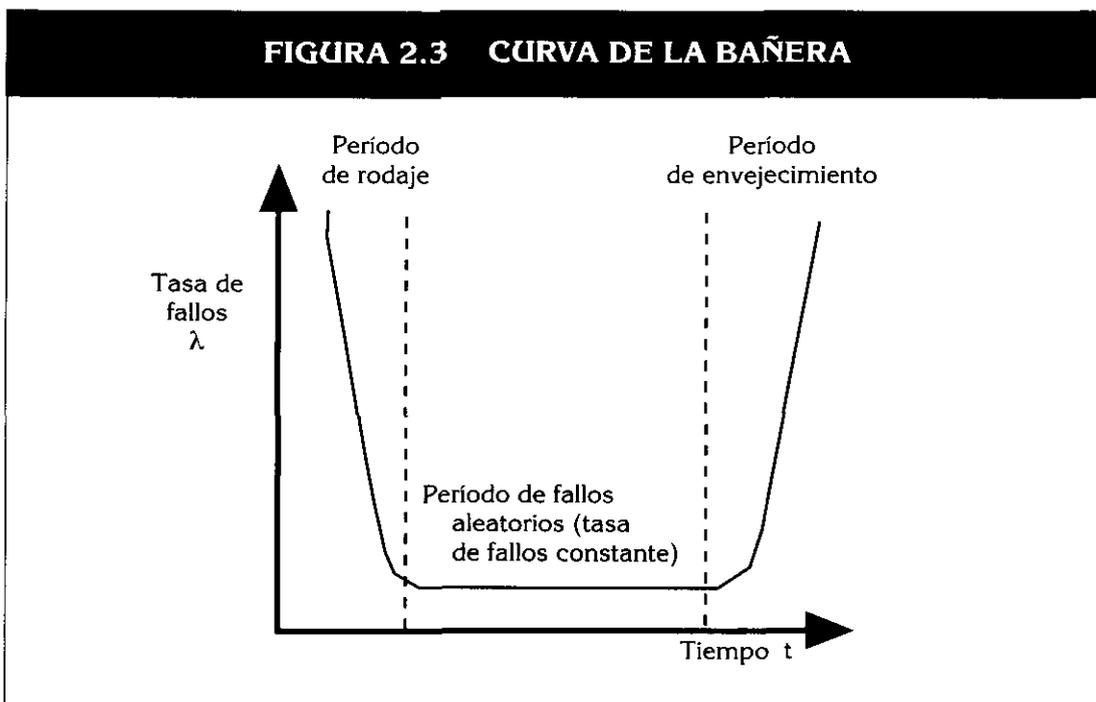
La tasa de fallos $\lambda(t)$ se puede definir como:

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

2. Métodos para la determinación de frecuencias

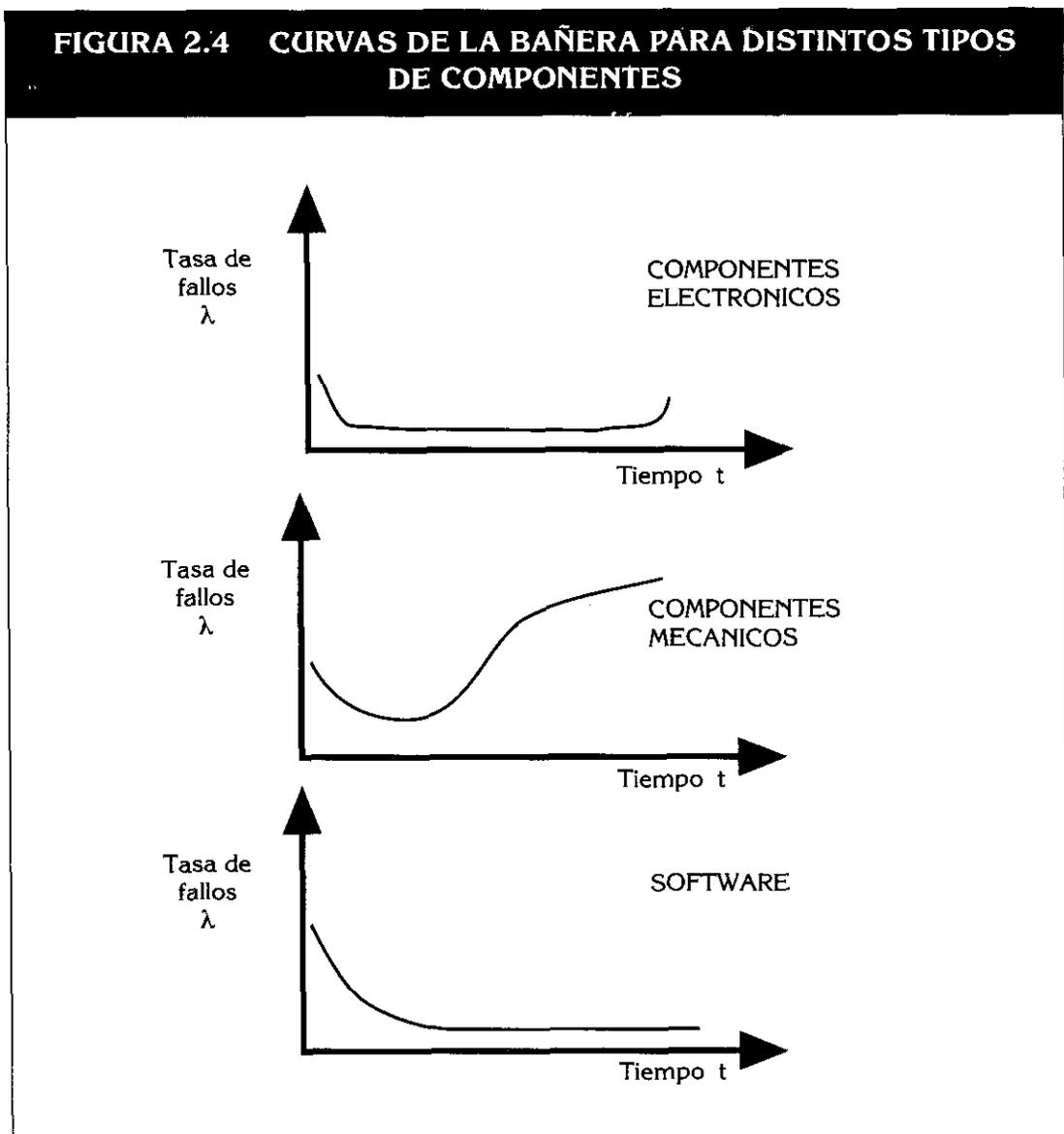
Se trata de una frecuencia de fallos, un valor dimensional, expresado normalmente en fallos por hora. El comportamiento de $\lambda(t)$ con el tiempo es revelador de la causa que provoca el fallo. Este comportamiento suele seguir normalmente una evolución con el tiempo parecido al representado en la denominada «curva de la bañera» (ver figura 2.3). En esta curva se distingue tres zonas:

1. La primera de corta duración presenta una tasa de fallos elevada pero decreciente. Corresponde a los «fallos infantiles» o defectos de construcción o control de calidad.
2. La segunda zona de más larga duración se mantiene constante en torno a un valor de fijo y mínimo. Es el período de fallos aleatorios. La causa del fallo no es inherente al componente sino debida a efectos externos.
3. En la zona más extrema la tasa de fallo sufre un crecimiento rápido. Es el período de envejecimiento del componente en el cual el fallo del componente es causado por su desgaste.





Según el tipo de componente se acentúa más una u otra zona de la curva: en componentes electrónicos la primera y la última zona suelen ser reducidas; para componentes mecánicos es esencial la zona de envejecimiento y por último para componentes tipo «software» es predominante la primera zona (ver figura 2.4).



2. Métodos para la determinación de frecuencias

2.2.3 Leyes de distribución de la tasa de fallos

Para calcular la fiabilidad de un componente según la expresión (1) (pág. 32) es necesario adoptar un modelo de descripción de la evolución de la tasa de fallos en el tiempo. En la tabla 2.2 se indican algunas de estas leyes que permiten modelar mejor una zona o zonas de la curva de la bañera: ley Exponencial, Normal, Gamma, de Weibull... Se proporcionan las fórmulas correspondientes a la tasa de fallos, fiabilidad e infiabilidad, así como las características principales. Se indican también las representaciones gráficas correspondientes (figura 2.5).

De la tabla se desprende que la distribución exponencial destaca especialmente por su sencillez y por este motivo es la más utilizada en la práctica en los bancos de datos de fiabilidad y en los estudios cuantitativos de riesgos. En este caso la tasa de fallos tiene un valor constante, es decir que no se considera dependencia con el tiempo de la λ : no se contempla la fase de fallos infantiles, ni tampoco la de degradación por envejecimiento.

FIGURA 2.5 REPRESENTACIONES GRAFICAS DE DIFERENTES LEYES DE DISTRIBUCION

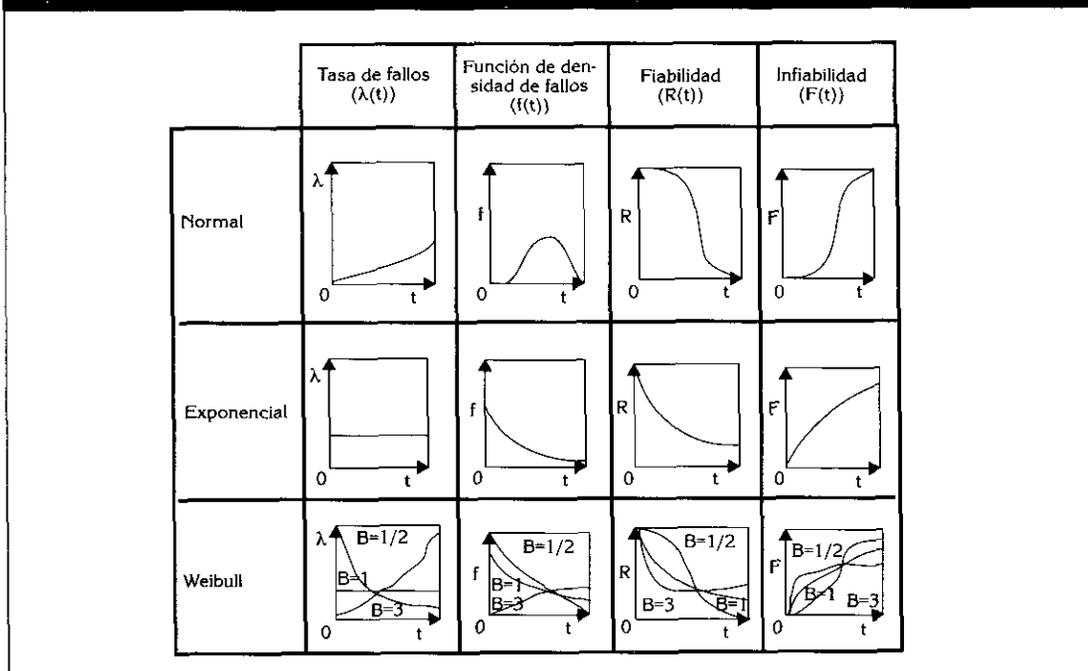


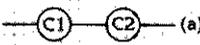
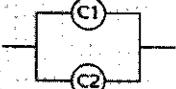
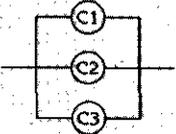
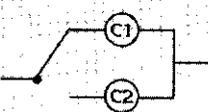
TABLA 2.2 CARACTERÍSTICAS DE DISTINTAS DISTRIBUCIONES

Tipo	Campo de definición de la variable aleatoria y parámetros	Tasa de fallos (t)	Fiabilidad R(t)	Infibilidad f(t) = 1 - R(t)	Función densidad de fallos f(t)	MTTF	Observaciones
Exponencial	Variable tiempo t ≥ 0 Parámetro del exponencial λ > 0	λ	e ^{-λt}	1 - e ^{-λt}	λe ^{-λt}	$\frac{1}{\lambda}$	Refleja la fase normal de operación: la zona central de la curva de la bañera.
Normal	Variable tiempo -∞ < t < ∞ Parámetros de la norma σ desviación estándar m media	$\frac{(t-m)}{\sigma}$	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{(t-m)}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx$	$1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(t-m)} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx$	$e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\sigma}$	m	Describe el comportamiento durante el periodo de desgaste del componente. La tasa de fallos es creciente.
Weibull	Variable tiempo t ≥ 0 Parámetros de la ley β > 0 η > 0	$\left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	e ^{-(t/η)^β}	1 - e ^{-(t/η)^β}	$e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \cdot \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	$\eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)^{\beta}$	Permite representar las distintas zonas de la curva bañera según el valor de β.

* Donde Γ es la función que se expresa como: $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} X^{z-1} \cdot e^{-x} dx$ para z > 0. Se verifica para valores enteros de z que: $\Gamma(z + 1) = z!$. Los valores de Γ se encuentran tabulados de forma directa en la mayoría de los manuales de estadística.

2.2.4 Fiabilidad y disponibilidad de un sistema

Hasta ahora se han descrito los modelos de representación de la fiabilidad de un componente. Para sistemas definidos como en el apartado 2.2.1 como conjuntos de componentes, su fiabilidad y disponibilidad se puede calcular en base al tipo de configuración que los une. Algunas configuraciones básicas que se pueden identificar. Son las que se describen a continuación. Las expresiones de fiabilidad, se reseñan en la correspondiente tabla 2.3.

Configuración	Esquema	Expresión booleana de la infiabilidad del sistema	Infiabilidad
Serie		Fallo de C1 o Fallo de C2	$P1 + P2 - P1 * P2$ (b)
Paralelo		Fallo de C1 y Fallo de C2	$P1 * P2$
Paralelo 2 de 3		Fallo de C1 y C2 o fallo de C1 y C3 o fallo de C2 y C3	$P1 * P2 * (1 - P3) + P1 * P3 * (1 - P2) + P2 * P3 * (1 - P1) + P1 * P2 * P3$
Redundancia pasiva		Fallo de C1 en un instante t' y fallo de C2 en garantizar el final del servicio sobre el periodo T-t'	$\int_0^t F1(t') \cdot f2(t - t') dt'$ <p>F1(t') Probabilidad de que el fallo del primer componente ocurra en el instante t' (c). f2 (t - t') Probabilidad de que el segundo componente no asegure el servicio desde el instante t' hasta t (d).</p> <p>Asumiendo una ley de distribución exponencial para la probabilidad de fallos resulta:</p> $1 - \exp(-\lambda_1 t) - [\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)] * [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)]$ (e)

- (a) C1, C2, C3: componentes del sistema.
- (b) P1, P2, P3: probabilidades de fallos de los componentes C1, C2 y C3.
- (c) F1: función de distribución acumulada, para el componente 1.
- (d) f2: función de densidad, para el componente 2.
- (e) λ_1, λ_2 : tasas de fallos de los componentes C1 y C2. La notación «exp» corresponde a la función exponencial.

.....

Configuración serie: el sistema funciona correctamente, sólo si ambos componentes funcionan correctamente. En Algebra de Boole la probabilidad de funcionamiento del sistema es una intersección lógica de los sucesos de funcionamiento correcto de ambos.

Configuración paralelo (o redundancia activa): el sistema funciona correctamente, si al menos uno de los dos componentes funciona correctamente. En Algebra de Boole, la probabilidad de funcionamiento del sistema es una unión lógica de los sucesos de funcionamiento correcto de cada uno de ellos.

Configuración redundancia pasiva: el sistema funciona mientras el sistema principal funciona correctamente o si es suplido cuando falla por el dispositivo redundante en standby que entra en servicio y es capaz de sustituirlo en su misión.

2.3 DETERMINACION DE LA TASA DE FALLO DE UN SUCESO BASICO

2.3.1 Consideraciones generales

Se pueden considerar tres fases generales del comportamiento de un componente:

1. El estado de espera o *standby*. El componente no está operativo. Durante esta fase se desconoce su estado a menos que se autodenuncie o que se realicen inspecciones periódicas.
2. El arranque o puesta en servicio del componente.
3. El funcionamiento u operación del componente durante un período determinado.

Se describen a continuación los modelos que se pueden utilizar para representar el componente según sus características.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

COMPONENTE CON UNA TASA DE FALLOS CONSTANTE EXPRESADA EN FALLOS POR HORA:

Se recurre a la descripción exponencial de la tasa de fallos y la probabilidad de que el componente tenga su primer fallo en $[0, T]$ se expresa como:

$$F(T) = 1 - R(T) = 1 - e^{-\lambda T}$$

que se puede aproximar a: λT si $\lambda T \ll 1$ (1).

Esta expresión muy utilizada en los árboles de fallos (ver apartado 2.4.1) es aplicable a componentes en funcionamiento normal o en espera. En este último caso, si T_e representa el tiempo de espera y λ_e la tasa de fallos en espera:

$$\begin{aligned} F(T_e) &= 1 - R(T_e) = 1 - e^{-\lambda_e T_e} \\ &\approx \lambda_e T_e \text{ si } \lambda_e T_e \ll 1 \end{aligned}$$

si el producto es suficientemente menor de 1 no se comete mucho error aproximando la exponencial por una relación lineal.

El modelo considera que el componente está «nuevo» en el instante $t = 0$.

COMPONENTE REPARABLE Y MONITORIZADO CON UNA TASA DE REPARACION CONSTANTE:

La indisponibilidad media del componente se expresa como:

$$Q = \lambda_e \cdot T_d / (1 + \lambda_e \cdot T_d) \approx \lambda_e T_d \text{ si } \lambda_e T_d \ll 1$$

donde λ_e es la tasa de fallos en espera y T_d el tiempo medio fuera de servicio (suma del tiempo necesario para la detección del fallo y del tiempo medio de reparación o sustitución).

COMPONENTE REPARABLE Y NO MONITORIZADO CON UNA TASA DE REPARACION CONSTANTE:

El componente es inspeccionado con una periodicidad T_p detectándose los fallos en los tests periódicos.

(1) Se demuestra que el error es menor del 10% si $\lambda T < 0,1$.

La indisponibilidad del componente se expresa como:

$$Q = \lambda_e \cdot T_p/2 + \lambda_e \cdot T_r \approx \lambda_e T_p/2 \quad \text{si } T_r \ll T_p$$

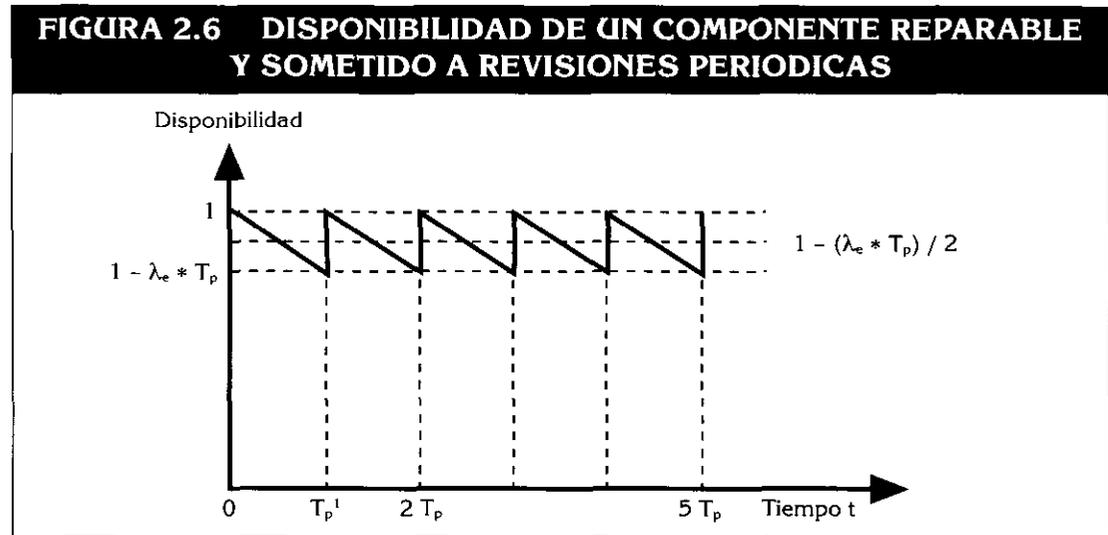
donde λ_e es la tasa de fallos en espera y T_r el tiempo medio para la reparación o sustitución del componente y T_p el período de inspección. (ver figura 2.6).

COMPONENTE CON UNA TASA DE FALLOS CONSTANTE EXPRESADA EN FALLOS POR CICLO:

En este caso se considera que el componente tiene una probabilidad p constante de fallar cuando se solicita su entrada en servicio. En este modelo no existe una dependencia respecto del tiempo de espera del componente o del tiempo que tiene que operar. Su in fiabilidad se expresa como:

$$1 - R_c = q_c \approx np$$

donde q_c es la indisponibilidad a la «demanda» o probabilidad de fallo al solicitarse la entrada en servicio, n el número de demandas y R_c su fiabilidad.



NOTAS:

1. T_p : tiempo entre pruebas periódicas.
2. λ_e : tasa de fallos en espera.
3. Se considera que el tiempo de reparación T_r es despreciable.
4. Se considera que tras la prueba el componente vuelve a una disponibilidad 1.
5. Se considera una tasa de fallos en espera constante y que se puede aproximar la relación exponencial obtenida para la disponibilidad por una relación lineal.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Por último, un mismo componente puede ser descrito a través de un modelo compuesto con varias de las ecuaciones indicadas para representar distintos estados.

En la tabla 2.4 se agrupan las ecuaciones anteriores dando ejemplos de componentes de cada caso.

TABLA 2.4 MODELOS DE REPRESENTACION DE LA INFIABILIDAD/INDISPONIBILIDAD DE UN SISTEMA

Modelo	Expresión de su infiabilidad/indisponibilidad	Ejemplo
Componente con tasa de fallos constante expresada en fallos por hora.	<p>Componente operativo: $F(T) = 1 - \exp(-\lambda * t)$ (a) que se puede aproximar a: $\lambda * T$ si $\lambda * T \ll 1$ (b) donde: λ: Tasa de fallos en operación T: Tiempo de operación considerado</p> <p>Componente en espera: $F(T_e) = 1 - \exp(-\lambda_e * T_e)$ que se puede aproximar a: $\lambda_e * T_e$ si $\lambda_e * T_e \ll 1$ donde: λ_e y T_e: ídem en espera</p>	<p>- Bomba en que en $T = 0$ está arrancada. Modo de fallo: Parada de la bomba.</p>
Componente en espera reparable monitorizado con tasa de reparación constante.	<p>$Q = \lambda_e * T_e / (\lambda_e * T_d + 1)$ que se puede aproximar a: $\lambda_e * T_e$ si $\lambda_e * T_e \ll 1$ donde: λ_e: Tasa de fallos en espera. T_d: Tiempo fuera de servicio (tiempo medio necesario a la detección del fallo y a la reparación o sustitución).</p>	<p>- Válvula motorizada normalmente abierta cierre indebido. Modo de fallo: En ambos casos se supone que el componente es no reparable, en $T = 0$ está «como nuevo» y no sufre desgaste con el tiempo.</p>

(a) Se utiliza la anotación literal de la ley exponencial.
 (b) Se entiende que es sustancialmente menor que 1.

TABLA 2.4 MODELOS DE REPRESENTACION DE LA INFIABILIDAD/INDISPONIBILIDAD DE UN SISTEMA (Continuación)

Modelo	Expresión de su infiabilidad/indisponibilidad	Ejemplo
Componente reparable no monitorizado con tasa de reparación constante.	$Q = \lambda_e \cdot T_p / 2 + \lambda_e \cdot T_r$ <p>que se puede aproximar a:</p> $\lambda_e \cdot T_p / 2 \text{ si } T_r \ll T_p$ <p>donde:</p> <p>λ_e: Tasa de fallo en espera T_p: Tiempo de medio entre pruebas T_r: Tiempo de medio de reparación.</p>	- Detector de gas, Alarma,...
Componente con tasa de fallos constante expresada en fallos por ciclo.	$Q = n \cdot P$ <p>donde:</p> <p>n: Número de demandas. P: Probabilidad de no arrancar bajo demanda.</p>	- Bomba contra incendios.
Modelo compuesto.	$\lambda_e \cdot (1 - C) + C \cdot \lambda + C/t$ <p>donde:</p> <p>λ_e: Tasa de fallos en espera. λ: Tasa de fallo en servicio. P: Probabilidad de fallo a la demanda. C: Fracción de servicio del componente. t: Tiempo tras el cual entra periódicamente en servicio.</p>	- Bomba en standby parada que es arrancada y que tiene garantizado un tiempo de servicio.

2.3.2 Banco de datos de fiabilidad de componentes

En la tabla 2.5 se describen algunos de los bancos de datos de fiabilidad más destacados.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

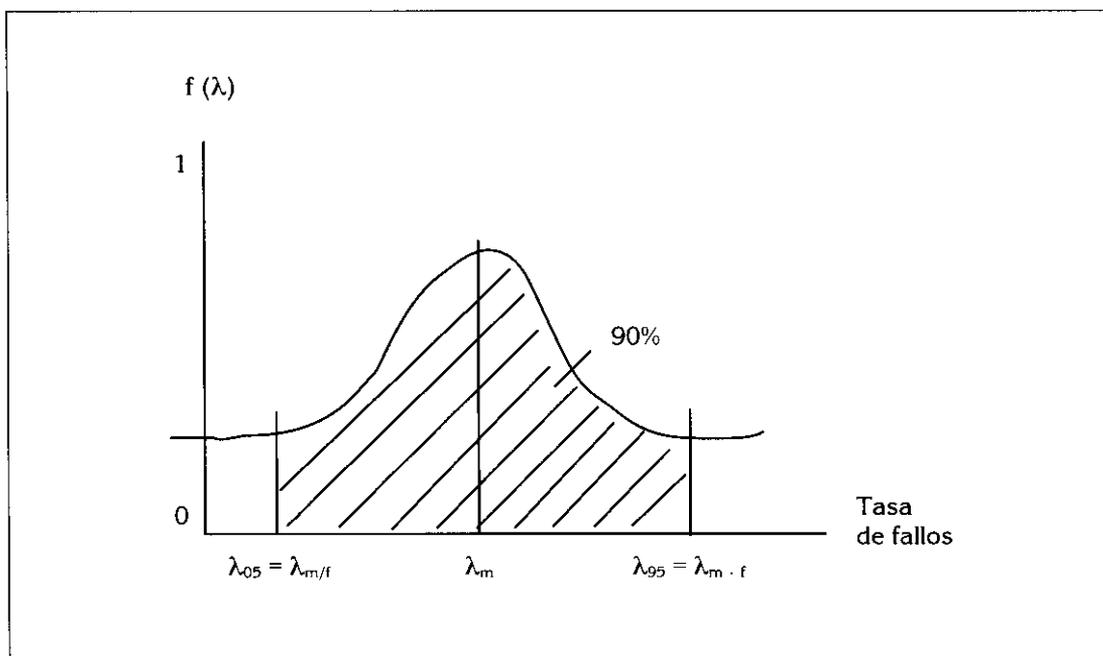
TABLA 2.5 BANCOS DE DATOS DE FIABILIDAD DE COMPONENTES

Fuente	Características	Fecha	Datos que proporciona
WASH-1400	Banco de Datos utilizado en el análisis probabilista de seguridad de las plantas nucleares de Surry (PWR) y Peach Bottom-II (BWR). Origen: Nuclear.	1975	<p>λ_o: Tasa de fallos en operación (fallos/hora).</p> <p>λ_s: Tasa de fallos en espera (fallos/hora).</p> <p>Q_d: Tasa de fallos en demanda (fallos/demanda).</p> <p>Proporciona tasas de fallos para distintos modos de fallos. Considera una distribución lognormal para las tasas proporcionando valor mediano, factor de error y rango de variación.</p>
RIJMOND	Recopilación de datos bibliográficos principalmente WASH-1400/UKAEA* (Nuclear); Origen: Varios.	1978	Según la fuente (fallos por hora, año, en demanda), proporciona el rango de variación y los modos de fallos.
BANDAFF	Banco de Datos del ENI** basado en datos recogidos sobre 6.000 equipos durante el período 1978-1982. Origen: Petroquímico.	1982	Proporciona datos sobre la muestra estadística, indica tasas de fallos por hora o por demanda, tiempo medio de reparación, así como el rango de variación de la tasa.
OREDA***	Banco de Datos inglés sobre componentes de plataformas petrolíferas. Origen: Petroquímica.	1984	Agrupar los componentes en distintas categorías y proporciona para cada uno de ellos: Items totales de la población, número de muestras, tiempo de calendario, tiempo de operación acumulado, número de fallos registrados; la tasa de fallos valor más bajo, medio y máximo y valores mínimos, medios y máximos de reparación.
CRYSTAL RIVER III	Banco de Datos utilizado en el análisis probabilista de seguridad de la planta nuclear de Crystal River III. Recogida de datos bibliográficos de otros. Análisis probabilísticos de Seguridad en plantas nucleares. Origen: Nuclear.	1988	Proporciona la mediana, valor correspondiente al 5 % de la distribución acumulada, 95 % de la misma y el factor de error de la ley lognormal de ajuste de la dispersión. Proporciona fallos por hora o por demanda para cada modo de fallo.
COMPI	Banco de Datos de fiabilidad de componentes. Los datos procedentes de distintas fuentes. Tiene soporte informático.	1989	Agrupar los componentes en categorías y permite realizar la búsqueda a través de distintos parámetros tales como tipo, uso, ... Proporciona para el modo de fallo contemplado la tasa de fallos (fallos/hora), así como la referencia bibliográfica correspondiente.
ETC			

* United Kingdom Atomic Energy Agency.
 ** Ente Nazionale d'Idrocarburi.
 *** Offshore REliability DATA.

De esta tabla se desprenden los siguientes comentarios:

1. Existen pocos bancos de datos de procedencia exclusivamente química.
2. Los datos de procedencia «nuclear» deben ser utilizados con el debido cuidado ya que por sus características son relativamente distintas.
3. Los bancos de datos dan en general una medida de la incertidumbre que pesa sobre el dato acotándolo en un intervalo de variación. En general, el modelo utilizado para describir la incertidumbre asociada a la tasa de fallo λ consiste en considerarla como una variable aleatoria que sigue una ley de densidad de tipo lognormal caracterizada por su media λ_m (igual a la mediana) y un factor de error f . La tasa de fallos se concentra con un 90% de probabilidad entre un valor máximo ($\lambda_m \times f$) y mínimo (λ_m/f). En el esquema que sigue se representa la ley de distribución de la variable aleatoria «tasa de fallos» señalándose en abcisas los valores de la tasa y en ordenadas las probabilidades de obtener estos valores.





2. Métodos para la determinación de frecuencias

donde:

- λ_m : mediana de la distribución lognormal (su probabilidad acumulada es del 50%).
- λ_{05} : valor de la tasa de fallos para el cual la probabilidad acumulada de obtener un valor más pequeño es del 5%.
- λ_{95} : valor de la tasa de fallos para el cual la probabilidad de obtener un valor inferior o igual es del 95%.
- $f(\lambda)$: función de densidad de la ley de distribución de la variable aleatoria tasa de fallos.
- ///: área con una probabilidad acumulada del 90% de que la tasa de fallos, se halla dentro del rango $[\lambda_{05}; \lambda_{95}]$ (abscisas de las rectas verticales que delimitan el área).

Los cálculos de frecuencia deben de tomar en consideración estos intervalos de variación de la tasa de fallos.

Ver apartado «Análisis de incertidumbre» en 2.4.1.1 C).

2.3.3 Determinación del fallo humano

El componente humano aparece en los sistemas estudiados como un elemento más, para el cual también es necesario proceder a una evaluación. Puede constituir tal como se ha indicado ya con anterioridad: un iniciador de un accidente (error en una operación de purga, por ejemplo) o un condicionante a su evolución (fallo en no detectar una alarma).

En este caso todavía es más difícil que en el caso de los componentes técnicos determinar tasas de fallos, por la multitud de factores que intervienen: factores internos (formación, capacidad y características personales) o externos (condiciones del trabajo, tipo de actividad, etc.).

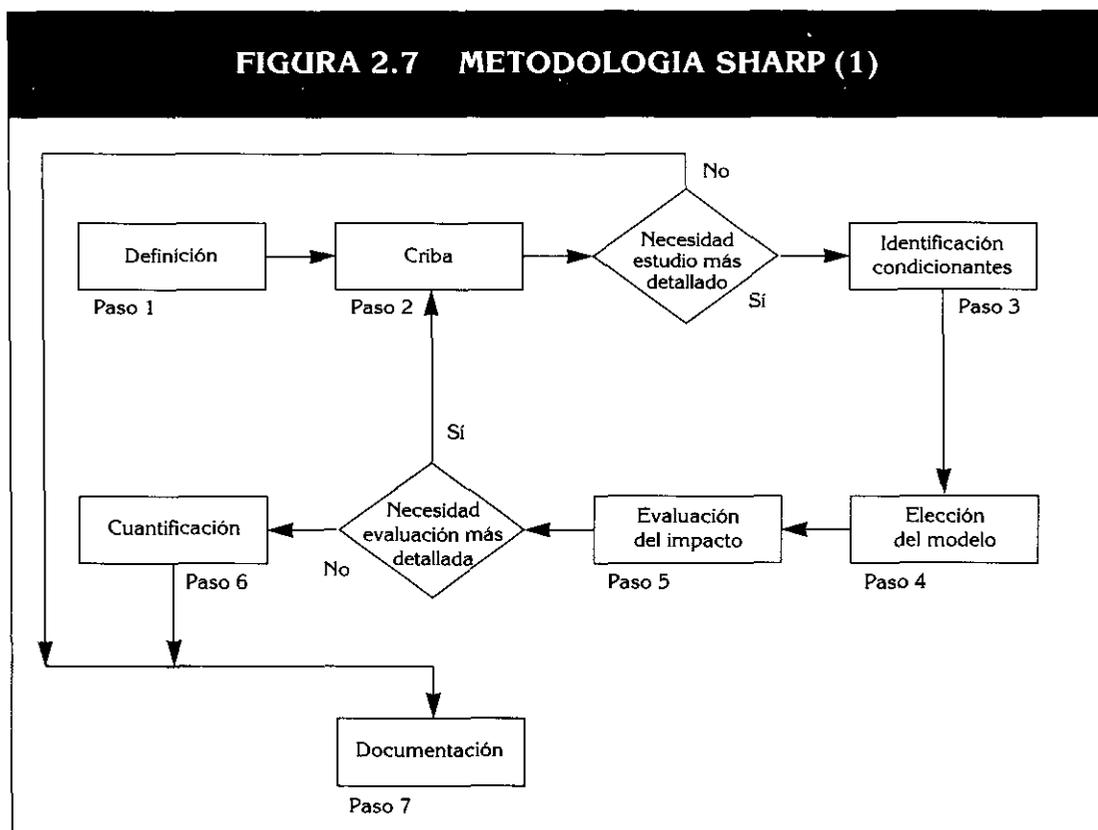
El método SHARP (*Systematic Human Analysis Reliability Procedure*) constituye un metodología sistemática para determinar que operaciones humanas

es necesario analizar y que modelos son los más adecuados. Se indica en la figura 2.7.

Los pasos principales de la metodología se describen brevemente a continuación:

Definición: Se describen todas las operaciones humanas que hayan aparecido en el análisis realizado y que se tengan que evaluar. Típicamente serán los sucesos relacionados con actuaciones humanas identificadas en otras fases de proceso y aplicando otras técnicas: determinados eventos básicos de los árboles de fallos o sucesos. Un ejemplo de evento de este tipo sería: «operador no cierra la válvula V-23».

Criba: Se determina si se pueden evaluar todos estos sucesos de forma sencilla o si es necesario proceder a un estudio más detallado.



(1) *Systematic Human Analysis Reliability Procedure.*



2. Métodos para la determinación de frecuencias

Si no es necesario un estudio detallado se recogen los datos y se archivan debidamente documentados (es decisivo guardar las referencias de los cálculos llevados a cabo para que puedan ser reproducidos y eventualmente actualizados posteriormente).

Identificación de condicionantes: Si es necesario un estudio detallado conviene determinar en primer lugar los condicionantes del suceso a evaluar:

- Condiciones entorno (por ejemplo, en el caso de cierre de una válvula en accesibilidad, esfuerzo físico necesario, etc.).
- Tipo de situación (en situación normal, en una emergencia, ...).
- Imperativos de tiempos de actuación.
- Tipo de actuación (rutinaria, poco habitual, etc.).

Elección del modelo: Según las características del suceso se determina la técnica de evaluación más apropiada, estas se describen en los siguientes apartados.

Evaluación del impacto: Se realiza una primera evaluación para determinar el impacto que puede tener el evento sobre los sucesos complejos estudiados. De ser relevante el impacto, sería necesario volver a repetir los pasos anteriores para «afinar» en la selección de la técnica a aplicar; sino, se puede proceder a la cuantificación final.

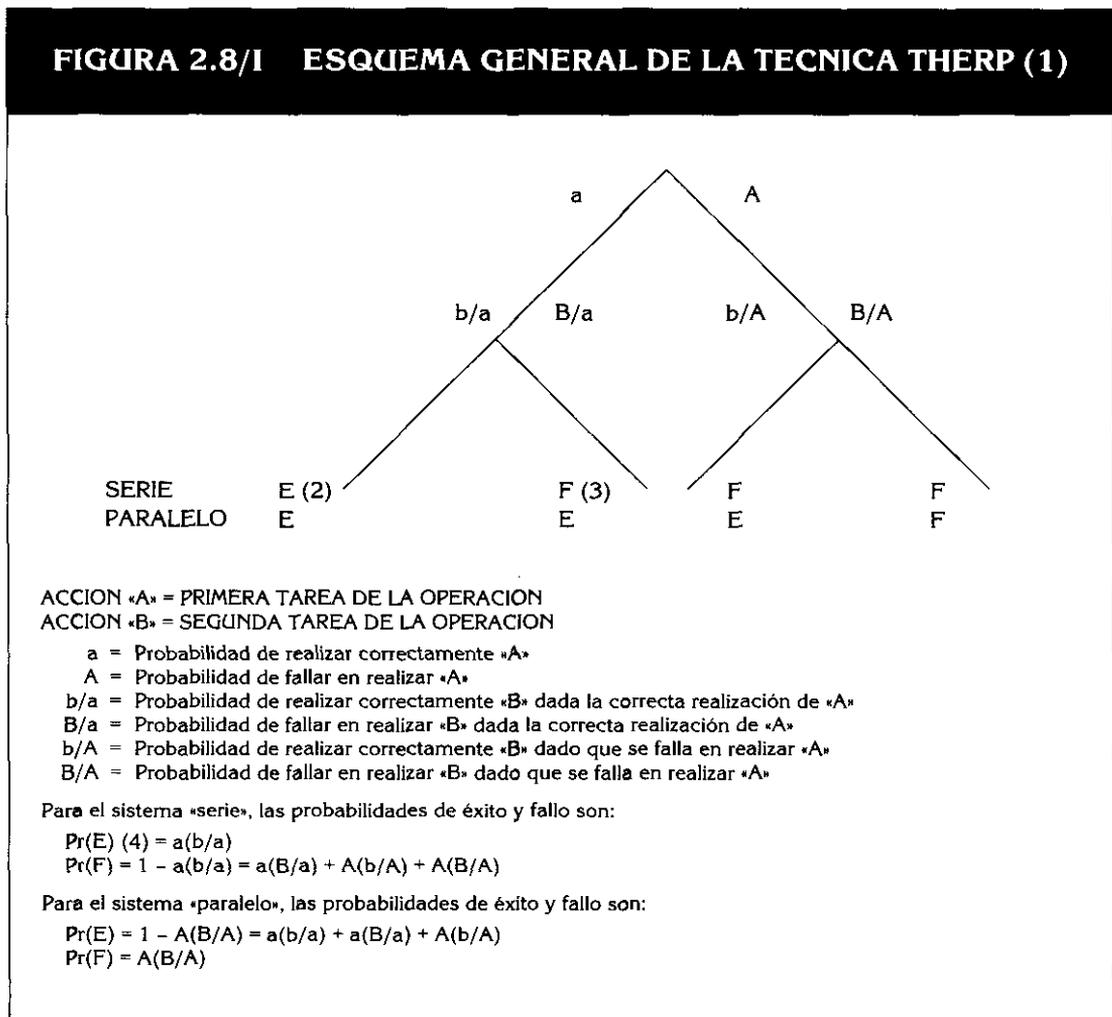
Los modelos a utilizar para la cuantificación se pueden agrupar en tres grandes grupos que se comentan en los apartados siguientes.

TECNICAS DE DESCOMPOSICION. Proceden a descomponer la operación a realizar en tareas individuales para las cuales se dispone de datos y reconstruir posteriormente el fallo sobre la base de la estructura lógica de enlace de las distintas operaciones y posibilidades de error asociadas.

Un ejemplo de técnica de descomposición lo constituye la técnica THERP (*Technique for Human Error Rate Prediction*) descrita en el *Handbook for Human Reliability on with emphasis to Nuclear Power Plant*. La técnica consiste en plantear para cada tarea, en que se puede descomponer la operación, el éxito o fallo en su realización, a través de una bifurcación parecida a la de los árboles de sucesos (ver apartado 2.4.2). La diferencia principal reside, en este caso, en que

se consideran probabilidades condicionadas, es decir, que la correcta/incorrecta realización de una tarea puede influir sobre la actuación en la tarea siguiente. En el árbol de sucesos se consideraban los eventos como independientes.

En la figura 2.8/1 se indica el esquema general de la técnica para una operación que consta de dos tareas «A» y «B».



- (1) *Technique for human error prediction.*
- (2) E: Exito.
- (3) F: Fallo.
- (4) Pr(): Probabilidad.



2. Métodos para la determinación de frecuencias

La primera acción del esquema es «A» y puede realizarse correctamente, con una probabilidad anotada en minúscula, a , o de forma incorrecta, con una probabilidad anotada en mayúsculas, A .

La segunda acción es «B» y puede ser realizada de forma correcta o incorrecta, según se haya realizado anteriormente la acción «A».

Si b y B son respectivamente las probabilidades de éxito/fallo de la acción «B», las probabilidades de éxito de la acción «B» condicionadas por el resultado de «A» se expresan como:

$$b/a$$

$$b/A$$

La probabilidad de una secuencia se expresa como producto de las probabilidades de las acciones de la secuencia. En el esquema se indican dos criterios de éxito.

Serie: es necesario que ambas acciones se realicen de forma adecuada.

Paralelo: es necesario que al menos una de las dos sea llevada a cabo con éxito.

y para cada uno de ellos se determina la expresión de su probabilidad de éxito y fallo.

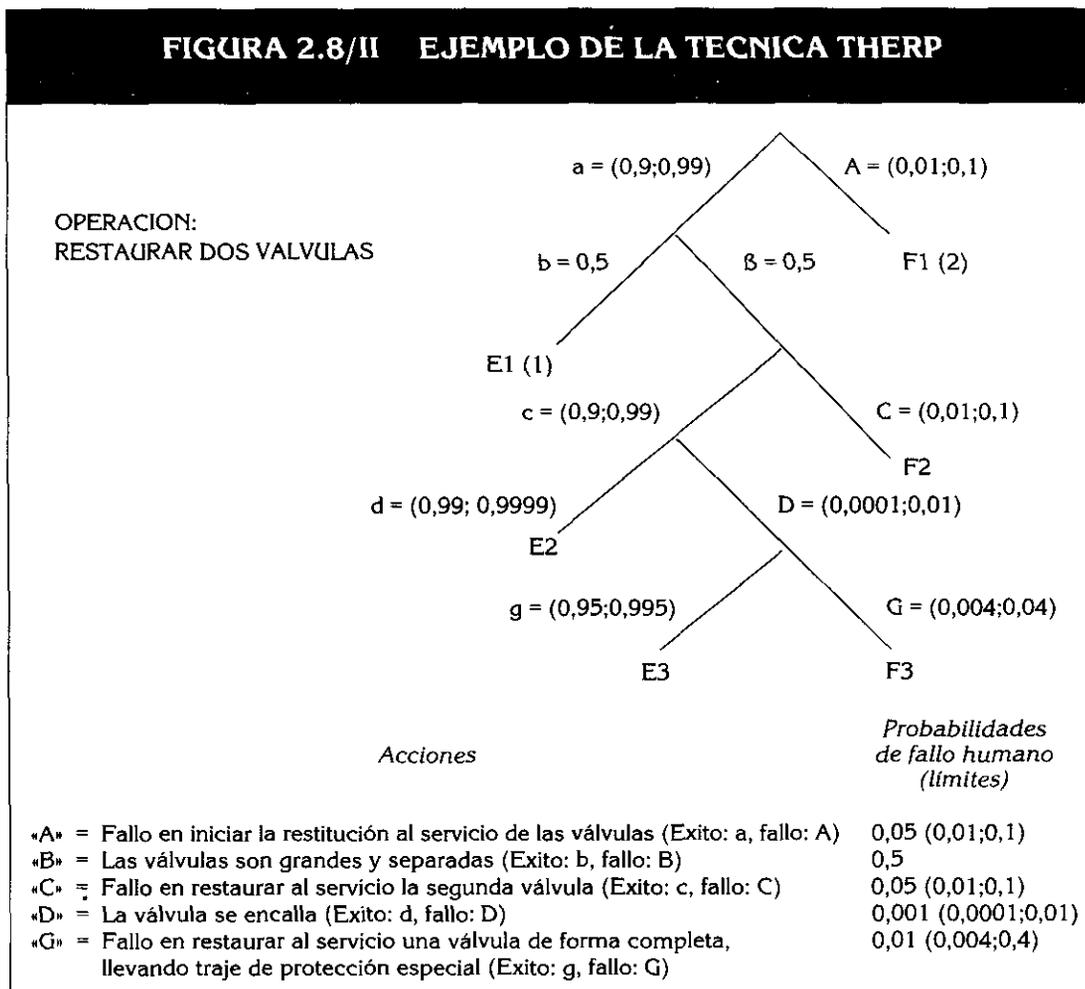
En la figura 2.8/II se reseña un ejemplo extraído del *Handbook for Human Reliability with emphasis to Nuclear Power Plant*, que corresponde a la restitución a la posición correcta de dos válvulas tras una operación de mantenimiento.

Se supone que para realizar la operación es necesario llevar un traje especial de protección.

En el esquema, la primera bifurcación corresponde al suceso «Iniciar la restitución de las válvulas al servicio», (acción A) se plantean dos situaciones:

- No se inicia la operación. Se considera, entonces, que al omitirse el primer paso la operación se omite de forma global. El resultado, por tanto, es fallo de la operación (suceso final F1).
- Si se inicia la operación actuando correctamente sobre la primera válvula, la bifurcación que se plantea analiza el tipo de válvulas (suceso

FIGURA 2.8/II EJEMPLO DE LA TECNICA THERP



- (1) E1, E2, E3: situaciones de éxito del sistema.
 (2) F1, F2, F3: situaciones de fallo del sistema.

so B). Si las válvulas son pequeñas y próximas se supone que el operador tras haber accionado la primera válvula tiene una probabilidad de éxito seguro al accionar la segunda válvula, lo que conduciría a una situación de éxito, E1. En cambio, si las válvulas son grandes y separadas existe la posibilidad de una omisión al actuar la segunda válvula.

- En tal caso, caben de nuevo dos posibilidades: 1) que se omita la restitución de la segunda válvula al servicio, lo que conduce a la segunda situación de fallo F2. 2) Si no se omite la operación sobre la segunda



2. Métodos para la determinación de frecuencias

válvula, cabe la posibilidad de que se haga de forma incompleta (válvula semi abierta o semi cerrada).

- Si se hace de forma completa la situación final es de éxito: E2.
- Si se hace de forma incompleta cabe la posibilidad de que el operador se dé cuenta de la posición intermedia de la válvula (suceso G) y la corrija, lo que conduciría a la situación de éxito E3 o de fallo F3.

Las posibilidades reseñadas no son valores puntuales sino que se consideran intervalos de valores posibles para cada caso.

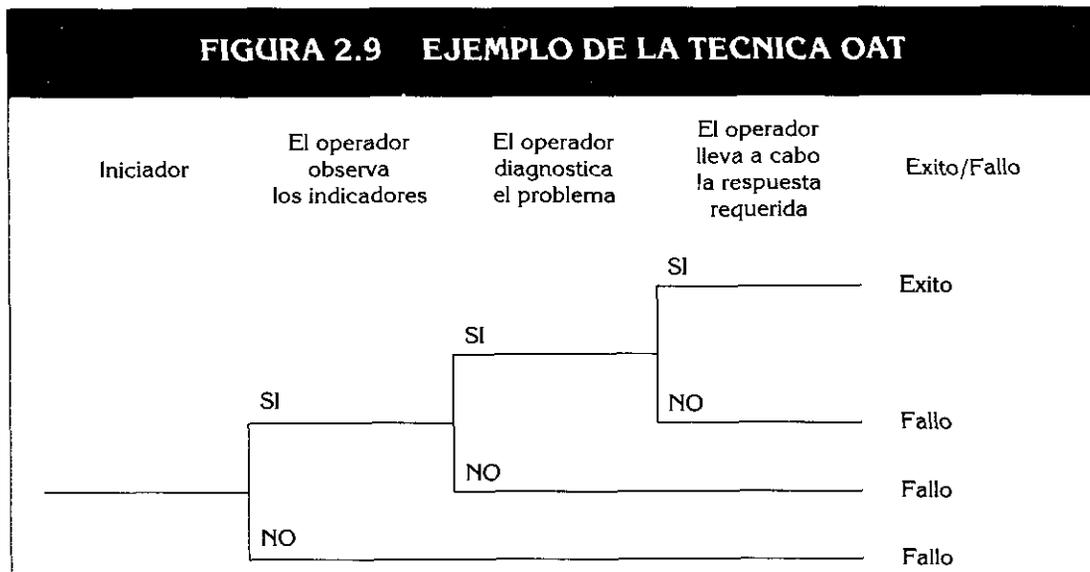
Por último, el éxito del sistema se expresa como $E1 + E2 + E3$:

$$a.b + aBcd + aBcDg$$

el fallo es $F1 + F2 + F3$:

$$A + a.B.C + a.B.c.D.G$$

El OAT (*Operator Action Tree*) también es una técnica que se puede englobar en este grupo. En este caso la descomposición se hace sobre la base del proceso mental seguido por el operador antes de tomar una decisión (detección de la anomalía, diagnóstico e intervención). La estructura es parecida al árbol de sucesos (apartado 2.4.2). Ver figura 2.9.

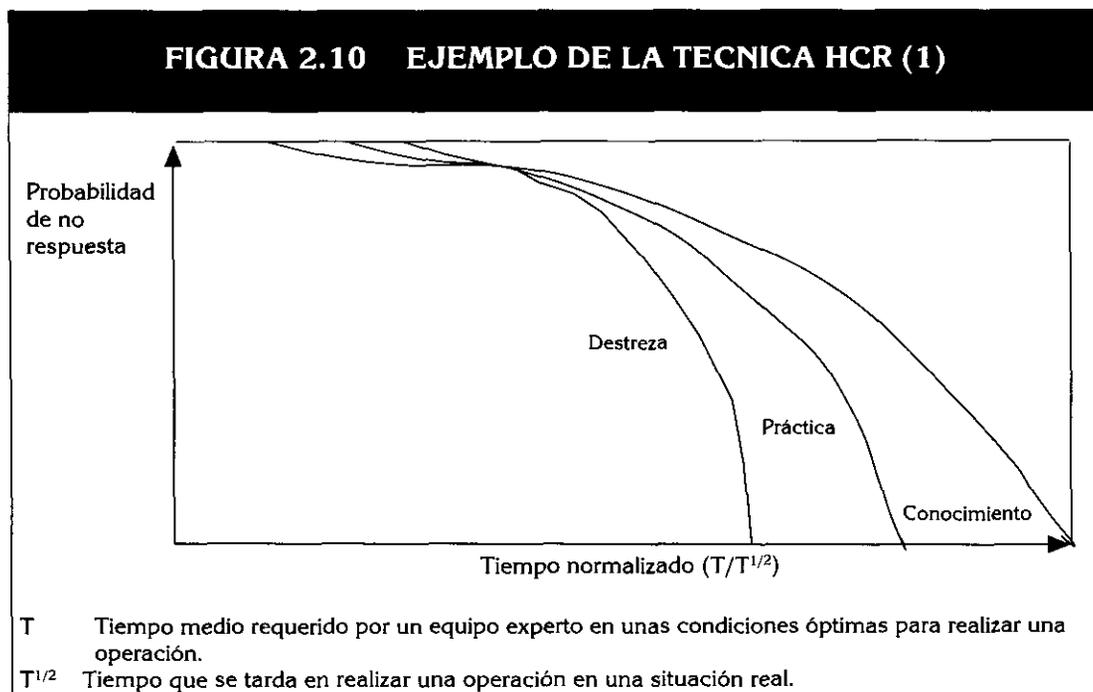


TECNICAS QUE EVALUAN EL FALLO HUMANO EN FUNCION DEL TIEMPO DISPONIBLE PARA LA INTERVENCION

Esta técnica se utiliza sobre todo para representar la toma de decisión del operador en situaciones de emergencia en las cuales el tiempo disponible suele ser escaso. Según el tipo de operación proporciona una probabilidad de fallo. Las curvas sobre las cuales se basa el método fueron calculadas mediante los experimentos realizados para la formación de operadores de centrales nucleares en simuladores. Ver figura 2.10.

TECNICAS TIPO «JUICIO EXPERTO»

Las técnicas se basan en una ponderación de diferentes parámetros que representan los distintos factores que influyen sobre el desarrollo de la actividad (entorno, tipo de actividad, capacidad operador, nivel de stress). Ver figura 2.11, donde se indica el ejemplo del código TESEO.



(1) Human Cognitive Rate.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

FIGURA 2.11 METODO TESEO	
TESEO	
K1 TIPO DE ACTIVIDAD	
	Rutinaria Rutinaria que requiere atención No rutinaria
K2 STRESS POR TIEMPO DISPONIBLE	
	Actividades rutinarias: 2, 10 20 seg. Actividades no rutinarias: 3, 30, 45, 60 seg.
K3 TIPOLOGIA DEL OPERADOR	
	Experto muy entrenado, cuidadosamente seleccionado Conocimiento, entrenamiento general Conocimiento, entrenamiento superficial
K4 FACTOR ANSIEDAD	
	Grave emergencia Potencial emergencia Normal
K5 FACTOR ERGONOMICO	
	Microclima Interfase planta
	Excelente Excelente
	Bueno Buena
	Discreto Discreta
	Malo Mala
EJEMPLO DE APLICACION	
Programa para la estimación de la fiabilidad de operadores en salas de control.	
Descripción de la operación: Operador de panel número 1.	
.K1 Tipo de actividad:	Rutinaria. Requiere atención.
.K2 Tiempo disponible para realizarla:	15 s.
.K3 Tipología del operador:	Cuidadosamente seleccionado, experto, bien entrenado.
.K4 Factor de ansiedad:	Situación de emergencia potencial.
.K5 Calidad del microclima:	Buena.
.K6 Calidad del interfase:	Buena.
Resultados de la simulación:	
Factores.	
.K1 Actividad:	,01
.K2 Stress por tiempo:	,75
.K3 Tipología del operador:	,5
.k4 Ansiedad:	2
.k5 Ergonomía:	1
Probabilidad de que el operador falle en su remisión:	$K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5$: ,0075
Tasa de éxito:	$(1 - K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5) \times 100\%$: 99,25

2.4 DETERMINACION DE FRECUENCIAS DE SUCESOS COMPLEJOS

2.4.1 Método del árbol de fallos

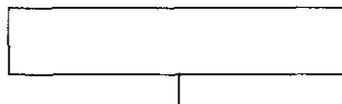
2.4.1.1 Descripción

La técnica del árbol de fallos nació en 1962 con su primera aplicación a la verificación de la fiabilidad de diseño del cohete Minuteman. Posteriormente ha sido aplicada sobre todo inicialmente en el campo nuclear y posteriormente en el campo químico, en estudios como el de Rijmond (ver Guía Técnica: «Metodologías para el Análisis de riesgos. Visión General»). Los árboles de fallos constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporcionan resultados cualitativos y cuantitativos.

Esta técnica consiste en un proceso deductivo basado en las leyes del Algebra de Boole que permite determinar la expresión de sucesos complejos estudiados en función de los fallos básicos de los elementos que intervienen en él y calcular su probabilidad.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado suceso TOP en sucesos intermedios hasta llegar a sucesos básicos para los cuales se puede calcular la probabilidad de fallos.

Suceso TOP: Ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo del cual se desconoce la probabilidad de fallos. Tiene que estar claramente definido (condiciones, etc.)



Sucesos intermedios: Son los sucesos intermedios que son encontrados en el proceso de descomposición y que a su vez pueden ser de nuevo descompuestos. Se representan en el árbol de fallos en rectángulos.

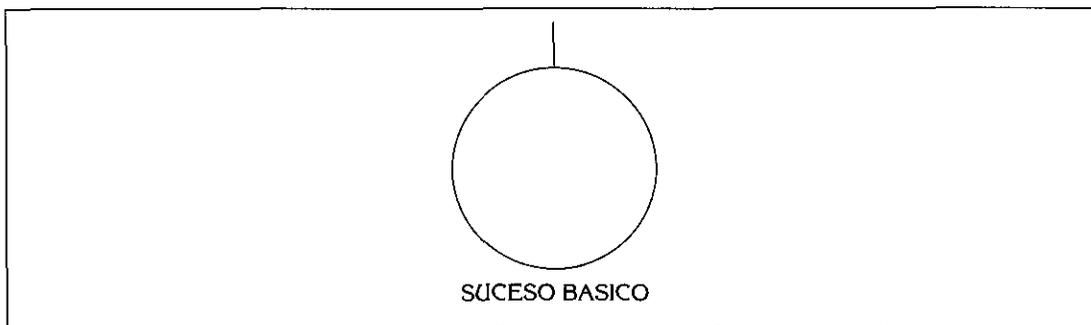


2. Métodos para la determinación de frecuencias

Sucesos básicos: Son los sucesos terminales de la descomposición. Tienen asociada una probabilidad de ocurrencia determinada y pueden representar cualquier tipo de suceso de los que se han citado con anterioridad: sucesos de «fallos» como por ejemplo: infiabilidad o indisponibilidad de un componente, error humano, etc. o sucesos de «éxito»: ocurrencia de un evento determinado. Se representan en círculos en la estructura del árbol.

En el proceso de descomposición del árbol se recurre a una serie de *puertas lógicas* que representan los operadores del álgebra de sucesos descritos en el apartado 2.1.1. Los dos tipos más elementales corresponden a las puertas AND y OR cuyos símbolos se indican a continuación. La puerta OR se utiliza para indicar un «O» lógico: significa que la salida lógica S ocurrirá siempre y cuando ocurran por lo menos una de las dos entradas lógicas e_1 o e_2 .

La puerta AND se utiliza para indicar un «Y» lógico. Para que ocurra la salida lógica S es necesario que ocurran conjuntamente las dos entradas lógicas e_1 y e_2 .



Se suelen numerar las puertas del árbol para facilitar su identificación. En la tabla 2.6, extracto del *Fault Tree Handbook*, 1987 se indican otros tipos de puertas lógicas (menos utilizados) y su simbología.

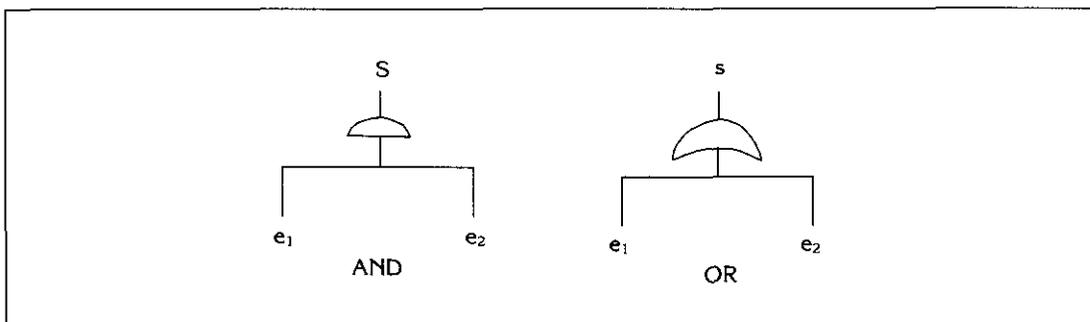
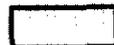


TABLA 2.6 SIMBOLOGIA DEL ARBOL DE FALLOS

SUCESOS BASICOS

	SUCESO BASICO-, Suceso básico que no requiere posterior desarrollo.
	SUCESO DE CONDICION-, Condición específica o restricción que se aplica a cualquier puerta lógica (se utiliza principalmente con las puertas lógicas Y PRIORITARIO y INHIBIDO).
	SUCESO NO DESARROLLADO-, Un suceso no se desarrolla porque sus consecuencias son despreciables o porque no hay información suficiente.
	SUCESO EXTERNO-, (Un suceso que normalmente ocurrirá.
	SUCESO INTERMEDIO-, Un suceso de fallo que ocurre porque una o más causas anteriores ocurren a través de unas puertas lógicas.

PUERTAS LOGICAS

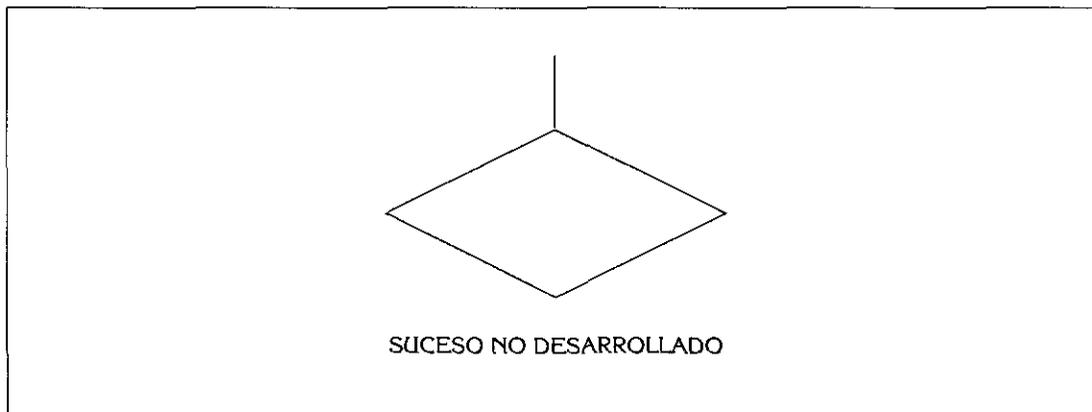
	El suceso de fallo de salida ocurre si las entradas se producen.
	El suceso de fallo de salida ocurre si al menos una de las entradas se produce.
	El suceso de fallo de salida ocurre si ocurre exactamente una de las entradas.
	Y PRIORITARIO-, El suceso de fallo de salida ocurre si todas las entradas se producen en una determinada secuencia (representada por el suceso CONDICION dibujado a la derecha de la puerta lógica).
	INHIBICION-, El suceso de fallo de salida ocurre si la entrada ocurre en el caso en que se produzca una condición (representada por el suceso CONDICION dibujado a la derecha de la puerta lógica).

TRANSFERENCIAS

	Transferencia de entrada-, Indica que el árbol de fallos se desarrolla posteriormente donde aparece el símbolo de transferencia de entrada.
	Transferencia de salida-, Indica que esta posición del árbol debe relacionarse con el símbolo de transferencia de entrada.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Sucesos no desarrollados. Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos que por su complejidad son a su vez difíciles de evaluar bien por falta de información o bien porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y para una evaluación cuantitativa será necesario hacer una estimación de su probabilidad. Se tratan como sucesos básicos.



En la técnica del árbol de fallos cabe destacar dos fases bien diferenciadas: la primera consiste en la elaboración del árbol y la segunda en su cuantificación.

A) ELABORACIÓN DEL ÁRBOL DE FALLOS

En esta fase se integran todos los conocimientos sobre el funcionamiento y operación de la instalación con respecto del suceso estudiado.

El primer paso consiste en identificar el suceso «no deseado» o suceso TOP que ocupará la cúspide de la estructura gráfica representativa del árbol. De la definición clara y precisa del TOP depende todo el desarrollo del árbol.

Con este TOP se establecen de forma sistemática todas las causas inmediatas que contribuyen a su ocurrencia, definiendo así los sucesos intermedios unidos a través de las puertas lógicas. El proceso de descomposición de un suceso intermedio se repite sucesivas veces hasta llegar a los sucesos básicos o componentes del árbol.

B) CUANTIFICACIÓN DEL ÁRBOL DE FALLOS

Para ello se reduce la lógica del árbol hasta obtener las combinaciones mínimas de sucesos primarios cuya ocurrencia simultánea garantiza la ocurrencia del propio TOP. Cada una de estas combinaciones, también llamadas conjunto mínimo de fallo (*minimal cut set* en la nomenclatura anglosajona), corresponde a la intersección lógica (en Algebra de Boole) de varios sucesos elementales. Como por hipótesis de los árboles de fallos se supone que los sucesos básicos son mutuamente independientes (es decir que la ocurrencia de uno de ellos no tiene influencia sobre la ocurrencia de otro), la probabilidad de un conjunto mínimo de fallo viene dada por el producto de las probabilidades de los sucesos elementales que lo componen. (Ver apartado 2.1.1, «Teorema de las probabilidades compuestas»).

A su vez el suceso TOP viene representado por la unión lógica de todos los N conjuntos mínimos de fallos y se evalúa su probabilidad -P(TOP)- aplicando el «Teorema de las probabilidades totales o de Poincaré», apartado 2.1.1:

$$P(TOP) = \sum_{i=1}^N C_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N C_i * C_j + \sum_{i=1}^{N-2} \sum_{j=i+1}^{N-1} \sum_{k=i+2}^N C_i * C_j * C_k + \dots + (-1)^{N-1} * C_i * C_j * \dots * C_N \quad (1)$$

donde C_i designa la probabilidad de un conjunto mínimo de fallos:

$$C_i = \prod_{s=1}^P a_s,$$

siendo a_s la probabilidad de s-ésimo suceso básico del conjunto mínimo de P sucesos (o de orden P).

Se suele aproximar la expresión (1) truncándola en el primer término. Esta simplificación, que se conoce como la del «suceso raro», facilita los cálculos y el error que se comete se puede despreciar. Algunos códigos informáticos de tratamiento de árboles de fallos permiten determinar el error cometido.

En los análisis mediante árboles de fallos se suele recurrir a otros estudios para acotar mejor los resultados. Entre ellos se destacan los análisis de incertidumbre y las clasificaciones de los sucesos base según distintas medidas de importancia. Se comentan brevemente a continuación cada uno de estos puntos.



2. Métodos para la determinación de frecuencias

C) ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Las tasas de fallos de los componentes que aparecen en un árbol de fallos deben ser extraídas de los bancos de datos de fiabilidad. Básicamente y tal como se puso de manifiesto en el apartado 2.3.2, se pueden considerar tres tipos de bancos:

1. Los de origen nuclear que recogen la larga experiencia operativa en numerosas plantas nucleares en el mundo y especialmente americanas (WASH-1400, CRYSTAL RIVER III, etc.).
2. Bancos de datos semi bibliográficos que incluyen datos extraídos de muy diversos orígenes (Rijnmond, etc.).
3. Bancos de datos específicos (OREDA para plataformas petrolíferas, por ejemplo).

Estos bancos estudian el comportamiento de un cierto número de equipos a lo largo del tiempo. Posteriormente los datos recogidos son tratados estadísticamente para obtener un valor representativo. Sin embargo, la mayoría de bancos de datos proporcionan no sólo un valor medio, sino que lo acompañan de un intervalo de variación dentro del cual podría oscilar el valor.

Esta dispersión obedece al hecho de que, en muchos casos, han entrado, en la «población» estadística considerada, componentes que:

- Trabajan en condiciones exteriores distintas (atmosféricas, entorno, etc.) o con productos diferentes,
- Son de características constructivas no directamente comparables,
- O están sometidos a políticas de mantenimiento no semejantes.

El valor medio extraído es, por tanto, un dato genérico que puede no adecuarse al caso en estudio.

Se considera habitualmente que la dispersión que existe sobre datos de este tipo puede ser descrita o ajustada a través de una ley de distribución logarítmica normal caracterizada por dos parámetros: un valor mediano (m) (que tiene acumulado un 50% de probabilidad) y un factor de error. Este factor de error (f) de-

limita un intervalo de variación para la probabilidad de fallo del componente definido como:

$$\begin{aligned} & \text{[min, max]} \\ \text{donde: } & \text{min} = m/f \\ & \text{max} = m \cdot f \end{aligned}$$

La tasa de fallos estará situada en el intervalo reseñado en un 90% de los casos. (Ver características de la ley de distribución lognormal, apartado 2.3.2).

La escasez de datos propios de plantas químicas, por un lado, y su falta de especificidad (adecuación al caso concreto estudiado), obliga a intentar medir la dispersión que puede existir sobre el resultado de una evaluación de un árbol de fallos en función de la dispersión que puedan tener los datos de partida. Este estudio es el denominado *análisis de incertidumbre*.

El análisis de incertidumbre consiste en medir la dispersión existente sobre el suceso TOP en función de la que puedan tener los fallos básicos.

En el caso en que se conoce la ley de distribución de los n componentes básicos del árbol, se suele recurrir al Método de Montecarlo que consiste en:

- Para cada componente se simula aleatoriamente una tasa de fallo. Para ello se genera un número aleatorio entre 0 y 1 que corresponde a la probabilidad de una determinada tasa; conocida la ley de distribución, se determina entonces la tasa de fallos correspondiente.
- Con los n valores de tasas de fallos generados aleatoriamente dentro de las distribuciones respectivas y correspondientes a los n componentes del árbol de fallos, se realiza una evaluación del árbol de fallos.
- Se repite N veces la operación con un nuevo conjunto de n -valores en cada caso.

Al final se obtienen N valores posibles del suceso TOP que a su vez puede ser tratados estadísticamente para calcular:

- Valor medio.
- Intervalo de variación.

El proceso descrito tiene que ser llevado a cabo mediante ordenador.

D) ANÁLISIS DE IMPORTANCIA

Con las medidas de importancia se pueden clasificar los conjuntos mínimos de fallos o los sucesos básicos según los criterios que permiten determinar los que son críticos para la instalación. Las principales medidas de importancia son las tres que se describen seguidamente. Es de notar que según las fuentes, las denominaciones e incluso las expresiones varían, aunque al ser valores relativos, no se alteran las conclusiones que se pueden extraer de este tipo de estudios.

Medida de importancia RAW (Risk Achievement Worth): Se define como el cociente entre la suma de las probabilidades de los conjuntos mínimos donde aparece el componente, asumiendo para éste una probabilidad de fallo de 1 (fallo seguro), y la probabilidad total del suceso TOP. Este factor mide la degradación que sufre el sistema en caso de ocurrir el fallo del componente. Tiene en cuenta la importancia «estructural» de un componente. Por ejemplo para un componente que constituye un conjunto mínimo de fallo de orden uno este factor es igual a la inversa de la probabilidad del suceso TOP. La expresión matemática del factor RAW respecto al componente C es:

$$\sum_{i=1 \text{ y } C \in C_i \text{ y } p(C)=1}^N p(C_i) / \sum_{i=1}^N p(C_i)$$

donde:

- C es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia.
- C_i es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema.
- p(C_i) es la probabilidad de C_i.
- C ∈ C_i representa que el componente C es uno de los componentes del conjunto mínimo de fallos C_i.
- p(C)=1 indica que el componente C adopta una tasa de fallos igual a 1 (fallo seguro).

Medida de importancia RRW (Risk Reduction Worth): Se define como el cociente entre la probabilidad total del suceso TOP y la suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos, asumiendo para el componente una tasa de fallo nula. Este factor proporciona el coeficiente por el cual quedaría dividida

la frecuencia total del suceso TOP analizado en el caso de que el componente fuera perfecto. Este factor permite determinar qué componentes se tienen que modificar para reducir apreciablemente el riesgo. La expresión matemática del factor RRW respecto del componente C es:

$$= \sum_{i=1}^N p(C_i) / \sum_{i=1 \text{ y } p(C)=0}^N p(C_i)$$

donde:

- C es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia.
- C_i es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema.
- p(C_i) es la probabilidad de C_i.
- p(C)=0 indica que el componente C adopta una tasa de fallos igual a 0 (no falla el componente).

Medida de importancia de Fussell-Vesely: Se define el factor de importancia de Fussell-Vesely respecto de un componente C como el cociente entre la suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos que contienen a este componente y la probabilidad total (o suma de las probabilidades de todos los conjuntos mínimos). Su expresión es:

$$\sum_{i=1 \text{ y } C \in C_i}^N p(C_i) / \sum_{i=1}^N p(C_i)$$

donde:

- C es el componente respecto del cual se calcula la medida de importancia
- C_i es uno de los N conjuntos mínimos de fallos del sistema
- p(C_i) es una probabilidad
- C ∈ C_i representa que el componente C es uno de los componentes del conjunto mínimo de fallos C_i.



2. Métodos para la determinación de frecuencias

Este factor tiene en cuenta el número de conjuntos mínimos de fallos en que aparece un componente (frecuencia de aparición en el árbol); su probabilidad y la de los componentes a los cuales va asociado.

Las medidas de importancia RAW y RRW son las más utilizadas porque su significado es más directo: se expresan en términos de porcentaje de mejora o empeoramiento de la probabilidad del TOP.

Por último, cabe tener en cuenta que también existen medidas de importancia respecto de los conjuntos mínimos de fallos.

2.4.1.2 *Ambito de aplicación*

La técnica, por su grado de elaboración, se aplica a sucesos relativamente complejos para los cuales no es posible la obtención directa de la frecuencia.

Estos sucesos se han de poder descomponer en sucesos más sencillos.

2.4.1.3 *Recursos necesarios*

RECURSOS HUMANOS

La técnica es relativamente compleja y tiene que ser aplicada por un analista con una preparación adecuada en el uso del método. Requiere normalmente un proceso de revisión por un tercero si se quiere garantizar la calidad del estudio (por sus características se presta a interpretaciones distintas de los analistas, si no se fijan claramente los supuestos y criterios antes del estudio). También es necesario considerar una importante dedicación para la determinación de las tasas de fallos de los componentes.

Para un árbol de fallos de unos 50 componentes se podrían considerar las siguientes actividades:

- Estudio de sistema (dos días de dedicación).
- Elaboración del árbol (un día).

Estas dos fases requieren para el analista el apoyo de todas las personas que más conocen el área de la instalación y su operación: personal de producción, mantenimiento, operadores, instrumentistas, etc.

- Determinación de las frecuencias (un día).
- Cuantificación del árbol mediante ordenador (4 horas).
- Estudio de resultados (dos días).
- Propuestas de mejoras (4 horas).
- Reelaboración del árbol incluyendo mejoras y evaluación (dos días y medio).

Es decir, un total de unas 76 horas de dedicación de un analista experto, pudiendo variar esta estimación en función de la complejidad del sistema, de la experiencia anterior del analista en cuanto al tipo de sistema y por último, del grado de detalle que se persiga en el estudio.

RECURSOS MATERIALES

La técnica del árbol de fallos es relativamente detallada y requiere un excelente conocimiento del sistema. Desde el punto de vista de documentación se requerirá toda la disponible: desde los diagramas de tubería e instrumentación hasta los procedimientos de operación/mantenimiento seguidos y los detalles de diseño de cada elemento, ya que el árbol de fallos incorpora multitud de aspectos.

2.4.1.4 Soportes informáticos

Para árboles con un número de componentes no muy elevado el esfuerzo de evaluación exige el uso de un programa de evaluación de árboles de fallos. En la tabla 2.7 se reseñan algunos de los códigos existentes.

Se distinguen básicamente en su forma de resolución del árbol de fallos.

2.4.1.5 Ventajas/inconvenientes

VENTAJAS

1. La técnica estudia las causas de los sucesos indeseados y permite evidenciar los puntos débiles de un sistema (conjuntos mínimos de fallos). Este aspecto es fundamental en materia de prevención de accidentes.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

TABLA 2.7 CODIGOS DE CALCULO DE ARBOLES DE FALLOS

Código	Características
Análisis cualitativo: PREP, 1970; ELRAFT, 1971; MOCUS, 1972; TREEL, MICSUP, 1975; ALLCUTS, 1975; SETS, 1974; FTAP, 1978.	Calculan los conjuntos mínimos de fallos o caminos de éxito.
Análisis cualitativo: KITTI, KITTI2, 1970; SAMPLE, MOCARS, 1977; FRANTIC, 1977.	Realizan el cálculo probabilístico sobre la base de los conjuntos mínimos de fallos.
Evaluación directa: ARMM, 1965; SAFTE, 1968; GO, 1968; GO'FAULT FINDER, 1977; NOTED, 1971; PATREC, 1974; PATREC- MC, 1977; BAM, 1975; WAM-BAM, 1976; WAM- CUT, 1978.	Realizan la evaluación numérica directa sin calcular previamente todos los conjuntos mínimos de fallos.
Uso doble: PL-MOD, 1977.	
Otros: SALP-PC, 19; MODULE, 1988; CARA, 1988; etc.	

2. A través del análisis de importancia se conoce el peso relativo de los distintos elementos del sistema. Con ello se puede establecer una lista de prioridades a fijar para mejorar la instalación.
3. La técnica es un método para conocer a fondo un sistema.

INCONVENIENTES

1. No permite tratar directamente fallos dependientes, al menos de forma directa, aunque siempre sea posible añadir el fallo dependiente como un componente más del árbol.
2. Sólo permite el tratamiento de situaciones temporales homogéneas.

-
3. El resultado calculado presenta una incertidumbre asociada a la que pesa sobre los componentes básicos, a los posibles errores en la construcción o debido a criterios dispares de los analistas.

2.4.1.6 Ejemplos

Se presenta a continuación un caso práctico de desarrollo de un árbol de fallos.

Sistema de partida

El sistema de partida es un depósito horizontal refrigerado de 180 m³ de amoníaco. El suceso TOP se define como «Rotura del depósito de amoníaco». Se pretende determinar las causas que pueden conducir al suceso y la probabilidad del evento sobre un período de un año.

A) DESCRIPCIÓN DEL ÁRBOL DE FALLOS

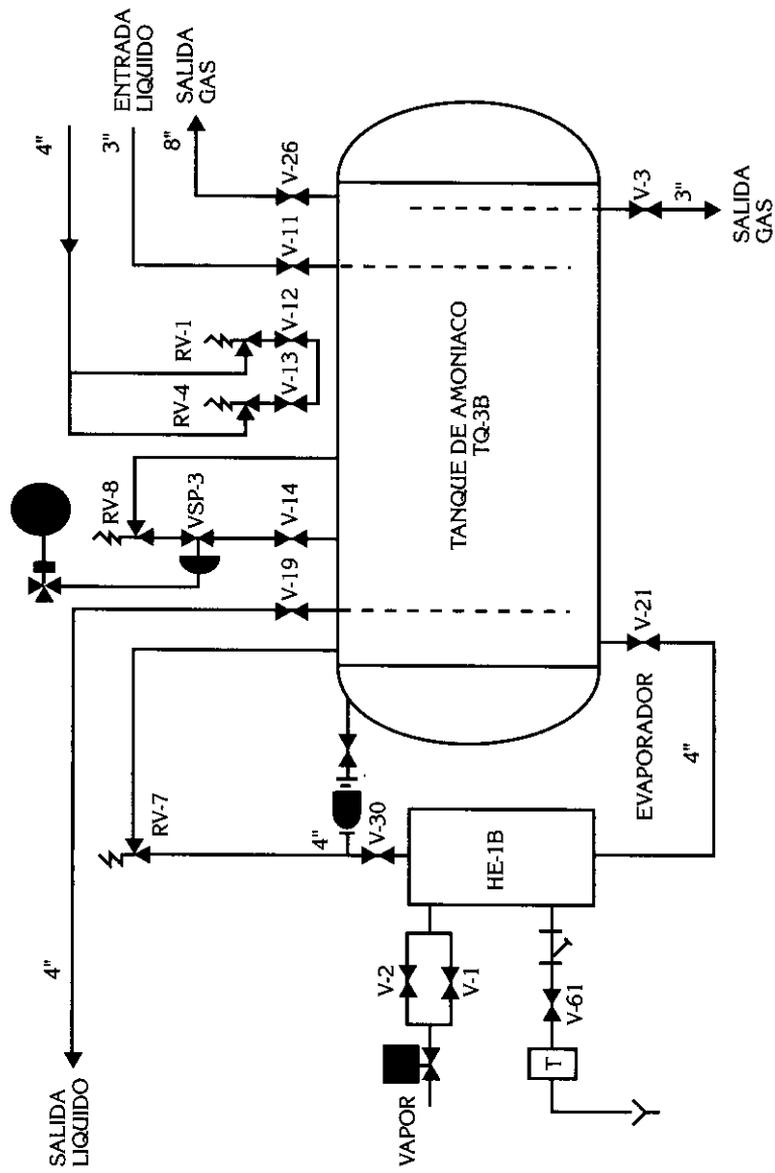
El suceso TOP estudia las posibilidades de rotura catastrófica del depósito de amoníaco, representado en la figura 2.12.

Se han considerado básicamente las tres posibilidades de rotura siguientes:

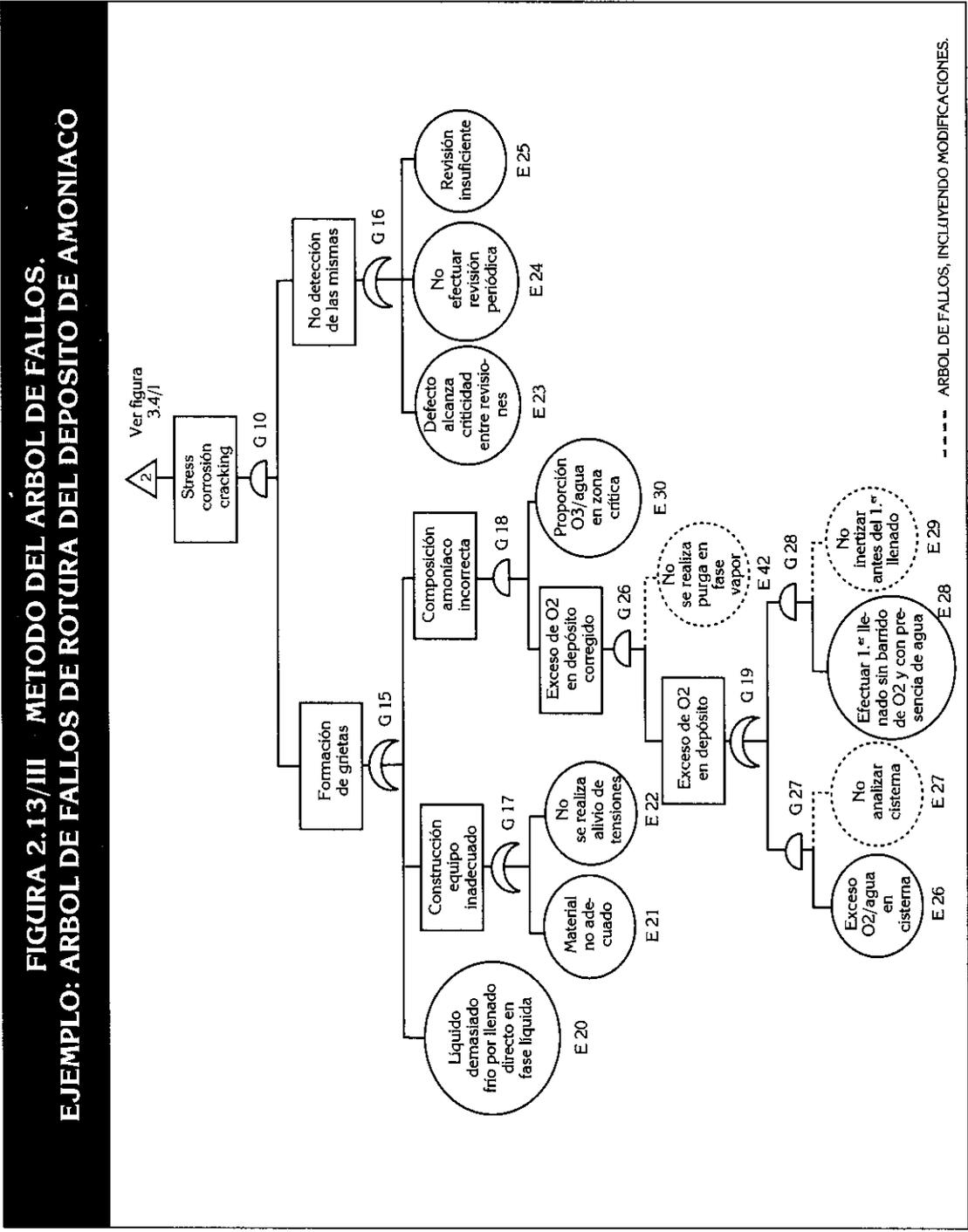
- Por sobrecarga del cuerpo del depósito, que englobaría el fallo del soporte, un exceso de calor externo y un exceso de presión.
- Por defecto mecánico, que englobaría un inadecuado diseño, la corrosión y la fatiga del depósito.
- Por rotura frágil, que englobaría una carga externa y la posibilidad de alcanzar una temperatura por debajo de la crítica.

En la figura 2.13 se representa el árbol de fallos de la rotura del depósito de amoníaco y en la tabla 2.8 se recogen los componentes considerados, indicándose su tasa (probabilidad de ocurrencia/fallo sobre un período de un año), la fuente de donde fue extraído o los cálculos efectuados para la obtención del valor y, finalmente, un factor de error que mide la dispersión que existe sobre la tasa de fallo, suponiendo que se distribuye según una ley logarítmico normal.

**FIGURA 2.12 METODO DEL ARBOL DE FALLOS. EJEMPLO:
ESQUEMA DEL DEPOSITO DE AMONIACO**



1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.



1. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

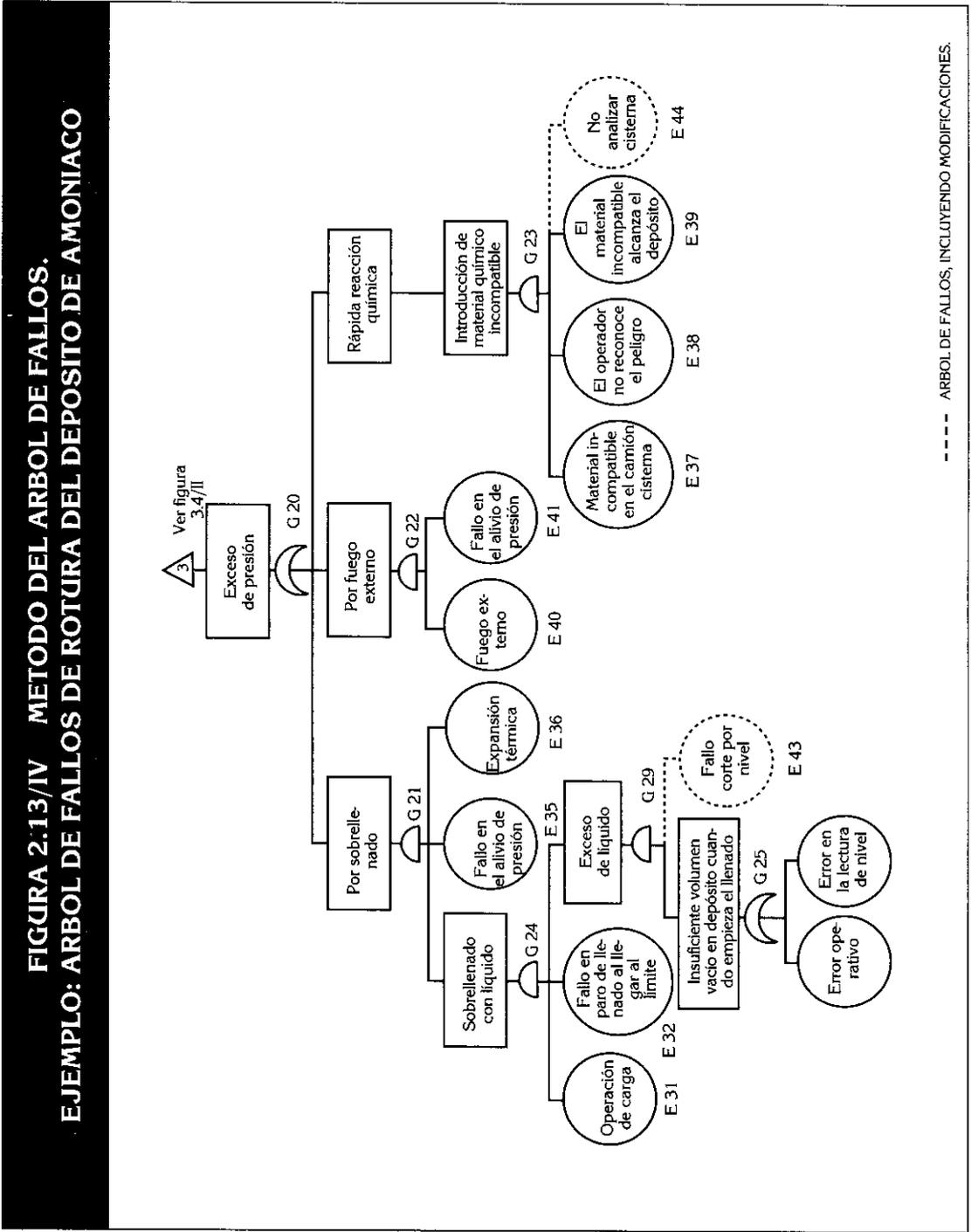


TABLA 2.8 RELACION DE COMPONENTES BASICOS PARA EL EJEMPLO DE ARBOL DE FALLOS

Empresa:
Unidad:
Titulo: Rotura del depósito de amoníaco.

| Identificación | Descripción del suceso básico | Valor adoptado (1) | Factor de error (2) | Nota | Fuente |
|----------------|---|----------------------|---------------------|--|----------------------|
| E1 | Inadecuado diseño. | 10^{-7} | 100,00 | Error en el diseño (material incorrecto, características, etcétera). | Estimado y Rijnmond. |
| E2 | Fuerte vibración. | 10^{-7} | 100 | Por causas externas (terremoto, fallo del terremoto, etcétera). | Estimado. |
| E3 | Inadecuada construcción. | 10^{-6} | 100 | Error en el montaje del depósito. | Rijnmond. |
| E4 | La rotura del depósito se produce antes de la fuga de NH ₃ . | 10^{-3} | 100 | Se refiere al hecho de que la corrosión produce la rotura del depósito, no fisura. | Rijnmond. |
| E5 | Material corrosivo en la cisterna. | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | 100 | Por error, existe un material corrosivo en el camión cisterna. | Rijnmond. |
| E6 | Material corrosivo llega al depósito. | 0,95 | 1 | Muy improbable detección. | Rijnmond |
| E7 | Carga externa. | 10^{-3} | | Carga debida a causas externas. | Experie. ing. |
| E8 | Error operativo. | 10^{-4} | 100 | Se considera error operativo de adición de NH ₃ líquido al depósito vacío. | Rijnmond. |
| E9 | Depósito vacío. | 0,16 | 100 | Se realiza un vaciado cada seis años (revisión de equipo). | Datos planta. |
| E10 | Disparo intempestivo de PSV (3). | $6,12 \cdot 10^{-3}$ | 3 | La tasa de apertura intempestiva de una PSV es $3,06 \cdot 10^{-3}$ (existen dos PSV). | Wash-1400. |
| E11 | No detección disparo PSV. | 10^{-4} | 100 | Se considera error operativo. | Rijnmond. |
| E12 | Impacto de vehículo. | 10^{-8} | 100 | Colisión de un vehículo pesado sobre el soporte. | Estimado. |
| E13 | Terremoto. | 10^{-7} | 100 | Fallo mecánico del soporte. | Estimado. |

(1) Representa la posibilidad de ocurrencia sobre un periodo anual.

(2) Se supone que probabilidad se distribuye según una distribución lognormal caracterizada por un valor mediano (columna «valor adoptado») y un factor de error que mide la incertidumbre sobre el dato (ver apartado 2.3.2), de forma que se garantiza, con una confianza del 90%, que la probabilidad se encuentra dentro de un intervalo cuyo valor inferior es la mediana multiplicada por el factor error. Así para E1 la probabilidad se halla en el intervalo $[10^{-7}/100x]$ es decir $[10^{-8}; 10^{-5}]$.

(3) Pressure Safety Valve.

TABLA 2.8 RELACION DE COMPONENTES BASICOS PARA EL EJEMPLO DE ARBOL DE FALLOS (Continuación)

| Identificación | Descripción del suceso básico | Valor adoptado (1) | Factor de error (2) | Nota | Fuente |
|----------------|--|----------------------------|---------------------|--|-----------|
| E14 | Defecto mecánico. | 10^{-7} | 100 | Hundimiento del terreno bajo el depósito. | Rijnmond. |
| E15 | Hundimiento. | 2.10^{-7} | 100 | | Rijnmond. |
| E16 | Fuego externo. | 10^{-9} | 100 | Fuego de la suficiente intensidad y duración como para producir el fallo del depósito. | Estimado. |
| E17 | Fallo del depósito antes que el soporte. | 0,5 | 1 | Se asume que el depósito y el soporte tienen igual resistencia. | Estimado. |
| E18 | Fuego externo. | 10^{-9} | 100 | Fuego de la suficiente intensidad y duración como para producir el fallo del soporte. | Estimado. |
| E19 | Fallo del soporte antes que el depósito. | 0,5 | 1 | (Ver E17). | Estimado. |
| E20 | Líquido demasiado frío por llenado directo en fase líquida. | $1,6.10^{-5}$ | 100 | Sería la combinación de los eventos E8 y E9. | Estimado. |
| E21 | Material no adecuado. | 10^{-4} | 100 | Material inadecuado con las condiciones de trabajo. | Estimado. |
| E22 | No se realiza alivio de tensiones. | 10^{-4} | 100 | | Estimado. |
| E23 | Defecto alcanza criticidad entre revisiones. | 10^{-3} | 10 | El fallo se hace crítico entre revisiones (período de 6 años). | Estimado. |
| E24 | No efectuar revisiones periódicas. | 10^{-6}
$1,6.10^{-5}$ | 10
100 | (Período de 3 años).
No cumplimiento de la norma de una revisión cada 6 años. | Estimado. |
| E25 | Revisión insuficiente. | 10^{-4} | 100 | Se considera error operativo. | Rijnmond |
| E26 | Exceso de O ₂ /agua en camión cisterna. | 10^{-4} | 100 | Producto fuera de especificaciones. | Estimado. |
| E27 | No analizar camión cisterna | 10^{-4} | 100 | No realizar análisis del contenido del camión cisterna antes de la carga. | Estimado |
| E28 | Efectuar primer llenado sin barrido de O ₂ , presencia de agua. | $1,6.10^{-5}$ | 100 | Error operativo después de cada vaciado (combinación de E8 y E9). | Estimado |
| E29 | No inertizar antes del primer llenado. | 10^{-4} | 100 | Error operativo. | Rijnmond |

TABLA 2.8 RELACION DE COMPONENTES BASICOS PARA EL EJEMPLO DE ARBOL DE FALLOS (Continuación)

| Identificación | Descripción del suceso básico | Valor adoptado (1) | Factor de error (2) | Nota | Fuente |
|----------------|--|----------------------|---------------------|---|-------------------|
| E30 | Proporción O ₂ /agua en zona crítica. | 0,5 | 1 | Es preciso una determinada proporción O ₂ /agua para que sea crítico. | Estimado Ing. |
| E31 | Frecuencia de carga. | 0,9999 | 1 | La operación se realiza 12 veces al año. | Datos planta |
| E32 | Fallo en paro de llenado al llegar al límite. | 10 ⁻⁴ | 100 | Error operativo. | Rijnmond. |
| E33 | Error operativo. | 10 ⁻⁴ | 100 | Error operativo cuando existe insuficiente volumen libre. | Rijnmond. |
| E34 | Error de lectura de nivel. | 10 ⁻⁴ | 100 | Error operativo. | Rijnmond. |
| E35 | Fallo en el alivio de presión. | 4.10 ⁻⁸ | 100 | Fallo de las dos válvulas de seguridad simultáneo. | Estimado |
| E36 | Expansión térmica. | 0,3 | 1 | Se asume que la probabilidad de subida, bajada o mantenimiento de la temperatura en estas condiciones es igual. | Estimado |
| E37 | Material incompatible en el camión cisterna. | 1,5.10 ⁻⁶ | 100 | | Rijnmond. |
| E38 | El operador no reconoce el peligro. | 0,3 | 3 | Mayor probabilidad que un error operativo, ya que en este caso no dispone de la suficiente información. | Rijnmond. |
| E39 | El material incompatible alcanza el depósito. | 0,95 | 1,05 | Similar a E6. | Rijnmond. |
| E40 | Fuego externo. | 10 ⁻⁷ | 100 | Fuego de la suficiente intensidad y duración como para producir el aumento de presión. | Estimado. |
| E41 | Fallo en el alivio de presión. | 4.10 ⁻⁸ | 100 | Ver E35. | |
| E42 | No se realiza purga en fase vapor. | 10 ⁻⁴ | 100 | Se considera error operativo. | Rijnmond. |
| E43 | Fallo corte por alto nivel. | 1,4.10 ⁻³ | 10 | No acción del control por alto nivel (1,7-10-6 hr.). | Crystal River III |
| E44 | No analizar cisterna. | 10 ⁻⁴ | 100 | Ver E27. | Estimado. |
| E45 | No analizar cisterna. | 10 ⁻⁴ | 100 | Ver E27. | |

2. Métodos para la determinación de frecuencias

B) RESULTADOS CUALITATIVOS

La evaluación del árbol de fallos proporciona, desde el punto de vista cualitativo, la distribución en conjuntos mínimos de fallo (agrupación de fallo/sucesos que, ocurriendo simultáneamente, conducen a la ocurrencia del suceso TOP estudiado, en este caso la rotura del depósito de amoníaco) que se indica en el cuadro siguiente.

El número total de conjuntos mínimos (*minimal cut set*) es de 30.

Existen 5 conjuntos mínimos de orden 1; es decir, causas únicas que conducen a la rotura del depósito. Son la mayoría causas «externas» como un terremoto, un impacto de vehículo o un fallo del asentamiento del terreno; las restantes son un inadecuado diseño o defecto mecánico del equipo.

Existen 13 conjuntos mínimos de orden 2; es decir combinaciones de dos fallos simultáneos que conducen a la rotura del depósito. La combinación E16 E17: incendio externo y fallo mecánico del depósito, es un ejemplo.

Existen 10 conjuntos mínimos de orden 3; es decir, combinaciones triples. E4 E5 E6: introducción de un material corrosivo en el depósito y falta de detección e intervención por parte del operador es un ejemplo.

Por último, la rotura del depósito también puede producirse por un sobrellenado del mismo, pero en este caso es necesaria la ocurrencia de 5 sucesos al mismo tiempo.

| Orden | Mínimal cutset (MCS) | Composición | Probabilidad |
|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 1 | E15 | Fallo del asentamiento del terreno. | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| | E14 | Defecto mecánico del soporte. | 10^{-7} |
| | E13 | Terremoto. | 10^{-7} |
| | E1 | Inadecuado diseño del depósito. | 10^{-7} |
| | E12 | Impacto de vehículo. | 10^{-8} |
| | Número de MCS = 5 | | |

| Orden | Minimal cutset (MCS) | | | Composición | Probabilidad |
|--------------------|----------------------|-----|-----|---|-----------------------|
| 2 | E23 | E21 | | Combinaciones de dos sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> . | 10^{-10} |
| | E23 | E22 | | | 10^{-10} |
| | E20 | E23 | | | $1,6 \cdot 10^{-11}$ |
| | E25 | E22 | | | 10^{-8} |
| | E24 | E21 | | | $1,6 \cdot 10^{-9}$ |
| | E25 | E21 | | | 10^{-8} |
| | E24 | E22 | | | $1,6 \cdot 10^{-9}$ |
| | E20 | E25 | | | $1,6 \cdot 10^{-8}$ |
| | E20 | E24 | | | $2,56 \cdot 10^{-10}$ |
| | E16 | E17 | | Incendio externo y fallo mecánico del depósito. | $5 \cdot 10^{-10}$ |
| | E18 | E19 | | Incendio externo y fallo mecánico del soporte. | $5 \cdot 10^{-10}$ |
| | E40 | E41 | | Incendio externo y fallo del de presión. | $4 \cdot 10^{-15}$ |
| | E2 | E3 | | Inadecuada construcción del depósito y vibración fuerte. | 10^{-13} |
| Número de MCS = 13 | | | | | |
| 3 | E37 | E38 | E39 | Introducción de material incompatible al depósito no detección, ni intervención del operador. | $4,3 \cdot 10^{-7}$ |
| | E23 | E30 | E26 | Combinaciones de tres sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> . | $5 \cdot 10^{-11}$ |
| | E23 | E30 | E28 | | $8 \cdot 10^{-12}$ |
| | E25 | E30 | E26 | | $5 \cdot 10^{-9}$ |
| | E25 | E30 | E28 | | $8 \cdot 10^{-10}$ |
| | E24 | E30 | E26 | | $8 \cdot 10^{-10}$ |
| | E24 | E30 | E28 | $1,3 \cdot 10^{-10}$ | |
| | E4 | E5 | E6 | Introducción de material corrosión en el tanque; no detección ni intervención por parte del operador. | $1,4 \cdot 10^{-9}$ |

2. Métodos para la determinación de frecuencias

| Orden | Minimal cutset (MCS) | | | | Composición | Probabilidad |
|--------------------|----------------------|-----|-----|-----|---|------------------------|
| 3 | E7 | E8 | E9 | | Tanque vacío, error operativo con introducción de NH ₃ y carga externa. | 1,6.10 ⁻⁸ |
| | E7 | E10 | E11 | | Disparo intempestivo de válvulas de seguridad con bajada de temperatura en el depósito y carga externa. | 6,12.10 ⁻¹⁰ |
| Número de MCS = 10 | | | | | | |
| 5 | E35 | E36 | E32 | E33 | Rotura por sobrepresión debida a un sobrellenado. | 1,68.10 ⁻¹¹ |
| | E35 | E36 | E31 | E34 | | 1,68.10 ⁻¹¹ |
| Número de MCS = 2 | | | | | | |

C) RESULTADOS CUANTITATIVOS

La probabilidad del suceso TOP sobre un período de un año es de $1,3 \cdot 10^{-6}$.

Desde el punto de vista cuantitativo cada uno de los *minimal cut set* de la tabla anterior tiene asociado una probabilidad (el producto de las probabilidades de los componentes (1), ver tabla 2.8) que se indica en la citada tabla. La suma de estas probabilidades proporciona la probabilidad del suceso TOP. En este caso se obtiene un valor de $1,3 \cdot 10^{-6}$ sobre un período de un año.

Otra forma de presentar la información cuantitativa consiste en determinar las probabilidades de los sucesos intermedios de la estructura del árbol.

La distribución en sucesos intermedios se reseña en la tabla siguiente de la página siguiente.

(1) Admitiendo la aproximación del «suceso raro» (ver pág. xxx).

| Suceso intermedio | Probabilidad | Porcentaje respecto del TOP |
|---|---------------------------------------|-----------------------------|
| Gran sobrecarga del cuerpo del depósito (puerta lógica G2) (b) por: | <u>$8,9 \cdot 10^{-7}$</u> | <u>69</u> |
| - Fallo soporte (G12) | $(4,1 \cdot 10^{-7})$ | (31,3) |
| - Exceso calor externo (G13) | $(5 \cdot 10^{-10})$ | (-) (f) |
| - Exceso de presión (G20) (c): | $(4,8 \cdot 10^{-6})$ | |
| • Por sobrellenado (G21) | $(5,2 \cdot 10^{-8})$ | (4) |
| • Por fuego externo (G22) | $(4 \cdot 10^{-15})$ | (-) |
| • Por reacción química rápida (G23) | $(4,3 \cdot 10^{-7})$ | (33,5) |
| Defecto mecánico (G3) (d) | <u>$3,8 \cdot 10^{-7}$</u> | <u>29,7</u> |
| - Diseño inadecuado (E1) | $(1 \cdot 10^{-7})$ | (7,8) |
| - Corrosión (G5) (e): | | |
| • Por material corrosivo introducido desde camiones cisterna (G9) | $(1,4 \cdot 10^{-8})$ | (1,1) |
| • <i>Stress corrosion cracking</i> (G10) | $(2,66 \cdot 10^{-7})$ | (20,8) |
| • Fatiga (G6) | $(1 \cdot 10^{-13})$ | (-) |
| Rotura frágil (G4) | <u>$1,6 \cdot 10^{-8}$</u> | <u>1,3</u> |
| TOP (a) (TOTAL) | <u>$1,3 \cdot 10^{-6}$</u> | <u>100</u> |

Notas:

- El suceso TOP se expresa como suma lógica de los sucesos G2, G3 y G4.
 $TOP = G2 + G3 + G4$
- El suceso G2 se expresa como suma lógica de los sucesos G12, G13 y G20.
 $G2 = G12 + G13 + G20$
- El suceso G20 se expresa como suma lógica de los sucesos G21, G22 y G23.
 $G20 = G21 + G22 + G23$
- El suceso G3 se expresa como suma lógica de los sucesos intermedios G5 y del suceso básico E1. $G3 = E1 + G5$.
- El suceso G5 se expresa como suma lógica de los sucesos intermedios G9, G10 y G6.
 $G5 = G9 + G10 + G6$, de acuerdo con la notación de la lógica booleana de la tabla 2.1, en que el signo más representa la unión de sucesos o «0» lógico y truncando la expresión (1) de la página xxx, (aproximación del «suceso raro»).
- Valor despreciable.



2. Métodos para la determinación de frecuencias

En la primera columna se indican los tres sucesos intermedios que condicionan el suceso TOP: las puertas lógicas G2, G3 y G4. Estas puertas están indicadas a través de un 'O' lógico por la suma de sus probabilidades indicadas en la segunda columna y subrayadas dan la probabilidad del TOP ($8,9 \cdot 10^{-7}$; $3,8 \cdot 10^{-7}$; $1,6 \cdot 10^{-8}$). Se reparten el 100% de la probabilidad de TOP que se reseña en la última columna y subrayadas (69, 29,7 y 1,3%).

Por otra parte, se indican las probabilidades de los sucesos intermedios en los cuales pueden ser descompuestos los sucesos intermedios G2, G3 y G4, dándose valores entre paréntesis. Así la probabilidad de G2 se expresa como suma de las probabilidades de las puertas G12, G13 y G20 ($4,1 \cdot 10^{-7}$; $5 \cdot 10^{-10}$; $4,8 \cdot 10^{-6}$).

Se observa que la probabilidad de producirse la rotura del depósito de amoníaco reside en un 33,5% respecto del TOP en la ocurrencia de una reacción química rápida por la introducción de material químico incompatible en el depósito, desde la cisterna, al no realizarse el análisis de la misma.

Con un valor similar se encuentra el fallo de los soportes debido bien sea a causas naturales externas (fallo del asentamiento, impacto o terremoto), bien sea a un defecto mecánico o diseño inadecuado.

Le sigue en importancia el defecto mecánico por *stress corrosion cracking*, que englobando las diferentes posibilidades, tendría un peso sobre el total del 20,8%.

D) ANÁLISIS DE IMPORTANCIA

Los componentes cuyos RRW es más importantes son:

| Componente | RRW |
|---|-----|
| - Material incompatible en la cisterna (E37). | 1,5 |
| - El operador no reconoce el peligro (E38). | 1,5 |
| - El material incompatible alcanza el depósito (E39). | 1,5 |
| - Defecto alcanza criticidad entre revisiones (E23). | 1,3 |
| - Hundimiento (E15). | 1,2 |

Ejemplos de cálculo

- Para el componente E37 que únicamente aparece en el *minimal cut set* de orden 3 (E37 E38 E39) y que tiene una probabilidad de $4,3 \cdot 10^{-7}$, el RRW, de acuerdo con la fórmula reseñada en la pág. 66, es:

$$\frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6} - 4,3 \cdot 10^{-7}} \approx 1,5$$

donde $1,3 \cdot 10^{-6}$ es la probabilidad del suceso TOP.

- Para el componente E15 que configura un *minimal cut set* de orden 1 de probabilidad igual a $2 \cdot 10^{-7}$ el valor de RRW es:

$$\frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-7}} \approx 1,2$$

Si se consigue eliminar la posibilidad de que se introduzca un material incompatible en la cisterna (el suceso E37 adoptaría una probabilidad igual a 0), la probabilidad de que se produzca una rotura del depósito se divide por 1,5 (RRW de E37) pasando a ser por tanto de $8,6 \cdot 10^{-7}$, es decir, que se reduce en un 66%.

El resto de componentes posee un RRW más próximo a 1, es decir, si su tasa de fallo fuera cero la repercusión sobre el suceso sería despreciable.

Los componentes cuyos RAW son mayores:

| Componente | RRW |
|--|-----|
| - Material de construcción del depósito no adecuado (E21); no realización del alivio de tensiones (E22); líquido demasiado frío por llenado directo en fase líquida (E20). | 876 |
| - Material corrosivo en cisterna (E5). | 746 |
| - Exceso O ₂ /agua en cisterna (E26); efectuar el primer llenado sin barrido de O ₂ y con presencia de agua (E28). | 439 |

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Ejemplos de cálculo

- Para el componente E21 (de probabilidad 10^{-4}) que aparece en tres *minimal cut set* (E23 E21; E24 E21; E25 E21), se puede aproximar que la probabilidad de los *minimal cut set* donde aparece E21 pasa a ser 10^{-6} , $1,6 \cdot 10^{-5}$ y 10^{-4} , respectivamente, si la probabilidad de E21 es igual a 1.

La suma de las probabilidades de los *minimal cut set* que permanecen invariables se puede encontrar mediante resta de la probabilidad del TOP y el de los *minimal cut set*, es decir,

$$1,3 \cdot 10^{-6} - 1,17 \cdot 10^{-6} = 1,183 \cdot 10^{-5}$$

De donde, por último:

$$\frac{10^{-6} + 1,6 \cdot 10^{-5} + 10^{-4} + 1,183 \cdot 10^{-5}}{1,3 \cdot 10^{-6}} \approx 876$$

- Para el componente E5 de probabilidad $1,5 \cdot 10^{-5}$ que aparece en un *minimal cut set* de orden 3 (E4 E5 E6) se tiene:
 - Probabilidad del *minimal cut set* asumiendo que E5 falla (probabilidad igual a 1) es: $9,5 \cdot 10^{-4}$.
 - Probabilidad correspondiente a la suma de los restantes *minimal cut set*.

$$1,3 \cdot 10^{-6} - 1,425 \cdot 10^{-8} = 1,3 \cdot 10^{-6}$$

siendo $1,4 \cdot 10^{-9}$ el valor del *minimal cut set* E4 E5 E6.

- Por último, el RAW resultante es:

$$\frac{9,5 \cdot 10^{-6} + 1,3 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6}} \approx 746$$



Si existiera un error en la selección del material de construcción del depósito (suceso E21), la probabilidad de rotura del depósito sería de $1,14 \cdot 10^{-3}$, es decir 876 veces mayor (valor del RAW de E21).

E) ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Tal como consta en la tabla de definición de los componentes (tabla 2.8), se ha considerado que existe incertidumbre sobre las probabilidades de los sucesos básicos, de tal forma que se ajusta esta incertidumbre con una ley de distribución lognormal caracterizada por su mediana y factor de error.

Para calcular la dispersión existente sobre el suceso TOP se han llevado a cabo 1.200 evaluaciones del árbol generando aleatoriamente para cada suceso básico un valor dentro del rango de valores posibles.

Se representa en la tabla de la página xx las probabilidades acumuladas de los valores obtenidos para el TOP.

El TOP con esta simulación tiene una probabilidad del 5% de ser un valor inferior a $2,2 \cdot 10^{-8}$, mientras que con una confianza del 95% se puede asegurar que la probabilidad del TOP será inferior a $5,69 \cdot 10^{-7}$.

De esta forma se puede afirmar con una confianza del 90% que la probabilidad del TOP se halla en el intervalo $[2,2 \cdot 10^{-8}; 5,69 \cdot 10^{-7}]$.

Esta distribución viene caracterizada por otros parámetros estadísticos como son el valor medio (suma de los 1.200 valores obtenidos partido por 1.200); la desviación tipo (suma de las diferencias cuadráticas con respecto de la media dividida por 1.200) y la mediana (valor que acumula un 50% de probabilidad).

| | |
|-------------------------------|----------------------|
| Media: | $1,39 \cdot 10^{-6}$ |
| Desviación tipo: | $1,02 \cdot 10^{-5}$ |
| Mediana: | $2,04 \cdot 10^{-7}$ |
| Tamaño de la muestra (1.200). | |

Cabe destacar que la evaluación «puntual» con los valores medianos de los componentes proporcionaba un valor de $1,3 \cdot 10^{-6}$ cercano al de la media.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Distribución acumulada de la probabilidad del suceso TOP

| Confianza
% | Probabilidad
del TOP |
|----------------|-------------------------|
| 0,5 | $8,61 \cdot 10^{-9}$ |
| 1,0 | $1,21 \cdot 10^{-8}$ |
| 2,5 | $1,60 \cdot 10^{-8}$ |
| 5,0 | $2,22 \cdot 10^{-8}$ |
| 10,0 | $3,16 \cdot 10^{-8}$ |
| 20,0 | $5,77 \cdot 10^{-8}$ |
| 25,0 | $7,33 \cdot 10^{-8}$ |
| 30,0 | $8,82 \cdot 10^{-8}$ |
| 40,0 | $1,29 \cdot 10^{-7}$ |
| 50,0 | $2,04 \cdot 10^{-7}$ |
| 60,0 | $3,04 \cdot 10^{-7}$ |
| 70,0 | $4,35 \cdot 10^{-7}$ |
| 75,0 | $5,78 \cdot 10^{-7}$ |
| 80,0 | $7,29 \cdot 10^{-7}$ |
| 90,0 | $1,99 \cdot 10^{-7}$ |
| 95,0 | $5,69 \cdot 10^{-7}$ |
| 97,5 | $1,02 \cdot 10^{-5}$ |
| 99,0 | $1,81 \cdot 10^{-5}$ |
| 99,5 | $2,87 \cdot 10^{-5}$ |

F) MEJORAS A INTRODUCIR

Sobre la base del estudio de los resultados de evaluación del árbol se propone una serie de mejoras que van encaminadas a reducir la probabilidad de los sucesos que, a través del estudio de importancia, han resultado tener un peso específico apreciable.

1. Control de calidad de la cisterna para analizar su contenido antes de la descarga, con el fin de:
 - Verificar que contiene NH_3 para evitar la introducción en el depósito de un material incompatible o corrosivo.
 - Comprobar si presenta un exceso de O_2 /agua.

2. Realizar purga en la fase vapor del depósito.
3. Inertizar el depósito antes del primer llenado.
4. Reducir a la mitad (3 años) el período entre revisiones.
5. Colocar un medidor de nivel en el depósito que detenga la operación de carga por alto nivel.

Estas mejoras conducen a la introducción de nuevos componentes (E45, E27, E42, E29, E43 y E44), que se señalan en el árbol de fallos de la figura 2.13 mediante trazos discontinuos. Con estas mejoras la evaluación del árbol de fallos ofrece los resultados que se señalan en los siguientes apartados.

a) *Evaluación cualitativa del árbol de fallos considerando las mejoras*

La distribución en conjuntos mínimos de fallos se modifica de la siguiente forma.

El número total de conjuntos mínimos (*minimal cut set*) es de 30.

Los sucesos debidos a fenómenos externos se mantienen (conjuntos mínimos de orden 1 y 2), mientras que se reduce el número de los conjuntos mínimos de fallos de orden 3 (de 10 a 2), apareciendo conjuntos mínimos de orden 4 y 6.

En la tabla siguiente se subrayan los componentes que corresponden a mejoras y que aumentan el orden de los conjuntos mínimos de fallos.

| Orden | Minimal cutset (MCS) | Composición | Probabilidad |
|-------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 1 | E15 | Fallo del asentamiento del terreno. | $2 \cdot 10^{-7}$ |
| | E14 | Defecto mecánico del soporte. | 10^{-7} |
| | E13 | Terremoto. | 10^{-7} |
| | E1 | Inadecuado diseño del depósito. | 10^{-7} |
| | E12 | Impacto de vehículo. | 10^{-8} |
| | Número de MCS = 5 | | |



2. Métodos para la determinación de frecuencias

| Orden | Minimal cutset (MCS) | | | Composición | Probabilidad |
|--------------------|----------------------|-----|-----|---|---|
| 2 | E23 | E21 | | Combinaciones de dos sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> . | 10^{-10} |
| | E23 | E22 | | | 10^{-10} |
| | E20 | E23 | | | $1,6 \cdot 10^{-11}$ |
| | E25 | E22 | | | $1,0 \cdot 10^{-8}$ |
| | E24 | E21 | | | $1,6 \cdot 10^{-9}$ |
| | E25 | E21 | | | 10^{-8} |
| | E24 | E22 | | | $1,6 \cdot 10^{-9}$ |
| | E20 | E25 | | | $1,6 \cdot 10^{-9}$ |
| | E20 | E24 | | | $2,56 \cdot 10^{-10}$ |
| | E16 | E17 | | | Incendio externo y fallo mecánico del depósito. |
| | E18 | E19 | | Incendio externo y fallo mecánico del soporte. | $5 \cdot 10^{-10}$ |
| | E40 | E41 | | Incendio externo y fallo del alivio de presión. | $4 \cdot 10^{-15}$ |
| | E2 | E3 | | Inadecuada construcción del depósito y vibración fuerte. | 10^{-13} |
| Número de MCS = 13 | | | | | |
| 3 | E7 | E8 | E9 | Depósito vacío, error operativo con introducción de NH_3 y carga externa. | $1,6 \cdot 10^{-8}$ |
| | E7 | E10 | E11 | Disparo intempestivo de válvulas de seguridad con bajada de temperatura en el depósito y carga externa. | $6,12 \cdot 10^{-10}$ |
| Número de MCS = 2 | | | | | |

| Orden | Minimal cutset (MCS) | Composición | Probabilidad |
|-------|---|---|--|
| 4 | E37 E38 E39 <u>E44</u>
E4 E5 E6 <u>E45</u>

Número de MCS = 2 | Introducción de material incompatible al tanque no detección, ni intervención del operador y fallo del análisis previo de material corrosivo de la cisterna (E44, E45). | 4,3.10 ⁻¹¹
1,4.10 ⁻¹¹ |
| 5 | E23 E30 E26 <u>E27</u> <u>E42</u>
E25 E30 E26 <u>E27</u> <u>E42</u>
E24 E30 E26 <u>E27</u> <u>E42</u>

E23 E30 E28 <u>E29</u> <u>E42</u>
E25 E30 E28 <u>E29</u> <u>E42</u>
E24 E30 E28 <u>E29</u> <u>E42</u>

Número de MCS = 6 | Combinaciones de tres sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> junto con un fallo en la operación de purga en fase vapor del depósito (E42) y el error en el análisis de O ₂ en la cisterna (E27).

Idem pero con un error en no inertizar el depósito antes del primer llenado (E29). | Inferior a 5.10 ⁻¹⁷
Idem
Idem

Idem
Idem
Idem |
| 6 | E35 E36 E31 E32 E33 <u>E43</u>
E35 E36 E31 E32 E33 <u>E43</u>

Número de MCS = 2 | Rotura por sobrepresión debida a un sobrellenado con fallo del corte por exceso de nivel (E43). | Idem
Idem |

b) *Resultados cuantitativos del árbol de fallos considerando las mejoras*

La suma de las probabilidades de los *minimal cut set* de la tabla anterior proporciona el nuevo valor del suceso TOP: 5,5.10⁻⁷ oc/año, lo que supone una reducción del 56,6% con respecto del valor anterior.

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Otra forma de presentar los resultados cuantitativos, tal como se indicaba en el punto C) de la página 81, consiste en determinar las probabilidades de los sucesos intermedios G2, G3 y G4 unidos mediante una puerta lógica «0». En la siguiente tabla se desglosan las probabilidades y el tanto por ciento que representa sobre el TOP.

| Suceso intermedio | Probabilidad | Porcentaje respecto del TOP |
|---|---------------------------------------|-----------------------------|
| Gran sobrecarga del cuerpo del depósito (puerta lógica G2) (b) por: | <u>$3,1 \cdot 10^{-7}$</u> | <u>54,3</u> |
| - Fallo soporte (G12) | $(3,1 \cdot 10^{-7})$ | (54,3) |
| - Exceso calor externo (G13) | $(5 \cdot 10^{-10})$ | (-) |
| - Exceso de presión (G20) (c): | | |
| • Por sobrellenado (G21) | (-) (f) | (-) |
| • Por fuego externo (G22) | $(4 \cdot 10^{-15})$ | (-) |
| • Por reacción química rápida (G23) | (-) | (-) |
| Defecto mecánico (G3) (d) | <u>$2 \cdot 10^{-7}$</u> | <u>36,2</u> |
| - Diseño inadecuado (E1) | $(1 \cdot 10^{-7})$ | (18,1) |
| - Corrosión (G5) (e): | | |
| • Por material corrosivo introducido desde camiones cisterna (G9) | (-) | (-) |
| • <i>Stress corrosion cracking</i> (G10) | $(1,24 \cdot 10^{-7})$ | (18,1) |
| • Fatiga (G6) | $(1 \cdot 10^{-13})$ | (-) |
| Rotura frágil (G4) | <u>$1,6 \cdot 10^{-8}$</u> | <u>2,9</u> |
| TOP (a) (TOTAL) | <u>$5,5 \cdot 10^{-7}$</u> | <u>100</u> |

Notas:

- (a) El suceso TOP se expresa como suma lógica de los sucesos G2, G3 y G4. $TOP = G2 + G3 + G4$.
- (b) El suceso G2 se expresa como suma lógica de los sucesos G12, G13 y G20. $G2 = G12 + G13 + G20$.
- (c) El suceso G20 se expresa como suma lógica de los sucesos G21, G22 y G23. $G20 = G21 + G22 + G23$.
- (d) El suceso G3 se expresa como suma lógica de los sucesos G5 y el suceso básico E1. $G3 = E1 + G5$.
- (e) El suceso G5 se expresa como suma lógica de los sucesos G9, G10 y G6. $G5 = G9 + G10 + G6$, de acuerdo con la notación de la lógica Booleana de la tabla 2.1, en que el signo más representa la unión de sucesos o «0» lógico y truncando la expresión (1) de la página 62, de acuerdo con la aproximación del «suceso raro».
- (f) Valor despreciable.

La influencia de cada una de las mejoras propuestas, sobre el valor del TOP es:

| Mejora propuesta | Porcentaje de mejora respecto al valor del TOP |
|---|--|
| - Analizar la cisterna. | 34,6 |
| - Realizar purga en fase vapor del depósito. | 5,1 |
| - Inertizar el depósito antes del primer llenado. | 0,07 |
| - Reducir a la mitad (3 años) el período entre revisiones. | 21,5 |
| - Colocar un medidor de nivel en el depósito que detenga la operación de carga. | ~ 0 |

Como se puede apreciar las mejoras que contribuyen más a la reducción de la probabilidad de rotura del depósito son el analizar la cisterna antes de su vaciado y la reducción del período entre revisiones.

2.4.2 Método del árbol de sucesos

2.4.2.1 Descripción

El árbol de sucesos o análisis de secuencias de sucesos es un método inductivo que describe la evolución de un suceso iniciador sobre la base de la respuesta de distintos sistemas tecnológicos o condiciones externas.

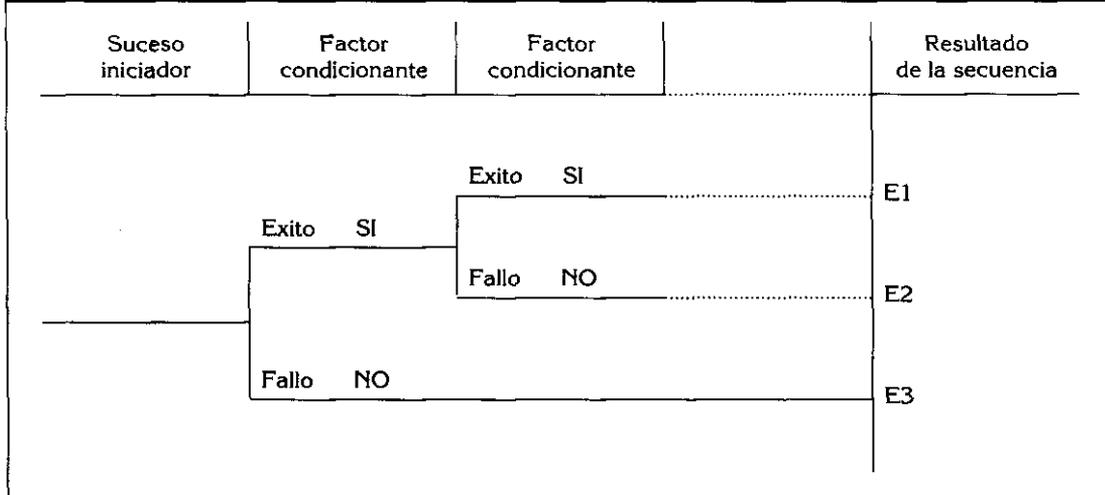
Partiendo del suceso iniciador y considerando los factores condicionantes involucrados, el árbol describe las secuencias accidentales que conducen a distintos eventos.

A) CONSTRUCCIÓN DEL ÁRBOL

La construcción del árbol comienza por la identificación de los N factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantea sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo (ver figura 2.14).

2. Métodos para la determinación de frecuencias

FIGURA 2.14 ESQUEMA GENERAL DE UN ARBOL DE SUCESOS



Se obtienen así 2^N combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos pueda eliminar la posibilidad de otros, reduciéndose así el número total de secuencias.

La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente si bien este criterio es difícil de aplicar en algunos casos.

B) EVALUACIÓN DEL ÁRBOL

El árbol de sucesos así definido tiene las siguientes características:

- El suceso iniciador viene determinado por una frecuencia (f), expresada normalmente en ocasiones por año.
- Los N factores condicionantes son sucesos definidos por su probabilidad de ocurrencia: $p_i, i=1,N$.
- Los sucesos complementarios de estos tienen asociados, según apartado 2.1.1, una probabilidad de $1-p_i, i=1,N$.

Como se considera que los factores condicionantes son sucesos independientes, cada una de las secuencias, s , tiene asociada una frecuencia, f_s , de:

$$f_s = f \cdot \prod_{i,j} p_i \cdot (1 - p_j) \quad i=1, N_{ij}=1, n_j$$

siendo:

N_j : el número de sucesos de éxito de la secuencia s .

n_j : el número de sucesos de fallo de la secuencia s .

De esta forma también se cumple que la suma de las frecuencias de todas las secuencias accidentales es igual a la frecuencia del iniciador:

$$\sum f_s = f$$

La obtención de los valores p_i se basa generalmente en datos bibliográficos, estimaciones de expertos o en la aplicación de la técnica del árbol de fallos descrita en el apartado anterior.

2.4.2.2 *Ambito de aplicación*

La técnica se utiliza con especial énfasis para describir la evolución de fugas de productos según sus características y el entorno en el cual tienen lugar.

2.4.2.3 *Recursos necesarios*

La técnica es poco laboriosa y no requiere preparación específica en su uso, si bien los analistas deberán conocer los fenómenos en juego.

2.4.2.4 *Soportes informáticos*

El uso de un código de ordenador se recomienda en el caso en que el número de sistemas y componentes sea muy elevado y se quiera llevar a cabo un estudio de los conjuntos mínimos de las secuencias accidentales (básicamente si existe dependencias funcionales en la estructura).



2. Métodos para la determinación de frecuencias

2.4.2.5 Ventajas/inconvenientes

VENTAJAS

1. Permite un estudio sistemático y exhaustivo de la evolución de un suceso.
2. Su aplicación es muy sencilla.

INCONVENIENTES

1. El valor obtenido está sujeto a incertidumbre por la dificultad que existe normalmente en evaluar las probabilidades de los factores asociados.
2. Si el árbol es grande su tratamiento puede hacerse laborioso.

2.4.2.6 Ejemplos

Se reseña a continuación un árbol de sucesos correspondiente al siguiente iniciador: «Fuga de hidrocarburo líquido en la proximidad de una esfera de GLP (Gas Licuado del Petróleo)».

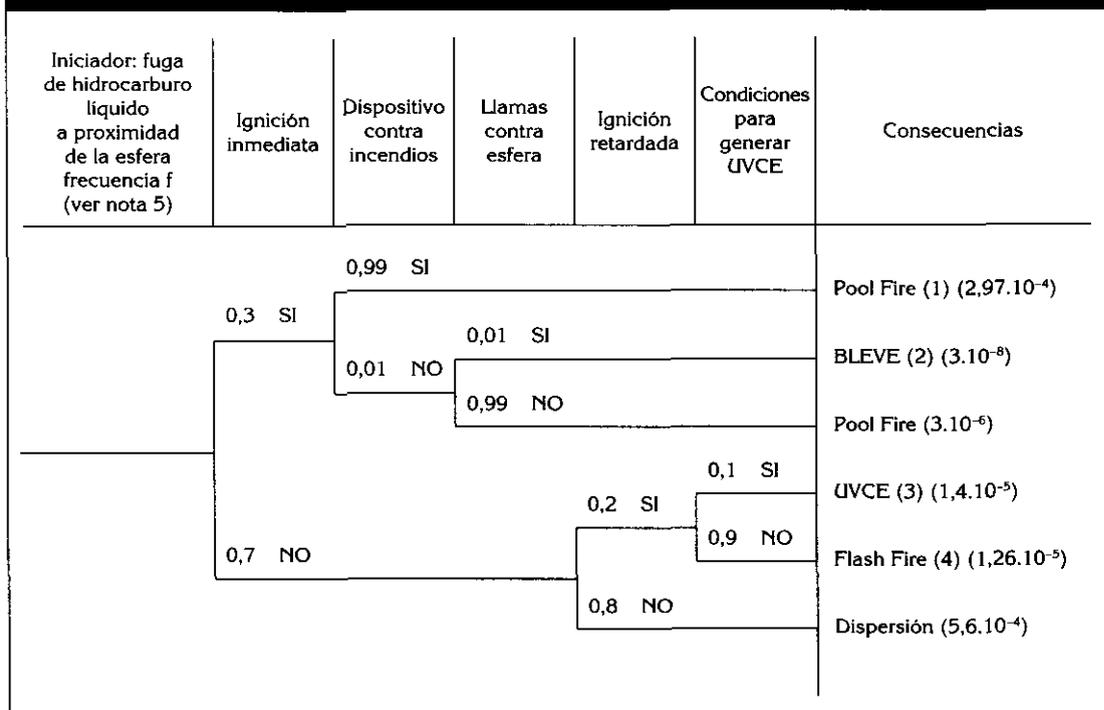
A) CONSTRUCCIÓN DEL ÁRBOL DE SUCESOS

En la figura 2.15 se representa el árbol de sucesos. Básicamente contiene:

- *Suceso iniciador.* Se considera la fuga de hidrocarburo líquido en la proximidad de unas esferas. Este suceso tiene una frecuencia de 10^3 oc/año.
- *Factores condicionantes de la evolución del suceso* que se indican en la cabecera del esquema:
 - *Ignición inmediata,* representa la probabilidad de que se produzca la ignición en el momento de la fuga. Se considera que la probabilidad de que esto ocurra es de 0,3. El suceso complementario tiene una probabilidad de $1-0,3 = 0,7$.
 - *Correcto funcionamiento del dispositivo contra incendios.* Se refiere a la puesta en marcha de los *sprinklers* que son capaces de refrigerar la esfera sometida a radicación térmica. Se considera que la probabilidad de correcto funcionamiento es de 0,99.

- *Llamas contra esfera*, representa la probabilidad de que las llamas incidan directamente sobre la esfera, dependiendo del punto de fuga. Se considera una probabilidad de 0,01.
- *Ignición retardada*, representa la probabilidad de que la ignición se produzca a cierta distancia del punto de fuga, dependiendo de la presencia de fuentes de ignición. Se considera una probabilidad de 0,2.
- Por último, se indica en la columna *Condiciones para generar una UVCE*, la probabilidad de que el gas entre límites de inflamabilidad sea suficiente para dar lugar a una explosión no confinada. Se estima esta probabilidad en 0,1.

FIGURA 2.15 METODO DEL ARBOL DE SUCESOS. EJEMPLO



- (1) Incendio de charco.
- (2) *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*.
- (3) *Unconfined Vapour Cloud Explosion*.
- (4) Llamarada.
- (5) $f = 10^{-3}$ oc/año.



2. Métodos para la determinación de frecuencias

Consecuencias

Inicialmente en la columna consecuencias se indica el tipo de fenómeno asociado a la secuencia planteada. En el caso de la primera secuencia se contemplan los fenómenos siguientes:

- Fuga de GLP.
- Ignición inmediata.
- Correcta refrigeración de la esfera.

Tal secuencia conduce a un incendio del charco de GLP derramado.

La segunda secuencia comporta:

- Fuga de GLP.
- Ignición inmediata de los vapores.
- Mal funcionamiento de los *sprinklers*.
- Incidencia directa de las llamas sobre la esfera.

Tal secuencia puede producir la BLEVE de la esfera.

B) EVALUACIÓN DEL ÁRBOL DE SUCESOS

Para cada una de las secuencias se procede a la evaluación de las secuencias obtenido por producto de la frecuencia del iniciador y la probabilidad de los sucesos de la secuencia. Así las dos primeras secuencias tienen unas frecuencias respectivas de:

$$10^{-3} \text{ oc/año} \times 0,3 \times 0,99 = 2,9 \cdot 10^{-4}$$
$$10^{-3} \text{ oc/año} \times 0,3 \times 0,01 \times 0,01 = 3 \cdot 10^{-8}$$

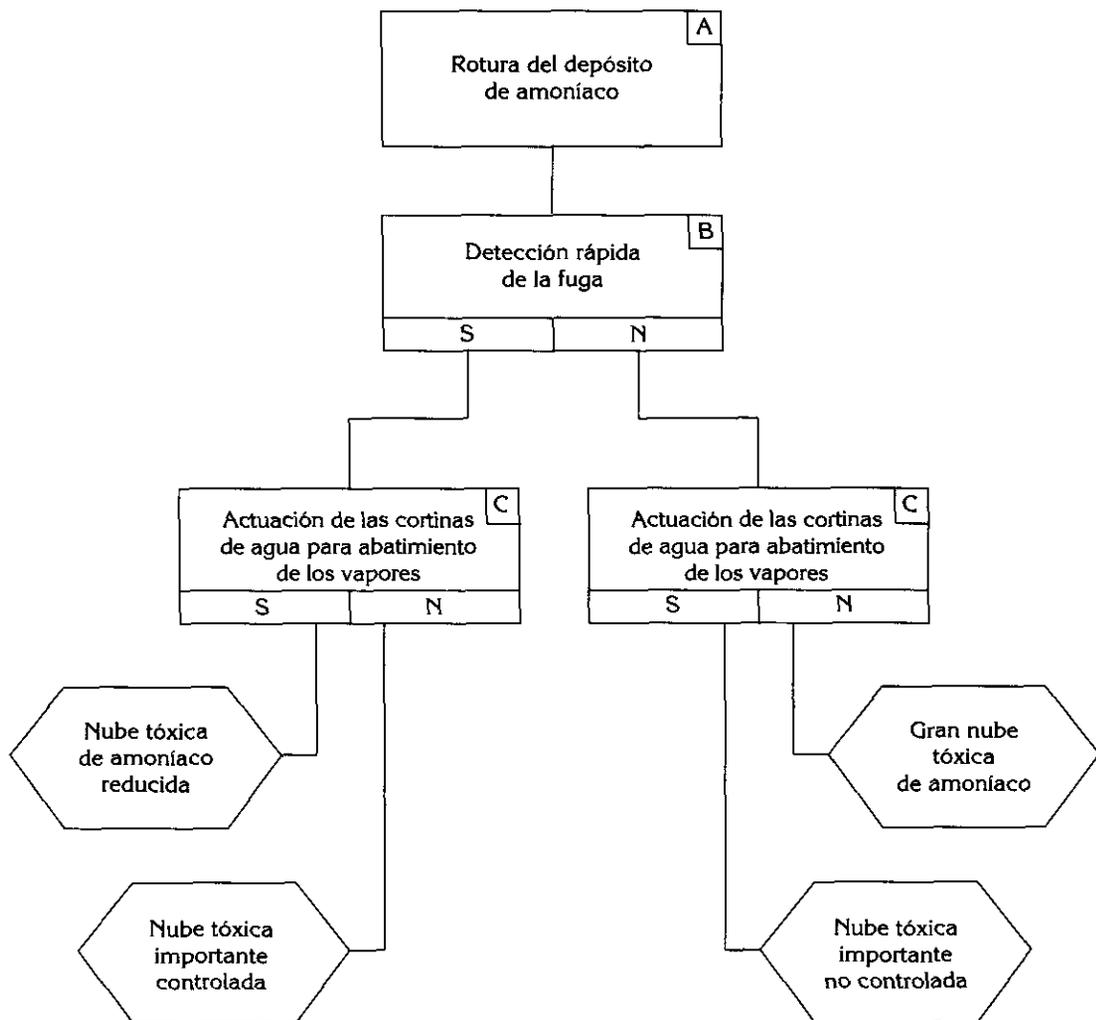
De forma que globalmente se tiene:

| Suceso | Frecuencia (oc/año) |
|------------|-------------------------------------|
| Pool fire | $3 \cdot 10^{-4}$ (secuencia 1 y 2) |
| BLEVE | $3 \cdot 10^{-8}$ |
| UVCE | $1,4 \cdot 10^{-5}$ |
| Flash fire | $1,26 \cdot 10^{-5}$ |
| Dispersión | $5,6 \cdot 10^{-4}$ |

2.4.3 Método del análisis de causas-consecuencias

Esta técnica integra los métodos del árbol de fallos y sucesos en una sola estructura, siendo válidos los principios expuestos para estos métodos.

En el caso del ejemplo de rotura del tanque de amoníaco comentado en el apartado 2.4.1.6 el diagrama correspondiente sería el reseñado a continuación.





2. Métodos para la determinación de frecuencias

El suceso A es el calculado a través del árbol de fallos ya descrito. La evolución del accidente considera básicamente dos factores.

- Detección (suceso B).
- Actuación de las cortinas de agua (suceso C).

Según la secuencia la fuga de amoníaco reviste mayor o menor gravedad, tal como se indica en los sucesos finales descritos en los rombos.

2.4.4 Métodos para la determinación del fallo de modo común

2.4.4.1 Descripción

Cuando se produce el fallo simultáneo de dos componentes, este puede ser debido a dos causas:

- Fallo simultáneo de los dos pero sin que haya ninguna relación entre ambos fallos (sucesos independientes). Este es el tipo de fallos que contemplan las dos técnicas descritas en los anteriores apartados.
- Fallo simultáneo de los dos al existir una relación entre ambos (sucesos dependientes).

Los fallos dependientes o también denominados de causa o de modo común merecen un estudio específico porque no son contemplados directamente en otras técnicas y porque representa una parte importante de los fallos que se producen normalmente.

A) CLASIFICACIÓN DE LOS FALLOS DE CAUSA COMÚN

Se consideran normalmente tres tipos de dependencia entre componentes: fallos por dependencias funcionales, fallos secundarios o fallos por dependencia de fabricación u operación.

Fallos por dependencias funcionales: Estas dependencias son debidas a componentes, subsistemas o sistemas compartidos. Es el caso por ejemplo de un suministro eléctrico o de aire de instrumento cuyos fallos pueden provocar el fallo de varios componentes. Si el árbol de fallos ha contemplado los servicios en los fallos de componentes básicos, este fallo de modo común será identificado y contabilizado. Si no, quedará enmascarado esta causa subestimándose la probabilidad del TOP.

Fallos secundarios: En este caso se agrupan los fallos de componentes cuyas consecuencias puede ser el fallo de otro. Sería, por ejemplo, el caso de la rotura de una tubería que causará la rotura de otra muy cercana. Como es el caso anterior, este tipo de dependencia puede ser incluido en el árbol de fallos siempre y cuando el analista lo haya identificado pero de forma más artificiosa.

Fallos por dependencia de fabricación u operación: Componentes manufacturados por un mismo fabricante pueden presentar similitud de comportamiento en cuanto a fallo. En este caso existen un serie de técnicas para evaluar o al menos acotar estas dependencias.

B) TÉCNICAS DE EVALUACIÓN

Acotación de la dependencia: La técnica consiste en calcular las cotas máximas y mínimas de dependencias entre dos componentes sobre la base de las probabilidades respectivas de los sucesos. La probabilidad de la ocurrencia simultánea de dos sucesos A y B es la de su intersección (A ∩ B). Esta probabilidad, en el caso de total independencia de los sucesos es igual al producto de las probabilidades, que define por tanto una cota inferior. La cota superior de A ∩ B puede ser definida como el mínimo entre ambas probabilidades, de esta forma se puede considerar que:

$$p(A) \cdot p(B) \leq p(A \cap B) \leq \min \{p(A), p(B)\}$$

Este intervalo es correcto siempre y cuando se pueda suponer que las probabilidades respectivas de cada suceso sean totales (es decir que incluyan las dependencias).

Acoplamiento: Es una variante del caso anterior pero considerando diferentes grados de dependencias o niveles de acoplamientos (ninguno, medio, fuerte, total).

Ambas técnicas fueron utilizadas en el estudio WASH-1400.

Método del factor β : Este método considera que la tasa de fallos total (λ) de un componente puede descomponerse en dos contribuciones: (λ_1) la tasa de fallos independiente y (λ_2) la tasa de fallos de causa común. Se define al factor β como el cociente entre la tasa de fallos de un componente correspondiente a fallos de causa común y la tasa de fallos global. De esta forma: $\beta = \lambda_2/\lambda$.

Se puede deducir entonces, la probabilidad de fallo conjunto de dos elementos en función del valor de β .



2. Métodos para la determinación de frecuencias

La fiabilidad de un sistema de dos componentes en paralelo que pueden fallar tanto por fallos dependientes como independientes se expresa como la probabilidad de que no fallen por mecanismos independientes (p_1) ni por mecanismos dependientes (p_2), es decir:

$$(p_1) \cdot (p_2)$$

La probabilidad de no fallo independientes es la de la unión de los sucesos no fallo A o no fallo B que se puede expresar como:

$$p_1 = p(A) + p(B) - p(A \cap B) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-2\lambda_1 t} = 2 e^{-\lambda_1 t} + e^{-2\lambda_1 t}$$

suponiendo de que ambos tienen una tasa de fallos constante e igual divididos en dos contribuciones:

λ_1 tasa de fallos independiente.

λ_2 tasa de fallos dependiente.

La probabilidad de no fallo por mecanismos dependientes se expresa como:

$$p_2 = e^{-\lambda_2 t}$$

Luego la probabilidad de no fallo del sistema es:

$$p_1 \cdot p_2 = (2e^{-\lambda_1 t} + e^{-2\lambda_1 t}) - e^{-\lambda_2 t}$$

Por otra parte siendo $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ y $\beta = \lambda_2/\lambda$ se pueden expresar λ_1 y λ_2 en función de :

$$\lambda_1 = (1 - \beta)\lambda$$

$$\lambda_2 = \beta\lambda$$

Substituyendo se obtiene:

$$p_1 \cdot p_2 = [2e^{-\lambda t} - e^{-(2 - \beta)\lambda t}]$$

De donde se deduce que su in fiabilidad es:

$$1 - p_1 p_2 = 1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-(2 - \beta)\lambda t} \quad (1)$$

En el caso en que $\beta = 1$ se obtiene la expresión ya conocida del fallo de un componente $(1 - e^{-\lambda t})$, ya que entonces la probabilidad de fallo del otro es 1.

La dificultad del método consiste en determinar los valores de la β , aunque se puede estimar.

Existen códigos de cálculo que permite calcular el fallo de modo común; entre otros se pueden citar COMCAN, BACKFIRE y SETS.

2.4.4.2 Ejemplos

En un árbol de fallos se obtiene un conjunto mínimo de orden 2 correspondiente al fallo simultáneo de las bombas A y B dispuestas en paralelo.

La tasa de fallos supuesta constante e igual para las dos bombas es $\lambda: 5,5 \cdot 10^{-3}$ fallos/h. El factor β se supone igual a 0,1.

1. La probabilidad de fallo conjunto de las dos bombas durante un período T de 100 horas, si se supone que sus fallos son independientes, es de:

$$p(A \cap B) = p(A) \cdot p(B)$$

La probabilidad de fallo de una bomba sobre un periodo T, si se asume una distribución exponencial se expresa como $(1 - e^{-\lambda T})$, ver tabla 2.2. Por tanto la probabilidad de fallo conjunto es:

$$\begin{aligned} &= (1 - e^{-\lambda T})^2 \\ &= 1 - 2 e^{-\lambda T} + e^{-2\lambda T} \end{aligned}$$

que coincide con la expresión (1) de la pág. 101, para el caso en que β es igual a 0 (no existe fallo dependiente).

Aplicación numérica

$$p(A \cap B) = (1 - e^{-5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100})^2 = (0,423)^2 = 0,179$$

2. Si se considera el fallo dependiente, y se aplica el método del factor β , reuniendo a la expresión (1), se tiene:

$$p(A \cap B) = 1 - 2 e^{-\lambda T} + e^{[-(2 - \beta)\lambda T]}$$

2. Métodos para la determinación de frecuencias

Aplicación numérica

$$p(A \cap B) = 1 - 2e^{-5,510 - 3,100} + e^{[-(2 - 0,1)5,5,10 - 3,100]} 0,198$$

3. Si se recurre a la técnica de acotación se puede considerar que:

$$p(A) \cdot p(B) \leq p(A \cap B) \leq \min \{p(A), p(B)\}$$

obteniéndose con los datos numéricos citados, un intervalo de variación de:

$$0,179 \leq p(A \cap B) \leq 0,423$$

ya que $p(A) \cdot p(B) = 0,179$

$$\min \{p(A), p(B)\} = p(A) = p(B)$$

ya que ambas probabilidades son iguales por hipótesis, es decir:

$$(1 - e^{-5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100}) 0,423$$

Si se considera que la dependencia es de tipo «media», según WASH 1400 se puede considerar como referencia para $p(A \cap B)$, la mediana de la ley de distribución definida por el intervalo anterior:

$$p(A \cap B) = \sqrt{p(A) \cdot p(B) \cdot \min \{p(A), p(B)\}}$$

Aplicación numérica

$$p(A \cap B) = \sqrt{0,179 \times 0,423} = 0,275$$

En resumidas cuentas, para este ejemplo se obtendrían los siguientes resultados:

| Método | Probabilidad del fallo común de las dos bombas |
|----------------|--|
| Factor β | 0,198 |
| Acotación | Intervalo:
[0,179;0,423] |
| | Valor medio (dependencia media):
0,275 |

Conviene destacar que las dos primeras técnicas se utilizan muy frecuentemente de forma complementaria: el árbol de sucesos describe la evolución de un suceso cuya frecuencia ha sido calculada mediante una árbol de fallos.

Conviene destacar que las dos primeras técnicas se utilizan muy frecuentemente de forma complementaria: el árbol de sucesos describe la evolución de un suceso cuya frecuencia ha sido calculada mediante una árbol de fallos.

2.4.6 Resumen

En este sentido se recomienda su uso, incluyendo también el árbol de sucesos. La propuesta de mejoras en el sistema se basa normalmente sobre el análisis de importancia tal como se puso de manifiesto en el ejemplo del apartado 2.4.1.6, F).

- Permiten también un análisis crítico sobre los resultados obtenidos que pueden evidenciar errores en el árbol o en la selección de las tasas de fallos.
- A la inversa, se identifican aquellos para los cuales no es imprescindible un aumento de fiabilidad.
- Se determinan aquellos componentes cuya mejora puede suponer un aumento sustancial para todo el sistema.
- Se identifican los elementos esenciales de un sistema.

Conviene destacar que este tipo de estudio resulta a menudo fructífero por las siguientes razones:

Se han descrito en el apartado 2.4.1. del árbol de fallos, los principales factores de importancia que permiten poner de manifiesto en una estructura compleja, cuando tiene numerosos componentes, cuales son los elementos que por su elevada probabilidad, su repetición en la estructura o su situación son decisivos para la ocurrencia del suceso estudiado.

2.4.5 Análisis de importancia

2. Métodos para la determinación de frecuencias

TABLA 2.9 RESUMEN DE TÉCNICAS PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS

| Técnica | Características | Ambito de aplicación | Recursos | Soportes informáticos | Ventajas/inconvenientes |
|--|--|---|---|---|--|
| Arbol de Fallos | <ul style="list-style-type: none"> - Técnica deductiva de descomposición. - Cualitativa: a través de los conjuntos mínimos de fallos. - Cuantitativa. - Factores de importancia. - Análisis de incertidumbre. | <ul style="list-style-type: none"> - Determinación de sucesos complementos. - Estudio del impacto de mejoras en un sistema. | <ul style="list-style-type: none"> - Buen conocimiento del método. - Buen conocimiento del sistema estudiado. - Documentación: toda la disponible. - Datos necesarios: probabilidades de fallo los componentes. | <ul style="list-style-type: none"> - El uso de la técnica requiere un código de cálculo apropiado. - Existen numerosos. - Ver tabla 2.7. | <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estudio profundo del sistema. - Base toma decisión. <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Laborioso. - Incertidumbre de los resultados. - Dependiente de los criterios adoptados. |
| Arbol de Sucesos | <ul style="list-style-type: none"> - Técnica inductiva. - Cualitativa. - Cuantitativa. | <ul style="list-style-type: none"> - Determinación de la evolución de un iniciador. | <ul style="list-style-type: none"> - Buen conocimiento de los fenómenos físicos implicados. - Datos necesarios: frecuencia de los iniciadores y probabilidades de los sucesos condicionantes. | <ul style="list-style-type: none"> - Normalmente no requiere el uso de un código de ordenador. | <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Uso muy sencillo. - Sistematiza la evolución de un suceso. <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incertidumbre resultados numéricos. |
| Análisis de causas consecuencia | <ul style="list-style-type: none"> - Combina las características de los anteriores métodos. | | | | |
| Para la determinación del fallo de modo común. | <ul style="list-style-type: none"> - Existen varias técnicas de características distintas (factor Bg, acotación de las dependencias, acoplamiento,...) | <ul style="list-style-type: none"> - Determinación de los fallos dependientes. | <ul style="list-style-type: none"> - Buen conocimiento del método. - Datos necesarios: factor B_i,... | <ul style="list-style-type: none"> - Existen códigos de soporte. | <p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Importancia real de los fallos de pendientes. <p>Inconvenientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dificultad para obtener datos. - Incertidumbre asociado a los resultados numéricos. |

Alternativamente el método de las causas-consecuencias integra directamente las dos técnicas en un único modelo.

Por último, la determinación de los fallos dependientes, que suele representar una parte importante de los fallos, no se puede determinar de forma directa mediante las anteriores técnicas por lo que requiere un análisis específico e independiente para el cual existen diversas técnicas que requieren datos concretos, a menudo difíciles de conseguir y que suelen ofrecer con frecuencia resultados dispares.

3. Métodos para el cálculo de los alcances

Se indican únicamente en esta Guía, las líneas generales de esta fase de un análisis de riesgos.

Tanto en el Estudio de Seguridad, donde es necesario definir las zonas de planificación (intervención y alerta), como en el Análisis Cuantitativo de Riesgos, donde se determinan las zonas correspondientes a un umbral de daños para evaluar el número de víctimas asociadas a un accidente, se calcula el efecto de determinados eventos.

Esta fase de los análisis de riesgos es relativamente compleja ya que tiene que simular el comportamiento real de una sustancia química en el cual intervienen multitud de factores:

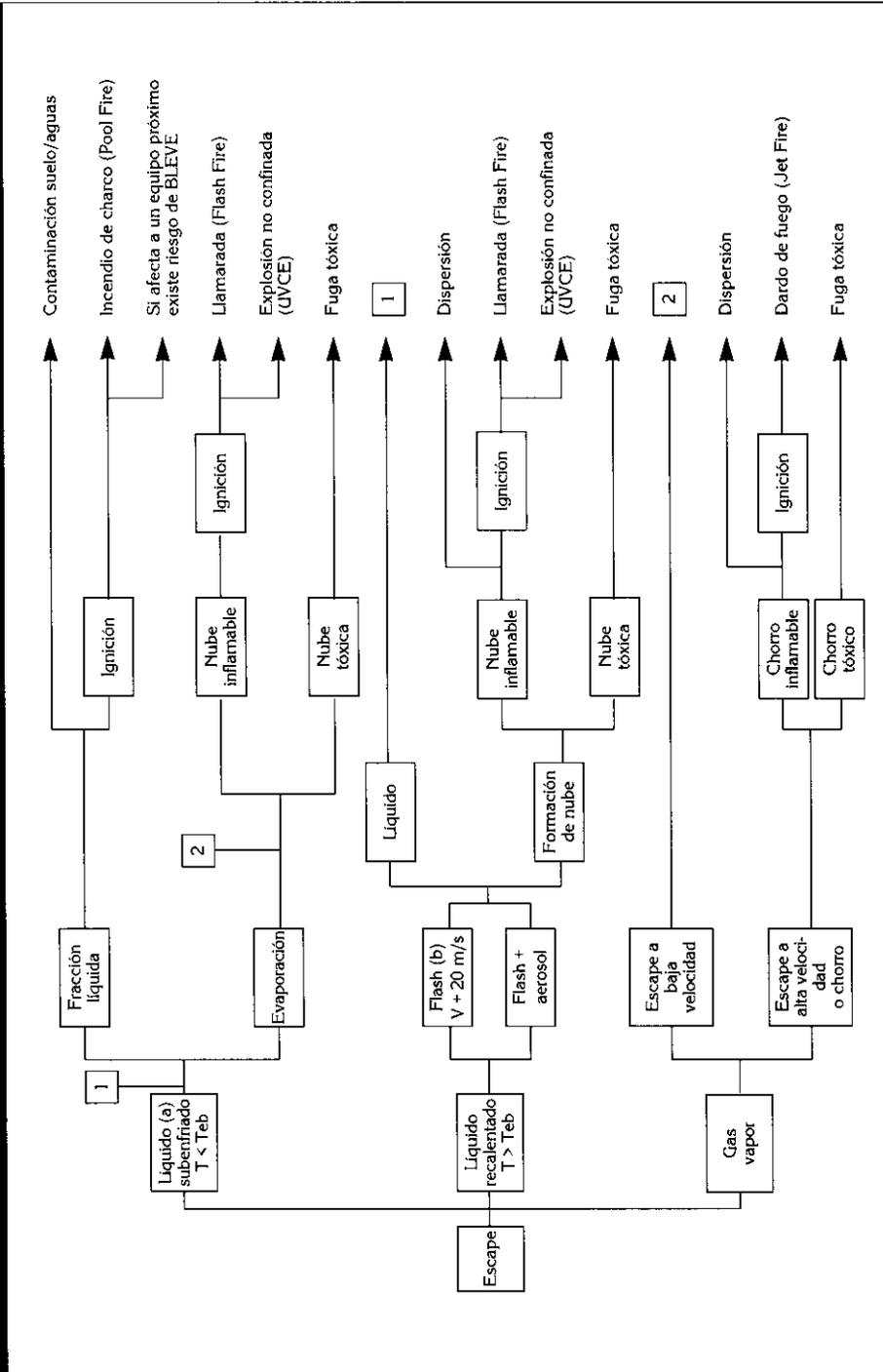
- Condiciones en que se produce la liberación de la sustancia.
- Características físico-químicas de la misma.
- Características del medio en el cual se produce la dispersión.
- Interrelación entre la sustancia y el medio.

En la figura 3.1 se agrupa en grandes líneas la evolución de un escape según sus características.

Las especificaciones mínimas que debería cumplir esta fase, son:

- Deberá dejarse clara constancia de las condiciones de cálculo consideradas (caudales de fuga, variables meteorológicas, valores umbrales adoptados, en especial en cuanto productos para los cuales existen discrepancias entre distintas fuentes); de los modelos matemáticos aplicados (referencias concretas, listados de ordenador obtenidos si existen, justificación de la adecuación del modelo al caso de aplicación, etc.).
- Deberá darse una estimación de la incertidumbre o rango aproximado del resultado obtenido. En este caso es el asociado al cálculo de las áreas afectadas, las limitaciones de los modelos, etc.
- Deberán contabilizarse todos los efectos posibles del accidente con especial incidencia sobre los más graves.

FIGURA 3.1 EVOLUCION DE UN ESCAPE DE FLUIDO



(a) Si el líquido es liberado a la atmósfera a una temperatura (T) inferior a su punto de ebullición (Teb), se produce un charco líquido que se evapora debido a la difusión de vapor a causa de la diferencia que existe entre la presión del vapor en la superficie y en el ambiente.
 En cambio, si el líquido es liberado a la atmósfera a una temperatura (T) superior a su punto de ebullición (Teb), sobre una vaporización instantánea (también denominada flash) debida al intercambio térmico con el sustrato.
 (b) Si se produce vaporización instantánea del líquido, según la velocidad, puede ocurrir el arrastre de líquido en la fase de vapor (también denominado aerosol).

3. Métodos para el cálculo de los alcances

- Para efectos que evolucionan en función del tiempo (radiación térmica, concentraciones tóxicas) deberían tenerse en cuenta también los tiempos de exposición al efecto considerado (dosis).

Para ello será necesario disponer de los siguientes datos:

- Características de toxicidad de los productos (IPVS) (1) y métodos de estimación en los casos en que no hay datos disponibles.
- Ecuaciones sencillas para el cálculo de los efectos de los accidentes.
- Lista de los códigos de ordenador disponibles en el mercado con sus principales características y campos de aplicación para cada uno de los cálculos referenciados en la tabla 3.1, así como las pruebas experimentales a las que han sido sometidos.
- Criterios básicos a seguir para cada uno de los efectos (radiación, sobrepresión, concentraciones tóxicas).

(1) Concentración Inmediatamente Peligrosa para la Vida y la Salud.

TABLA 3.1 MODELOS DE CÁLCULO DEL ALCANCE DE DETERMINADOS EFECTOS

1. Modelos de cálculo de fugas y derrames:
 - 1.1 Gases y vapores.
 - 1.2 Líquidos.
 - 1.3 Bifásicos.
2. Modelos de cálculo de áreas de charco:
 - 2.1 Líquidos.
 - 2.2 Gases licuados.
 - 2.3 Charcos incendiados.
3. Modelos de cálculo de evaporación:
 - 3.1 Líquidos evaporantes.
 - 3.2 Gases licuados.
4. Modelos de cálculo de dispersión de gases y vapores:
 - 4.1 Dispersión de chorro turbulento de gases y vapores.
 - 4.2 Dispersión de gases neutros y ligeros a baja velocidad.
 - 4.3 Dispersión de gases pesados a baja velocidad.
5. Modelos de cálculo de explosiones:
 - 5.1 Explosiones confinadas.
 - 5.1.1 Explosiones físicas.
 - 5.1.2 Explosiones químicas.
 - de mezclas inflamables de gases.
 - de mezclas inflamables de polvo.
 - de reacciones fuera de control.
 - 5.2 Explosiones semiconfinadas.
 - 5.3 Explosiones no confinadas.
 - 5.4 Alcance de fragmentos.
6. Modelo de cálculo de radiación térmica.
7. Casos singulares:
 - 7.1 BLEVE.
 - 7.2 Boil over.
 - 7.3 Roll over.

4. Métodos para el cálculo de daños

En esta Guía, se describen las líneas generales de esta fase de un análisis de riesgos.

El cálculo de daños se aplica posteriormente al cálculo del alcance de los efectos y tiene por objeto analizar la agresión del accidente sobre el medio que rodea a la instalación.

Las especificaciones mínimas que debería cumplir tal cálculo y son:

- Se estudiarán los efectos sobre las personas, analizando las distancias correspondientes a las zonas de intervención, alerta y alcances de 1%, 50% y 99% de letalidad y otros daños físicos.
- Se calcularán los efectos sobre las instalaciones analizando las distancias correspondientes al umbral de daños reparables y destrucción total. En este apartado, se estudiará la posibilidad de que el accidente estudiado, genere un efecto sinérgico o efecto dominó sobre los equipos vecinos.
- Se determinará el efecto sobre el medio ambiente, analizando el impacto que, sobre la atmósfera, sobre las aguas, sobre el terreno y sobre los biotopos locales tiene un accidente mayor de carácter estocástico.
- Deberá darse una estimación de la incertidumbre o rango aproximado del resultado obtenido. En este caso es el asociado al cálculo de las áreas letales, a las ecuaciones de Probit, a la evaluación de las poblaciones afectadas, ...
- El cálculo de víctimas deberá ponderar con sus respectivas probabilidades las distintas condiciones meteorológicas posibles en la zona.

Para ello será necesario contar con los siguientes datos:

- Ecuaciones de PROBIT (1) disponibles para distintos productos y efectos.
- Resultados del estudio de comparación entre las distintas ecuaciones.
- Umbrales/criterios a considerar para los daños materiales y al medio ambiente.

(1) *PROBability unit*.

5.1 CONCEPTOS GENERALES

Una de las finalidades de un Análisis Cuantitativo de Riesgos consiste en evaluar el riesgo asociado a la instalación en estudio. Existen distintas definiciones del riesgo que responden a distintos conceptos.

En este Capítulo se definen estos conceptos y se indica como calcularlos. Por último, se reflejan algunos criterios de aceptabilidad.

5.1.1 Riesgo global e individual

Como consecuencia del estudio, se obtiene una lista de hipótesis de accidentes definidas a través del par:

- frecuencia (ocurrencia/año)
- daño (víctimas/ocurrencia)

Riesgo global (RG). Se define como la suma de los riesgos asociados a cada una de las hipótesis de accidente.

Riesgo individual. La definición que da el ICE (1) es: «Frecuencia a la cual un individuo puede esperar un determinado nivel de daño como consecuencia de la ocurrencia de un determinado suceso accidental».

En otras palabras, se define como la frecuencia que tiene una persona de recibir un cierto daño.

Ejemplo: Riesgo individual de morir en un accidente de carretera. Se admite que es aproximadamente 10^4 /año.

La persona puede ser un empleado de la instalación que genera el accidente, un miembro de poblaciones vecinas o un usuario de una instalación de recreo situada en un punto determinado del entorno de la misma.

Es necesario tener cuidado en el uso del riesgo individual para representar individuos «medios» o «típicos».

(1) *Institution of Chemical Engineers.*

En realidad hay una amplia gama de posibles valores que reflejan una amplia variación en las costumbres de las personas y su vulnerabilidad frente a un daño. Cualquier criterio de riesgo deberá de tomar en consideración estos aspectos. Por ejemplo, en unas viviendas, los grupos más expuestos son probablemente los núcleos familiares con niños pequeños que pasan gran parte del día en casa. Esta situación puede conducir a hacer la hipótesis de que un ocupante de estas viviendas está presente en un 100% de los casos.

5.1.2 Riesgo social

El ICE (2) lo define como: «La relación entre la frecuencia y el número de personas que sufren un cierto nivel de daño en una población dada, como consecuencia de la ocurrencia de un determinado suceso accidental».

Este concepto se relaciona con la posibilidad de un desastre debido a la proximidad de poblaciones con respecto de un accidente mayor.

En este caso el riesgo se expresa en sus dos términos: tamaño del desastre y probabilidad del mismo. Puede haber una baja probabilidad de dañar a la mayoría de los habitantes de una vivienda y una probabilidad mayor de dañar unos cuantos, para el mismo accidente mayor.

Un ejemplo de actividad que se mide con el riesgo social es el transporte aéreo.

Estos desastres causan protestas y conmociones en todo un país, seguidos de investigaciones detalladas para averiguar sus causas y peticiones para que medidas generales sean tomadas para reducir este tipo de riesgo.

Se incluye un ejemplo en el apartado 5.6.

Es a causa de estas reacciones de la sociedad que se distingue el riesgo «social» de riesgos más «mundanos» que no tienen un potencial de «catástrofe» como el conducir en coche, aunque este último puede provocar más muertes por año.

(2) *Institution of Chemical Engineers.*

5.1.3 Riesgo de muerte y daños

A menudo se asume que el criterio de riesgo para accidentes mayores debería de estar relacionado con la probabilidad de muerte.

Esto es más directo y más fácilmente comparable con otros riesgos de la vida diaria.

Ahora bien, existen dos dificultades relacionadas con el criterio de riesgo letal:

- La sociedad tiene en general igual de interés con respecto de los riesgos de heridas graves u otros daños, que con el riesgo de muerte.
- Existen dificultades técnicas en calcular los riesgos de muerte para un peligro determinado ya que la población expuesta tiene una amplia gama de variación en cuanto a sensibilidad al daño.

Con respecto del segundo punto, si bien existen ecuaciones de Probit que permiten relacionar las proporciones de personas afectadas por un determinado nivel de daños, estas están sujetas a incertidumbre.

Por otra parte tomar un representante «medio» de la población o «el más expuesto» puede ser cuestionable.

En este sentido el HSE (3) define la dosis «peligrosa» como la dosis tóxica de un gas, radiación térmica y sobrepresión de la explosión que provoca los siguientes efectos:

- Efectos importantes en prácticamente todas las personas expuestas.
- Una fracción importante requiere atención médica.
- Algunas personas están seriamente heridas, requiriendo tratamiento prolongado.
- Personas altamente vulnerables pueden morir.

(3) *Health and Safety Executive.*

5.1.4 Otros conceptos

Existen otros conceptos relacionados con el riesgo que se suelen utilizar en los ACR.

FAR (Fatal Accident Rate): Se define como el número de accidentes mortales en un grupo de 1.000 personas en su vida laboral (10^8 horas).

Según Kletz, 1986 el FAR de la industria química es 4, que se puede descomponer en dos contribuciones:

- Riesgos convencionales (caídas, ...) 2
- Riesgos químicos 2

Se considera que en una planta típica existen 5 tipos de riesgos químicos por lo que uno en particular no debería suponer un FAR superior a 0,4.

En la tabla que sigue se reseñan algunos valores de FAR correspondientes a algunos tipos de actividades industriales:

| Actividad | FAR |
|-----------------------------|------|
| Industria de la confección | 0,15 |
| Permanecer en casa | 1,0 |
| Industria del automóvil | 1,3 |
| Industria de la madera | 3,0 |
| Industria química británica | 4,0 |
| Industria mecánica | 7,0 |
| Agricultura | 10,0 |
| Minería | 12,0 |
| Industria pesquera | 35,0 |
| Construcción | 64,0 |

(Datos de Gran Bretaña, 1979)

Riesgo residual: Según ICE (4) es el riesgo que presenta una instalación tras la incorporación de las mejoras evidenciadas por el estudio realizado.

(4) *Institution of Chemical Engineers.*

5.2 CALCULO DEL RIESGO

Riesgo global: Su expresión matemática es:

$$RG = \sum_{i=1}^N f_i V_i$$

f_i : frecuencia de i-esimo suceso de accidente

v_i : víctimas asociadas al i-esimo suceso.

Según se consideren las víctimas en el interior/ exterior de la instalación se obtiene el riesgo global interior/ exterior.

Riesgo individual: Una expresión del riesgo individual es la obtenida a través de las curvas de isoriesgo (ver apartado 5.3).

Una expresión promedio de este riesgo se puede obtener a partir del riesgo global, de la siguiente manera:

$$RI = \frac{RG}{N_e}$$

donde RG es el riesgo global, N_e el número de personas expuestas.

En el caso de una instalación cabe distinguir entre el riesgo individual del personal de la instalación y el asociado a las poblaciones vecinas.

En este sentido N_e representaría el número de personas de la planta o el correspondiente a las poblaciones vecinas.

La determinación del número medio de personas expuestas suele ser difícil de realizar, sobre todo para el riesgo individual del personal de la planta. El estudio Rijnmond sugiere adoptar:

$$\frac{(5ND + 16NN) \times 52}{5 \times 47}$$

donde:

- Se consideran 5 turnos de trabajo de 8 horas (de 6 a 14 en jornada normal con una interrupción de una hora, segundo turno de 14 a 22 h tercer turno de 22 a 6 h) y 2 de descanso.

5. Métodos para la determinación del riesgo

Radiación térmica/sobrepresión: Este caso corresponde a:

- Probabilidad de que la radiación/sobrepresión provoque la muerte.
- Frecuencia del accidente.

El cálculo de las curvas isoriesgo es relativamente laborioso y normalmente se recurre al uso de un código de ordenador.

Son numerosos los códigos que permiten realizar estos cálculos, entre otros se pueden citar: RISK CURVES, ISORIESGO, etc.

5.4 METODOS ALTERNATIVOS DE DETERMINACION DEL RIESGO

La determinación del riesgo correspondiente a métodos cualitativos consiste en la contraposición de los valores (bien sean índices o rangos cualitativos) obtenidos para la probabilidad y para la severidad de las consecuencias en un cuadro parecido al reseñado en las figuras 5.1/I y 5.1/II.

Los criterios de aceptabilidad (ver apartado 5.5) delimitarán las zonas para las cuales se requiere un estudio más profundo y la adopción de medidas de prevención/mitigación.

FIGURA 5.1/I DEFINICION DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA SEGUN EL RMPP (1)

| | |
|-----------|---|
| I Baja: | Ocurrencia considerada <i>improbable</i> durante la vida media de la planta, en condiciones normales de operación y mantenimiento. |
| II Media: | Ocurrencia considerada <i>posible</i> durante la vida media de la instalación. |
| III Alta: | Probabilidad de ocurrencia suficientemente alta como para poder suponer que el suceso <i>ocurrirá</i> al menos una vez durante la vida media de la instalación. |

(1) *Risk Management and Prevention Program (USA).*

FIGURA 5.1/II DEFINICIÓN DE SEVERIDAD DE CONSECUENCIAS SEGUN EL RMPP (1)

| | |
|-----------|--|
| I Baja: | Se puede considerar que el producto químico se dispersará en el entorno en concentraciones despreciables. Cabe esperar lesiones para exposiciones largas o individuos con condiciones de salud susceptibles de crear complicaciones. |
| II Media: | Se puede considerar que el producto químico se dispersará en el entorno en concentraciones suficientes para causar lesiones serias y/o muertes si no se toman medidas correctivas efectivas con rapidez. |
| III Alta: | Se puede considerar que el producto químico se dispersará en el entorno en concentraciones suficientes para causar lesiones serias y/o muertes por exposición. Cabe esperar que un elevado número de personas serán afectadas. |

(1) *Risk Management and Prevention Program (USA).*

5.5 CRITERIOS DE ACEPTACION

Las decisiones con respecto de la aceptabilidad de un riesgo dependen de los riesgos individual y social, aunque existen en general más criterios basados en el riesgo individual, que en el social.

Riesgos individual: Tanto el RSSG (5) como el HSE (6) proponen como riesgo individual *intolerable* 10^{-3} /año, incluso si la persona expuesta considera que, de su exposición, se desprende un beneficio importante (por ejemplo un trabajo o una actividad lúdica).

Un riesgo de 10^{-6} /año y en algunas circunstancias 10^{-5} /año debería de considerarse como *aceptable* por ser trivial, en todo tipo de circunstancias.

Entre ambos niveles debería de exigirse la implantación de las medidas preventivas o de mitigación que reduzcan el riesgo.

(5) *Royal Society Study Group (RSSG)* que publicó en 1983 un estudio sobre el riesgo la evaluación del (*Risk Assessment*).

(6) *Health and Safety Executive.*



Riesgo social: El riesgo individual es a menudo una condición insuficiente. Existe una aversión por parte de la sociedad a la posibilidad, aunque pequeña, de que un accidente pueda provocar un número importante de muertes. Por otra parte el riesgo individual puede cumplir con los criterios de aceptabilidad, aún cuando exista un riesgo social alto. Un ejemplo extremo sería un hospital situado cerca de una instalación con peligro de accidente mayor. Las personas situadas de forma permanente en el edificio estarían expuestas a un riesgo relativamente alto, pero pacientes individuales, presentes durante un corto período de tiempo, tendrían un incremento de riesgo individual muy pequeño, en promedio sobre todo un año.

El RSSG (7) no sugiere ningún valor máximo para el riesgo social, mientras que el ACMH (8) indica que cualquier accidente grave en una instalación no nuclear que implicaría 10 o más muertes debería tener una probabilidad menor de 10^{-4} por año, aunque se considera que $2 \cdot 10^{-4}$ podría ser el umbral de riesgo social tolerable.

Para accidentes capaces de causar más víctimas mortales, se indica que el riesgo de provocar entre 500-1000 muertos en un accidente no nuclear debería de ser menor de 10^{-3} e incluso menor de $2 \cdot 10^{-4}$ por año en situaciones en las cuales las posibilidades de elección son escasas, aunque cuando exista la posibilidad de elegir si someterse o no al riesgo, se podría fijar un valor mayor.

5.6 EJEMPLOS

Se incluyen unos ejemplos en los cuales se reflejan los puntos tratados en este capítulo.

En la tabla 5.1 se indica un resumen de un cálculo del riesgo. En las primeras columnas, «hipótesis incidental» y «evento», se indican las hipótesis consideradas y el tipo de accidente correspondiente para distintas situaciones (diámetros de fuga).

(7) *Royal Society Study Group.*

(8) *Advisory Committee on Major Hazards.*

TABLA 5.1 RESUMEN DE LA EVALUACION DEL RIESGO EN SITUACION ACTUAL DE UNA INSTALACION

| Hipótesis incidental (1) | Evento (2) | Notas (3) | Frecuencia (4) | | Victimas (5) | | Riesgo (por equipo) (6) | | Núm. equip. (7) | Riesgo global (8) | | Porcentaje del riesgo global (9) | |
|--|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|--------------|--------|-------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------|
| | | | oc/año | | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. | | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. |
| H1 Rotura de la manguera de descarga de la sistema (fase gas). | Fuga tóxica continua. | | | | | | | | | | | | |
| H1a. Rotura del 1 % sección. | | | 1,59.10 ⁻⁵ | 1,25.10 ⁻³ | | | 1,99.10 ⁻⁶ | 0,00 | 1 | 1,99.10 ⁻⁶ | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H1b. Rotura del 10 % sección. | | | 1,29.10 ⁻⁵ | 9,41.10 ⁻³ | | | 1,21.10 ⁻⁷ | 0,00 | 1 | 1,21.10 ⁻⁷ | 0,00 | 0,03 | 0,00 |
| H1c. Rotura del 100 % sección. | | | 1,39.10 ⁻⁶ | 6,30.10 ⁻² | | | 8,76.10 ⁻⁶ | 0,00 | 1 | 8,76.10 ⁻⁶ | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| H2 Rotura de la manguera de descarga de la sistema (fase líquida). | Fuga tóxica continua. | | | | | | | | | | | | |
| H2a. Rotura del 1 % sección. | | | 1,59.10 ⁻⁵ | 2,11.10 ⁻² | | | 3,35.10 ⁻⁷ | 0,00 | 1 | 3,35.10 ⁻⁷ | 0,00 | 0,07 | 0,00 |
| H2b. Rotura del 10 % sección. | | | 1,29.10 ⁻⁵ | 1,82.10 ⁻² | | | 2,35.10 ⁻⁶ | 0,00 | 1 | 2,35.10 ⁻⁶ | 0,00 | 0,51 | 0,00 |
| H2c. Rotura del 100 % sección. | | | 1,39.10 ⁻⁶ | 8,78.10 ⁻¹ | | | 1,22.10 ⁻⁶ | 0,00 | 1 | 1,22.10 ⁻⁶ | 0,00 | 0,27 | 0,00 |
| H3. Rotura catastrófica del depósito de amoníaco. | Fuga tóxica instantánea. | Dos grados de llenado (50 y 100 por 100). | 1,28.10 ⁻⁶ | 1,62E +00 | | | 6,18 | 2,07.10 ⁻⁶ | 1 | 2,07.10 ⁻⁶ | 7,91.10 ⁻⁶ | 0,45 | 100 |

(1) Hipótesis de accidente considerada.

(2) Consecuencia final analizada.

(3) Observaciones.

(4) Frecuencia del suceso considerado en ocasiones por año.

(5) Víctimas asociadas al suceso, se consideran las interiores y las exteriores.

(6) Riesgo asociado a la hipótesis; producto de la frecuencia por el número de víctimas. Se calcula el interior/exterior según las víctimas consideradas.

(7) Número de equipos. El riesgo considerado se asocia a un equipo. Si existe más de un equipo que puede tener asociada la misma consecuencia se multiplica el riesgo por el número de equipos.

(8) Riesgo global interior o exterior se obtiene considerando todos los equipos.

(9) Porcentaje que representa el riesgo calculado con respecto del riesgo total (obtenido por suma de los riesgos de todas las hipótesis de accidente).

TABLA 5.1 RESUMEN DE LA EVALUACION DEL RIESGO EN SITUACION ACTUAL DE UNA INSTALACION (Continuación)

| Hipótesis incidental (1) | Evento (2) | Notas (3) | Fte. frecuencia (oc/año) (4) | | Victimas (vict/oc) (5) | | Riesgo (por equipo) (6) | | Núm. equip. (7) | Riesgo global (8) | | Porcentaje del riesgo global (9) | |
|---|-----------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|------------------------|--------|-------------------------|--------|-----------------|----------------------|--------|----------------------------------|--------|
| | | | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. | | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. |
| H4. Rotura catastrófica del depósito de amoníaco. | Fuga tóxica continua. | Rotura compresor. | $2,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,74 \cdot 10^{-1}$ | | | $3,48 \cdot 10^{-5}$ | 0,00 | 1 | $3,48 \cdot 10^{-9}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H5. Rotura de la tubería de descarga del depósito (fase ilíquida). | Fuga tóxica continua. | | | | | | | | | | | | |
| H5a. Fuga en bridas y válvulas. | | | $1,46 \cdot 10^{-1}$ | $2,38 \cdot 10^{-3}$ | | | $3,47 \cdot 10^{-4}$ | 0,00 | 1 | $3,47 \cdot 10^{-4}$ | 0,00 | 75,4 | 0,00 |
| H5b. Rotura del 10 % sección. | | | $1,75 \cdot 10^{-3}$ | $3,70 \cdot 10^{-2}$ | | | $6,48 \cdot 10^{-5}$ | 0,00 | 1 | $6,48 \cdot 10^{-5}$ | 0,00 | 14,0 | 0,00 |
| H5c. Rotura del 100 % sección. | | | $1,75 \cdot 10^{-4}$ | $4,80 \cdot 10^{-2}$ | | | $8,40 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 1 | $8,40 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 1,83 | 0,00 |
| H6. Explosión del domo de calderas. | Explosión por sobrepresión. | | | | | | | | | | | | |
| H6a. En calderas 1, 2, 3. | | | $3,66 \cdot 10^{-8}$ | 1,00 | | | $3,66 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 3 | $1,10 \cdot 10^{-7}$ | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| H6b. En caldera 5. | | | $1,42 \cdot 10^{-8}$ | 1,00 | | | $1,42 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 1 | $1,42 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H6c. En caldera 6. | | | $2,24 \cdot 10^{-6}$ | 1,00 | | | $2,24 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 1 | $2,24 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 0,49 | 0,00 |
| H7. Explosión en el hogar de calderas. | Explosión por deflagración. | | | | | | | | | | | | |
| H7a. En calderas 1, 2, 3. | | | $3,55 \cdot 10^{-5}$ | $2,50 \cdot 10^{-1}$ | | | $8,88 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 3 | $2,66 \cdot 10^{-5}$ | 0,00 | 5,80 | 0,00 |
| H7b. En caldera 5. | | | $1,27 \cdot 10^{-5}$ | $2,50 \cdot 10^{-1}$ | | | $3,18 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 1 | $3,18 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 0,69 | 0,00 |
| H7c. En caldera 6. | | | $5,47 \cdot 10^{-6}$ | $2,50 \cdot 10^{-1}$ | | | $1,37 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 1 | $1,37 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 0,30 | 0,00 |
| Riesgo global fábrica
Máximas personas expuestas 72,00
Riesgo individual $6,38 \cdot 10^{-6}$
FAR 0,35 | | | | | | | | | | | | | 100 |



En la cuarta columna se reseña la frecuencia de los sucesos expresada en ocurrencia por año.

A continuación se da el número de víctimas asociado, tanto en el interior de la instalación, como en el exterior.

En la novena columna se indica el número de equipos afectados por la hipótesis planteada.

En las columnas siguientes se refleja el riesgo global (interior/exterior) obtenido como producto y contabilizando todos los equipos implicados. Por último, se indican las contribuciones porcentuales al riesgo global (interior/exterior) debidas a cada una de las hipótesis contempladas. Así, por ejemplo, en la hipótesis H1C, rotura del 100% de la manguera de descarga de la cisterna en fase gas el suceso tiene una frecuencia de $1,39 \cdot 10^{-6}$ ocasiones/año y causa $6,3 \cdot 10^{-2}$ víctimas en el interior de la instalación y ninguna en el exterior de la misma.

El riesgo global interior por equipo se calcula como:

$$1,39 \cdot 10^{-6} \text{ oc/año} \times 6,3 \cdot 10^{-2} \text{ víct/oc} = 8,76 \cdot 10^{-8} \text{ víct/año}$$

Como existe un solo punto de descarga de cisterna de estas características, este riesgo también es el global interior de la planta para esta hipótesis.

El porcentaje sobre el riesgo global total de la instalación es $4,59 \cdot 10^{-4}$ (suma de los riesgos globales interiores de todas las hipótesis que aparecen en la tabla 5.1, dividido por $8,76 \cdot 10^{-8}$ víct/año, es decir, 0,02%).

En la parte inferior de la tabla se presenta el riesgo global interior, exterior, el riesgo individual (interior/exterior) y el FAR (*Fatal Accident Rate*) definido en el apartado 5.1.4.

El riesgo global interior y exterior se calcula como suma de los riesgos asociados a cada hipótesis incidental.

La instalación tiene una plantilla expuesta de 72 personas, mientras que las poblaciones vecinas tienen un total de 13.468 personas. El riesgo individual para

5. Métodos para la determinación del riesgo

el personal de la instalación es igual al riesgo global interior dividido por 72: $4,59 \cdot 10^{-4}$ dividido por 72, es decir, $6,38 \cdot 10^{-6}$; mientras que el correspondiente al exterior es igual al riesgo global exterior dividido por 13.468: $7,91 \cdot 10^{-6}$ dividido por 13.468, es decir, $5,8 \cdot 10^{-10}$, un valor despreciable.

La tabla 5.2 representa la situación de la planta considerando la introducción de una serie de medidas obtenidas como resultado del estudio. En este caso concreto las mejoras aportadas a la instalación consisten en:

- Análisis de las cisternas antes de descargar su contenido a un depósito de amoníaco. Esta mejora cubre básicamente tres propósitos: evitar la introducción de un producto incompatible con el amoníaco, evitar la contaminación con un producto corrosivo y prevenir el fenómeno de *stress corrosion cracking*.
- Reducción del período entre revisiones del depósito.
- Purga periódica del depósito en fase gas para reducir su contenido en oxígeno.
- Cambio de especificación de válvulas para provisión de fuelles.
- Realizar el consumo de amoníaco desde la fase gas.
- Etc.

Estas medidas reducen el riesgo individual interior hasta $6 \cdot 10^{-6}$, un valor que estaría como el anterior dentro del rango de aceptabilidad.

Representaría, pues, el riesgo residual de la instalación.

La figura 5.2 proporciona las curvas isoriesgo de una instalación.

Se representa sobre el soporte de un plano de la instalación las curvas isoriesgo correspondientes a 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} y 10^{-8} . Estas líneas representan la frecuencia de muerte como consecuencia de las hipótesis de accidentes planteadas para la unidad.

TABLA 5.2 RESUMEN DE LA EVALUACION DEL RIESGO EN SITUACION MEJORADA DE LA INSTALACION

| Hipótesis incidental (1) | Evento (2) | Fre-
cuen-
cia
(oc/año)
(3) | Victimas
(vict/oc)
(4) | | Riesgo
(por equipo)
(5) | | Núm.
equip.
(6) | Riesgo
global (7) | | Porcentaje
del riesgo
global (8) | | Porcentaje
de mejora
de riesgo (9) | |
|---|--------------------------------------|---|------------------------------|--------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--|--------|--|--------|
| | | | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. | | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. | Inter. | Exter. |
| H1. Rotura de la manguera de descarga de la cisterna (fase gas). | Fuga tóxica continua. | (10) | | | | | | | | | | | |
| H1a. Rotura del 1% sección. | | $1,01 \cdot 10^{-5}$ | $1,25 \cdot 10^{-3}$ | | $1,26 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 1 | $1,26 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 36,56 |
| H1b. Rotura del 10% sección. | | $1,00 \cdot 10^{-5}$ | $9,41 \cdot 10^{-3}$ | | $9,41 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 1 | $9,41 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 22,23 |
| H1c. Rotura del 100% sección. | | $1,10 \cdot 10^{-6}$ | $6,30 \cdot 10^{-2}$ | | $6,93 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 1 | $6,93 \cdot 10^{-8}$ | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 20,89 |
| H2 Rotura de la manguera de descarga de la cisterna (fase líquida). | Fuga tóxica continua. | | | | | | | | | | | | |
| H2a. Rotura del 1% sección. | | $1,01 \cdot 10^{-5}$ | $2,11 \cdot 10^{-2}$ | | $2,13 \cdot 10^{-7}$ | 0,00 | 1 | $2,13 \cdot 10^{-7}$ | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 36,39 |
| H2b. Rotura del 10% sección. | | $1,00 \cdot 10^{-5}$ | $1,82 \cdot 10^{-1}$ | | $1,82 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 1 | $1,82 \cdot 10^{-6}$ | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | 22,55 |
| H2c. Rotura del 100% sección. | | $1,10 \cdot 10^{-6}$ | $8,78 \cdot 10^{-1}$ | | $9,66 \cdot 10^{-7}$ | 0,00 | 1 | $9,66 \cdot 10^{-7}$ | 0,00 | 0,22 | 0,00 | 0,00 | 20,84 |
| H3. Rotura catastrófica del depósito de amoníaco. | Fuga tóxica instantánea (50 y 100%). | $5,54 \cdot 10^{-7}$ | 1,62 | 6,18 | $8,96 \cdot 10^{-7}$ | $3,42 \cdot 10^{-6}$ | 1 | $8,96 \cdot 10^{-7}$ | $3,42 \cdot 10^{-6}$ | 0,21 | 100 | 56,72 | 56,7 |

(1) Hipótesis de accidente considerada.

(2) Consecuencia final analizada.

(3) Observaciones.

(4) Frecuencia del suceso considerado en ocasiones por año.

(5) Víctimas asociadas al suceso, se consideran las interiores y las exteriores.

(6) Riesgo asociado a la hipótesis: producto de la frecuencia por el número de víctimas. Se calcula el interior/exterior según las víctimas consideradas.

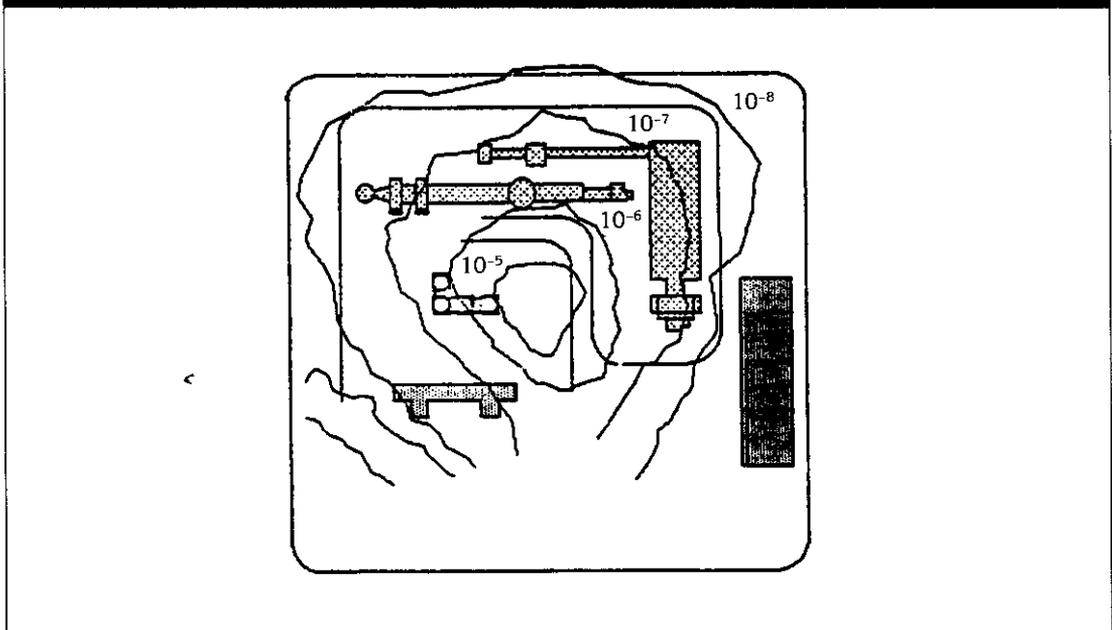
(7) Número de equipos. El riesgo considerado se asocia a un equipo. Si existe más de un equipo que puede tener asociada la misma consecuencia se multiplica el riesgo por el número de equipos.

(8) Riesgo global interior o exterior se obtiene considerando todos los equipos.

(9) Porcentaje que representa el riesgo calculado con respecto del riesgo total (obtenido por suma de todos los riesgos de todas las hipótesis de accidente).

(10) Las frecuencias subrayadas corresponden a frecuencias directamente afectadas por las mejoras citadas en la página 131.

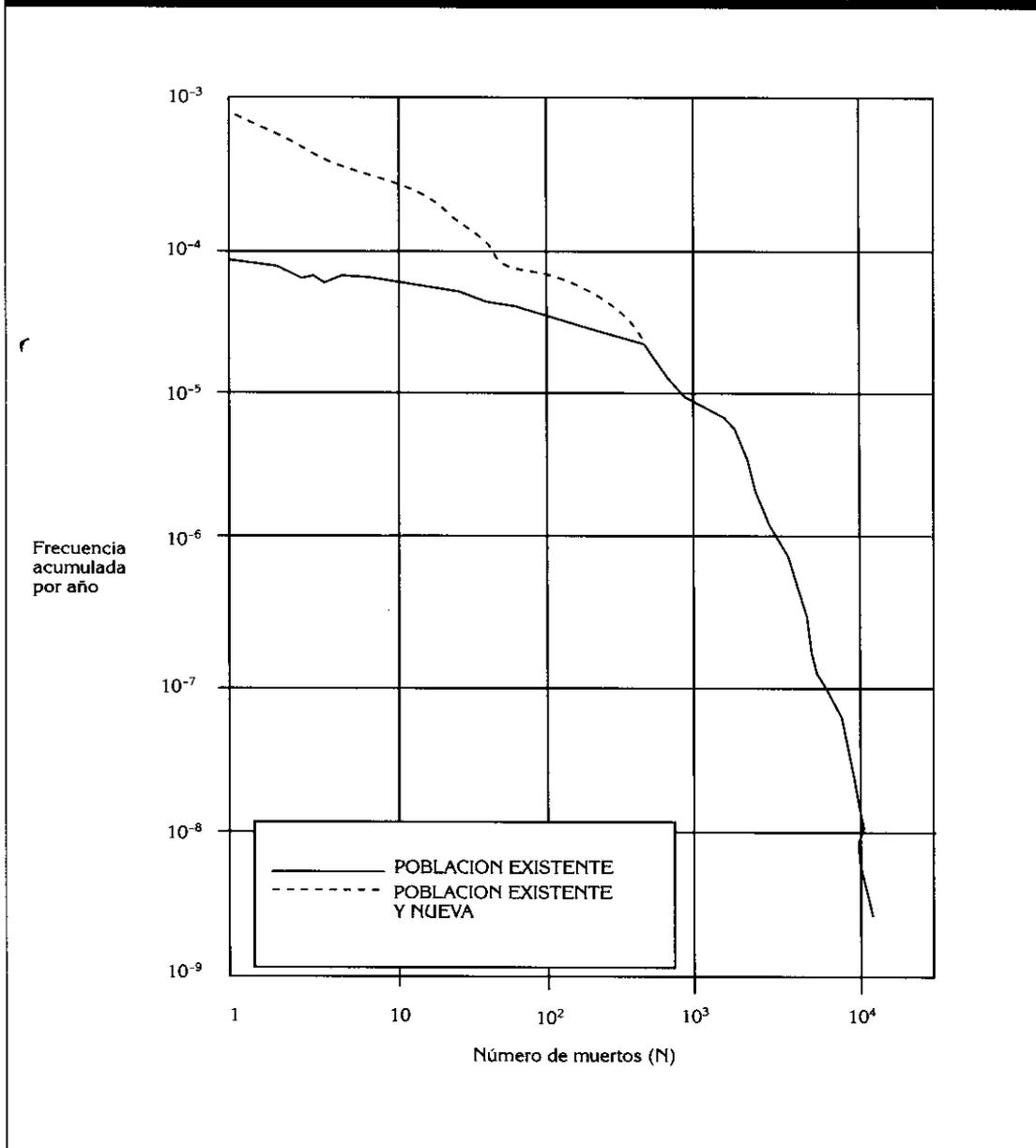
FIGURA 5.2 EJEMPLO DE CURVAS ISORIESGO



La figura 5.3 proporciona un ejemplo de curva de riesgo social publicada por el HSE(9). En abcisas se indica en escala logarítmica el número de muertos desde 1 hasta 1.000; en ordenadas se representa la frecuencia acumulada por año, desde 10^{-9} hasta 10^{-3} , también, en escala logarítmica. la figura se representa para dos situaciones: en trazos continuos se indica la situación actual y en trazos discontinuos la situación correspondiente a la zona industrial considerando la implantación de una nueva instalación industrial.

(9) *Health and Safety Executive.*

FIGURA 5.3 EJEMPLO DE UNA CURVA DE RIESGO SOCIAL PUBLICADA POR EL HSE (1)



(1) Health and Safety Executive.