



**Dirección General
de Protección Civil**



GUIA TECNICA
Métodos cualitativos
para el análisis de riesgos

	Pág.
CAPITULO 1. INTRODUCCION	15
1.1 Objeto	17
1.2 Alcance	17
CAPITULO 2. METODOS PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS QUIMICOS	19
2.1 Métodos cualitativos	21
2.1.1 Análisis histórico de accidentes	21
2.1.1.1 <i>Descripción</i>	21
2.1.1.2 <i>Ambito de aplicación</i>	22
2.1.1.3 <i>Recursos necesarios</i>	22
2.1.1.4 <i>Soportes informáticos</i>	22
2.1.1.5 <i>Ventajas/Inconvenientes</i>	24
2.1.1.6 <i>Ejemplos</i>	24
2.1.2 Check list	27
2.1.2.1 <i>Descripción</i>	27
2.1.2.2 <i>Ambito de aplicación</i>	27
2.1.2.3 <i>Recursos necesarios</i>	28
2.1.2.4 <i>Soportes informáticos</i>	28
2.1.2.5 <i>Ventajas/Inconvenientes</i>	28
2.1.2.6 <i>Ejemplos</i>	29
2.1.3 Análisis preliminar de riesgos.....	31
2.1.3.1 <i>Descripción</i>	31
2.1.3.2 <i>Ambito de aplicación</i>	32
2.1.3.3 <i>Recursos necesarios</i>	32
2.1.3.4 <i>Soportes informáticos</i>	33
2.1.3.5 <i>Ventajas/Inconvenientes</i>	33
2.1.3.6 <i>Ejemplos</i>	33
2.1.4 Análisis What if ...? (¿Qué pasa si ...?)	35
2.1.4.1 <i>Descripción</i>	35
2.1.4.2 <i>Ambito de aplicación</i>	35
2.1.4.3 <i>Recursos necesarios</i>	35

2.1.4.4	<i>Soportes informáticos</i>	36
2.1.4.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	36
2.1.4.6	<i>Ejemplos</i>	36
2.1.5	Análisis funcional de operatividad (HAZOP).....	40
2.1.5.1	<i>Descripción</i>	40
2.1.5.2	<i>Ambito de aplicación</i>	43
2.1.5.3	<i>Recursos necesarios</i>	45
2.1.5.4	<i>Soportes informáticos</i>	46
2.1.5.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	46
2.1.5.6	<i>Ejemplos</i>	47
2.1.6	Análisis del modo y efecto de los fallos (FMEA)	53
2.1.6.1	<i>Descripción</i>	53
2.1.6.2	<i>Ambito de aplicación</i>	54
2.1.6.3	<i>Recursos necesarios</i>	54
2.1.6.4	<i>Soportes informáticos</i>	54
2.1.6.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	55
2.1.6.6	<i>Ejemplos</i>	55
2.1.7	Análisis del modo, efecto y criticidad de los fallos (FMEAC)	58
2.1.7.1	<i>Descripción</i>	58
2.2	Métodos semicuantitativos	59
2.2.1	Índice de DOW de incendio y explosión	60
2.2.1.1	<i>Descripción</i>	60
2.2.1.1.1	Unidades de proceso	63
2.2.1.1.2	Factor de Material	63
2.2.1.1.3	Factores de Riesgo	63
2.2.1.1.4	Índice de Incendio y Explosión	65
2.2.1.1.5	Factores de Bonificación	65
2.2.1.2	<i>Ambito de aplicación</i>	67
2.2.1.3	<i>Recursos necesarios</i>	67
2.2.1.4	<i>Soportes informáticos</i>	68
2.2.1.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	68
2.2.1.6	<i>Ejemplos</i>	68

2.2.2	Indice de MOND	75
2.2.2.1	<i>Descripción</i>	75
2.2.2.2	<i>Ambito de aplicación</i>	77
2.2.2.3	<i>Recursos necesarios</i>	77
2.2.2.4	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	77
2.2.2.5	<i>Ejemplos</i>	79
2.3	Otros métodos de apoyo	88
2.3.1	Revisión/auditoría de Seguridad (Safety Review).....	88
2.3.1.1	<i>Descripción</i>	88
2.3.1.2	<i>Ambito de aplicación</i>	90
2.3.1.3	<i>Recursos necesarios</i>	91
2.3.1.4	<i>Soportes informáticos</i>	91
2.3.1.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	91
2.3.1.6	<i>Ejemplos</i>	91
2.4	Métodos para la identificación de otros riesgos	93
2.5	Resumen	93
CAPÍTULO 3. METODOS PARA LA EVALUACION CUALITATIVA DE FRECUENCIAS DE OCURRENCIA.....		97
3.1	Introducción	99
3.2	Indices de frecuencias	99
3.2.1	Método UCSIP	99
3.2.1.1	<i>Descripción</i>	99
3.2.1.2	<i>Ambito de aplicación</i>	100
3.2.1.3	<i>Recursos necesarios</i>	102
3.2.1.4	<i>Soportes informáticos</i>	102
3.2.1.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	102
3.2.1.6	<i>Ejemplos</i>	102
3.2.2	Otros métodos	107
3.2.2.1	<i>Descripción</i>	107
3.2.2.2	<i>Ambito de aplicación</i>	108
3.2.2.3	<i>Recursos necesarios</i>	108
3.2.2.4	<i>Soportes informáticos</i>	108
3.2.2.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	108

3.3	Arboles de fallos	109
3.3.1	Descripción	109
3.3.2	Ambito de aplicación	113
3.3.3	Recursos necesarios	114
3.3.4	Soportes informáticos	114
3.3.5	Ventajas/Inconvenientes	115
3.3.6	Ejemplos	116
3.4	Arboles de sucesos	126
3.4.1	Descripción	126
3.4.2	Ambito de aplicación	127
3.4.3	Recursos necesarios	127
3.4.4	Soportes informáticos	128
3.4.5	Ventajas/Inconvenientes	128
3.4.6	Ejemplos	128
3.5	Análisis Causa-Consecuencias	128
3.5.1	Descripción	128
3.5.2	Ambito de aplicación.....	133
3.5.3	Recursos necesarios	133
3.5.4	Soportes informáticos	133
3.5.5	Ventajas/Inconvenientes	134
3.5.6	Ejemplos	134
3.6	Resumen	136
CAPÍTULO 4. METODOS PARA LA EVALUACION CUALITATIVA DE ALCANCES DE CONSECUENCIAS ACCIDENTALES		137
4.1	Introducción	139
4.2	Indices de gravedad	139
4.2.1	Método UCSIP	139
4.2.1.1	<i>Descripción</i>	139
4.2.1.2	<i>Ambito de aplicación</i>	145
4.2.1.3	<i>Recursos necesarios</i>	145
4.2.1.4	<i>Soportes informáticos</i>	145
4.2.1.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	146
4.2.1.6	<i>Ejemplos</i>	146

4.2.2	Otros métodos	148
4.2.2.1	<i>Descripción</i>	148
4.2.2.2	<i>Ambito de aplicación</i>	148
4.2.2.3	<i>Recursos necesarios</i>	149
4.2.2.4	<i>Soportes informáticos</i>	149
4.2.2.5	<i>Ventajas/Inconvenientes</i>	149
4.2.2.6	<i>Ejemplos</i>	149
4.3	Resumen	150

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Formato de recogida del HAZOP (proceso continuo).	44
Figura 2.2	Formato de recogida del HAZOP (proceso discontinuo)	44
Figura 2.3	Método HAZOP. Ejemplo de proceso batch (discontinuo)	48
Figura 2.4	Método HAZOP. Ejemplo: esquema del sistema continuo	51
Figura 2.5	Método DOW. Procedimiento de cálculo	61
Figura 2.6	Método del índice DOW. Factor de daño de la unidad (FD) en función de (F3) y (FM)	71
Figura 2.7	Método del índice DOW. Radio de exposición (RE) en función de IIE	72
Figura 2.8	Método del índice DOW. Factor de bonificación efectivo (FBE) a partir del factor de bonificación (FB) ..	74
Figura 2.9	Método del índice DOW. Máximos días probables perdidos (MPDO) en función de MPPD	76
Figura 2.10	Esquema general del método del índice MOND	78
Figura 2.11	Curvas para la determinación del factor P de presión alta para el método del índice de MOND	84
Figura 2.12	Curvas para la determinación del factor Q de cantidad para el método del índice de MOND	85
Figura 3.1	Método UCSIP. Esquema para la determinación del nivel de probabilidad	101
Figura 3.2	Método UCSIP. Factores de seguridad	107

Figura 3.3	Método del árbol de fallos. Ejemplo: esquema del depósito de amoníaco	117
Figura 3.4	Método del árbol de fallos. Ejemplo: árbol de fallos de rotura del depósito de amoníaco	118
Figura 3.5	Método del árbol de sucesos. Esquema general	127
Figura 3.6	Método del árbol de sucesos. Ejemplo	129
Figura 3.7	Método del análisis causa/consecuencia. Simbología básica	131
Figura 3.8	Ejemplo del método del diagrama de causa/consecuencia	135
Figura 4.1	Método UCSIP. Determinación del nivel de gravedad .	141
Figura 4.2	Método UCSIP. Definición de los accidentes	143
Figura 4.3	Método UCSIP. Esquema lógico de asignación de NG .	147

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Método del análisis histórico. Bancos de datos de accidentes	23
Tabla 2.2	Palabras Guías del HAZOP	41
Tabla 2.3	Contenido de las columnas del formato HAZOP	42
Tabla 2.4	Método HAZOP. Ejemplo de proceso discontinuo	49
Tabla 2.5	Método HAZOP. Ejemplo de proceso continuo	52
Tabla 2.6	Proceso de cálculo del índice de MOND (1985)	79
Tabla 2.7	Ecuaciones del método del índice de MOND	86
Tabla 2.8	Método del Índice de MOND. Clasificación de los índices.....	89
Tabla 2.9	Resumen de métodos y características para la identificación de riesgos	94
Tabla 3.1	Método UCSIP. Parámetros P1i para la determinación de frecuencias	103
Tabla 3.2	Método UCSIP. Parámetros P2i para la determinación de frecuencias	104
Tabla 3.3	Simbología del árbol de fallos	111
Tabla 3.4	Códigos de cálculo del árbol de fallos	114
Tabla 3.5	Métodos para la identificación de riesgos	136
Tabla 4.1	Métodos para la evaluación cualitativa del alcance de consecuencias	150

ABREVIATURAS

- APR *Análisis Preliminar de Riesgos.*
FMEA *Failure Mode and Effects Analysis.*
FMEAC *Failure Mode and Effects Analysis Criticity.*

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 recomentatorio 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 cuantitativos para el análisis de riesgos» completa y profundiza el contenido de la Guía Técnica: «Metodologías para el análisis de riesgos. Visión general».

Su objeto consiste en describir y analizar los distintos métodos cualitativos que se pueden utilizar para completar las etapas principales de un análisis de riesgos: identificación del riesgo, evaluación cualitativa de frecuencias y consecuencias.

Se incluyen en esta Guía todas las técnicas que recurren a una valoración cualitativa o semicualitativa y no a una medida numérica del fenómeno analizado; si bien en los métodos semicualitativos, se utilizan valores numéricos, estos no se consideran como valores absolutos sino como índices relativos de ponderación.

1.2 ALCANCE

Esta Guía describe los métodos más usuales sin perjuicio de aquellos que se puedan desarrollar en el futuro o de las posibles variantes que se pueden introducir en cada método según los casos particulares de aplicación.

Para cada uno de los métodos incluidos en esta Guía Técnica se reseñan en distintos apartados los siguientes elementos:

- Descripción del método.
Se hace una presentación general del método.
- Ambito de aplicación.
Se indica cuales son las aplicaciones principales de la técnica.
- Recursos necesarios.
Se citan los recursos materiales y humanos que requiere el uso de la técnica.
- 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.

2. Identificación de riesgos químicos

2.1 METODOS CUALITATIVOS

2.1.1 Análisis histórico de accidentes

2.1.1.1 Descripción

Consiste en estudiar los accidentes registrados en el pasado en plantas similares o con productos idénticos o de la misma naturaleza.

Se basa en informaciones de procedencia diversa:

- Bibliografía especializada (publicaciones periódicas y libros de consulta).
- Bancos de datos de accidentes informatizados, ver apartado 2.1.1.4 de esta Guía.
- Registro de accidentes de la propia empresa, de asociaciones empresariales o de las autoridades competentes.
- Informes o peritajes realizados normalmente sobre los accidentes más importantes.

Algunos factores que se deben considerar al plantear y desarrollar un análisis histórico de accidentes son:

1. Determinar la definición de accidentes a analizar:
 - Tipo de accidentes a ser estudiados (productos, instalaciones).
2. Identificación exacta del accidente:
 - Lugar
 - Fecha y hora
 - Productos implicados
 - Instalación o equipos implicados
3. Identificación de las causas de los accidentes:
 - Errores humanos
 - Fallo de equipos
 - Fallo de diseño o de proceso.
4. Identificación del alcance de los daños causados:
 - Pérdida de vidas
 - Heridos

-
- Daños al medio ambiente
 - Pérdidas en instalaciones y daños materiales
 - Evacuación de personas, otras medidas, etc.
 - Impacto en la población en general.
5. Descripción y valoración de las medidas aplicadas y, si es posible, de las estudiadas para evitar la repetición del accidente.

2.1.1.2 *Ambito de aplicación*

- Aplicación útil principalmente para el establecimiento de posibles riesgos en una instalación.
- Puede ser de utilidad para hacer una aproximación cuantitativa de la frecuencia de determinados tipos de accidentes en caso de disponerse de una base estadística suficientemente representativa.
- De especial utilidad cuando se aplica a procesos y productos de utilización masiva o frecuente (productos energéticos, productos químicos de base).
- Los resultados obtenidos dependen mucho de la calidad y de la información disponible en las fuentes de información consultadas.

2.1.1.3 *Recursos necesarios*

Esta es una técnica relativamente poco costosa dentro del campo del análisis de riesgo. El proceso consta de la consulta a la fuente o fuentes de información seleccionadas y posteriormente un trabajo de selección y elaboración estadística de los resultados obtenidos.

2.1.1.4 *Soportes informáticos*

Entre los principales bancos de datos de accidentes industriales se pueden citar: OSIRIS-1, OSIRIS-2, FACTS, MHIDAS ⁽¹⁾ y el banco de datos desarrollados por el Centro de Investigación de la CEE de ISPRA: MARS ⁽²⁾. En principio todos ellos recogen los accidentes ocurridos en cualquier país del mundo, si bien cada banco ofrece normalmente mayor número de accidentes sobre su propio país, por la lógica mayor facilidad en cuanto a obtención de datos. Sus características se reseñan en la tabla 2.1.

(1) Major Hazards Incident Data Service.

(2) Major Accident Reporting System.

2. Identificación de riesgos químicos

TABLA 2.1 METODO DEL ANALISIS HISTORICO. BANCOS DE DATOS DE ACCIDENTES

Banco de accidentes	Numero de casos registrados Periodo	Accidentes	Procedencia de los datos	Observaciones
OSIRIS-1	3.000 (1970-1990)	Con sustancias peligrosas. Incluye: Transporte, instalaciones.	General.	País: Italia. Consulta y respuesta por fax o disquete magnético. Idioma: Inglés.
OSIRIS-2	2.500 (1977-1992)	Con hidrocarburos.	Oil Spill Intelligence Report, que recopila todos los casos ocurridos en el mundo.	País: Italia. Idem. Actualizado anualmente.
MHIDAS	5.330 (de forma continua desde 1985; recopilación de datos desde 1966 y algunos importantes anteriores a la fecha).	Con sustancias peligrosas. Incluye: Almacenamiento, transporte y proceso, pirólisis química y petroquímica. No contempla accidentes en plataformas petrolíferas, minas o con productos nucleares.	Fuentes públicas generales.	País: Reino Unido. Obtención de los datos: 1. Por contacto directo. 2. Por consulta on-line. 3. CD-Rom. Idioma: Inglés.
FACTS	15.000 (creado en 1980, contiene datos desde 1930, aunque la mayoría corresponde al período 1960-1983).	Con sustancias peligrosas. Incluye: Almacenamiento, transporte, carga/descarga, proceso y uso.	Fuentes públicas generales, investigaciones propias, informes técnicos procedentes de compañías privadas u organismos estatales.	País: Holanda. Consulta off line disponible en disquete de PC. Anualmente actualizado. Idioma: Inglés.
SONATA	2.500 (un 94% corresponde al período 1980-1989; un 5% al período 1930-1980 y el resto (1%) a accidentes anteriores a 1930).	Idem.	Fuentes públicas.	País: Italia. Ha dejado de actualizarse. Idioma: Inglés.
MARS	167 (1984 a la actualidad).	Idem.	Información pública sobre los accidentes en instalaciones de los países de la Comunidad afectados por la Directiva Seveso.	Banco de datos de los accidentes notificados a la Comisión de la CEE para la aplicación de la Directiva Seveso. En 1991 se publica un informe sobre las enseñanzas adquiridas en estos accidentes. Actualmente en proceso de actualización y cubriendo 121 casos. Idioma: Inglés.

2.1.1.5 *Ventajas/Inconvenientes*

Ventajas:

- El establecimiento de hipótesis de accidentes se basa en casos reales.

Inconvenientes:

- Los accidentes sobre los que se puede encontrar una documentación completa son únicamente los «más importantes».
- En los bancos de datos informatizados, con frecuencia los datos reflejados son insuficientes; las causas quedan a menudo sin identificar. En algunos casos, existen referencias que aportan documentación adicional pública microfilmada.
- Los datos a menudo no son extrapolables a instalaciones de diseños diferentes. Los accidentes producidos en el pasado han tenido en general respuestas en modificaciones o prácticas operativas más seguras que hacen que sea más difícil que se reproduzcan en condiciones similares.

2.1.1.6 *Ejemplos*

Se reseña a continuación un análisis histórico de accidentes con cloro realizado mediante el banco de accidentes italiano SONATA que reúne 2.500 casos registrados principalmente entre 1960 y 1988, con referencias a casos anteriores. Las fuentes de procedencia son públicas.

a) *Listado de accidentes:*

En el banco de accidentes de SONATA se encontraron 60 accidentes con cloro sobre un período de 1917 a 1986.

Se presenta una breve descripción de una *selección de 9 casos de los 60 accidentes recogidos* en total en el banco de accidentes SONATA.

- 1) Escape por una válvula de un vagón cisterna en una estación. Se derramaron 3 t de cloro durante 10 min. (SONATA 25).
- 2) Durante la descarga de un vagón cisterna la fuerza eléctrica falló dejando la planta a oscuras. Un trabajador, intentando cerrar la válvula, provocó la rotura de la tubería debido a un golpe accidental. Hubo 1 muerto y 60 heridos. (SONATA 28.)

2. Identificación de riesgos químicos

- 3) Durante la descarga de un vagón cisterna en una factoría de celulosa se rompió una tubería, provocando un escape de cloro. Hubo 62 heridos. (SONATA 96.)
- 4) Escape de cloro en una planta debido a un fallo mecánico. Entre los intoxicados había 2 obreros de la construcción que trabajaban en una ampliación de la planta y que tuvieron que recibir asistencia hospitalaria. Hubo un total de 141 heridos. (SONATA 1486.)
- 5) Escape de cloro de contenedores debido a un incendio en un almacén, en el que estuvieron involucradas otras sustancias químicas que estaban almacenadas en recipientes (ácido clorhídrico, glicerina, etc.). 500 personas tuvieron que ser evacuadas de sus casas, y 25 resultaron heridas. (SONATA 1514.)
- 6) Escape de cloro gas en una industria de proceso. Hubo 45 heridos. (SONATA 1599.)
- 7) Rotura de una línea de 25 mm. de diámetro que fue golpeada por un camión cisterna. Se derramó 1 t de cloro en el centro de un área edificada. Al menos 430 personas intoxicadas. La causa fue debida a un error humano. (SONATA 157.)
- 8) Explosión en una planta química que condujo a la liberación de cloro 10.000 personas evacuadas (habitantes locales). Hubo un total de 10 heridos. (SONATA 429.)
- 9) Escape de 2 t de cloro gas desde un tanque. La nube fue barrida por el viento hacia una factoría y hacia el pueblo. Las escuelas primarias fueron evacuadas. Hubo 75 heridos (SONATA 494.)

b) Clasificación de accidentes por tipo de actividad (60 accidentes)

Actividad	Porcentaje
Proceso	10
Almacenamiento.....	52
Carga y descarga	17
Transporte por tubería.....	20
Otras.....	1
Total	100

c) *Clasificación por tipo de accidente (60 accidentes)*

Tipo de accidente	Número de accidentes	Porcentaje
Rotura de depósito.....	9	15
Rotura de contenedor	6	10
Escape	33	55
Rotura de tubería.....	12	20
Total	60	100

d) *Clasificación por daños*

1) Víctimas mortales:

Porcentaje de accidentes de los que se poseen datos: 86 por 100

Muertos por accidente: 0,4 (1)

Número total de muertos: 149 (60 accidentes).

2) Heridos:

Porcentaje de accidentes de los que se poseen datos: 77 por 100

Heridos por accidente: 20 (2)

Número total de heridos: 2068 (60 accidentes).

3) Daños en dólares:

Porcentaje de accidentes de los que se poseen datos: 8 por 100

Costo medio: $1,7 \cdot 10^6$

Costo desde: $0,717 \cdot 10^6$ hasta: $5 \cdot 10^6$

(1) Para estimar la media no se han tenido en cuenta aquellos tres accidentes en los que se ha producido un número excepcional de víctimas como:

40 muertos de DE NOYA (USA) en 1925

68 muertos en ZARNESTI (RUMANIA) en 1939

19 muertos en RAUMA (FINLANDIA) en 1947.

(2) No se han considerado los accidentes en los que el número de heridos es superior o igual a cien y que acumulan un total de 1008 heridos.

2. Identificación de riesgos químicos

e) *Clasificación por cantidad implicada*

Porcentaje de accidentes de los que se poseen datos: 50 por 100
Cantidad desde 68 Kg hasta 95 t, en los 60 casos registrados.

f) *Comentario final*

Cabe destacar las características altamente tóxicas del cloro que obligan a evacuar amplias zonas habitadas en caso de escapes significativos. Es asimismo destacable el número de muertos y heridos, aunque los primeros se deben fundamentalmente a accidentes antiguos que no se han vuelto a repetir en épocas recientes, seguramente debido a la eficacia de las normativas específicas que sobre el producto han ido imponiendo los países.

2.1.2 **Check lists**

«*Check lists*» o listas de comprobación, son utilizadas usualmente para determinar la adecuación a un determinado procedimiento o reglamento. La primera referencia bibliográfica al método es de 1971, artículo publicado por Millar and Howard en la revista inglesa *Major Loss Prevention in Process Industries* (London Institution of Chemical Engineers).

2.1.2.1 *Descripción*

Son listas de fácil aplicación y pueden ser utilizadas en cualquier fase de un proyecto o modificación de una planta. Es una manera adecuada de evaluar el nivel mínimo aceptable de riesgo de un determinado proyecto; evaluación necesaria en cualquier trabajo independientemente de sus características.

Muchas organizaciones utilizan las listas de inspección estandarizadas para seguimiento y control de las diferentes fases de un proyecto.

2.1.2.2 *Ambito de aplicación*

Ya se ha mencionado que son aplicables a todas las fases de un proyecto, y poseen, además, la doble vertiente de comunicación entre miembros del proyecto y control del mismo.

A título recordatorio, podemos indicar su empleo en:

- diseño
- construcción
- puesta en marcha
- operación
- paradas.

El resultado de la aplicación de estas listas es la identificación de riesgos comunes y la adecuación a los procedimientos de referencia.

Los resultados son siempre cualitativos pero suelen limitarse al cumplimiento o no de las normas de referencia.

2.1.2.3 *Recursos necesarios*

Las listas de inspección deben ser preparadas por personas de gran experiencia.

Es necesario disponer de las normas o estándares de referencia, así como de un conocimiento del sistema o planta a analizar.

Pueden ser puestas en práctica por un titulado sin gran experiencia, aunque los resultados deben ser supervisados por alguien con experiencia.

2.1.2.4 *Soportes informáticos*

Cuando se debe aplicar esta técnica de forma reiterada, es usual que las empresas consultoras de seguridad tengan desarrollados formatos informatizados que cubran determinados procedimientos o reglamentos (ITC-MIE-APQ-001, Reglamento de Seguridad en Refinerías del Ministerio de Industria, etc.).

2.1.2.5 *Ventajas/Inconvenientes.*

Es un método que permite comprobar con detalle la adecuación de las instalaciones.

Constituye una buena base de partida para complementarlo con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior al cubierto por los reglamentos e instrucciones técnicas.

Es un método que examina la instalación solamente desde el punto de vista de cumplimiento de un reglamento o procedimiento determinado.

2. Identificación de riesgos químicos

2.1.2.6 Ejemplos.

Normalmente las listas de Inspección (*Check lists*) son puesta a punto por cada compañía en particular y para uso propio.

Existen diferentes manuales, normas y standares que facilitan o incluyen en sus disposiciones ejemplos de listas de inspección.

Se indica a continuación un breve ejemplo de un «check list» pensando en un diseño final de un proceso, contemplando las etapas apuntadas en el apartado 2.1.2.2 de esta Guía.

a) *Diseño:*

- **SUSTANCIAS:** Ver los aspectos característicos de todas las sustancias presentes en el proceso (materias primas, intermedias, catalizadores, productos finales):
 - Inflamabilidad
 - Explosividad
 - Toxicidad
 - Corrosividad y compatibilidad
 - Vertidos
 - Almacenamientos
 - Electricidad estática (conductividad, facilidad de acumulación)
 - Reactividad
- **EQUIPOS:** Revisar el diagrama de flujo y las listas de equipos para identificar los riesgos asociados a cada componente:
 - Especificaciones de diseño (coeficientes de seguridad, temperatura, presión, flujo, nivel y otras variables de proceso).
 - Alivios de presión.
 - Distribución en planta.
 - Equipos eléctricos.
- **PROCEDIMIENTOS:** Durante el diseño deben revisarse los procedimientos para puesta en marcha, parada y emergencia:
 - Reacción de los operadores de planta y de los sistemas de instrumentación y control ante incendios, explosiones, fugas tóxicas, fallos de alimentación eléctrica, fallos de refrigeración, fallos de vapor, fallos de instrumentación, fallos de gas inerte, etc.

-
- Posibles «by pass» de los enclavamientos durante la puesta en marcha o las paradas.
 - Situación frente a grandes desastres naturales.
 - Análisis de posibles efectos sinérgicos, efecto dominó, ...

b) *Construcción*

Deben revisarse las posibles ingerencias durante la construcción con instalaciones adyacentes.

c) *Puesta en marcha*

Deben extremarse los cuidados en esta fase crítica, que requiere toda la atención para evitar errores:

- Sustancias, incluyendo las que estén fuera de especificación.
- Equipos (purgas de aire, bridas ciegas, posición de válvulas, identificación de piezas, instrumentación, paneles de control, señalización, alarma).
- Procedimientos (preparación previa, formación, emergencia).

d) *Operación*

Cuando una planta se opera durante un cierto tiempo, existe la tendencia a olvidarse de los riesgos. Debe cuidarse el mantener al día la atención para la identificación y minimización de riesgos:

- **SUSTANCIAS:** Verificando que sigan cumpliéndose aspectos fundamentales como:
 - Recepción de todas las partidas según especificaciones.
 - Características de peligrosidad.
 - Sistema de seguridad y contraincendios adecuados y operativos.
- **EQUIPOS:**
 - Inspecciones según previsiones iniciales.
 - Sistemas de alivio de presión.
 - Pruebas de los sistemas de seguridad y enclavamientos
 - Recambios adecuados y disponibles.

2. Identificación de riesgos químicos

- PROCEDIMIENTOS:
 - Puesta al día de todos ellos.
 - Seguimiento por los operadores.
 - Formación del personal nuevo.
 - Comunicación de cambios.
 - Permisos de trabajos.
 - Medidas de seguridad para reparaciones, subcontratistas, etc.

e) *Paradas*

Esta fase frecuentemente se omite y, sin embargo, pueden provocarse serios peligros si no se presta la debida atención:

- SUSTANCIAS:
 - Inventario de sustancias a ser evacuadas.
 - Purgas o barridos con inertes.
- EQUIPOS:
 - Eliminación de sustancias en su interior, incluyendo tuberías.
 - Colocación de barreras ciegas en los puntos adecuados.
- PROCEDIMIENTOS: Comunicación del procedimiento de parada al personal concernido.
- GESTIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS O CONTAMINANTES

2.1.3 **Análisis preliminar de riesgos**

Bajo el nombre inglés de *Preliminary Hazard Analysis* (PHA) este método fue desarrollado inicialmente por las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos de América e incorporado posteriormente bajo diferentes nombres por algunas compañías químicas.

2.1.3.1 *Descripción.*

El Análisis Preliminar de Riesgos (**APR en adelante**) fue el precursor de otros métodos de análisis más complejos y es utilizado únicamente en la fase de desarrollo de las instalaciones y para casos en los que no existen experiencias anteriores, sea del proceso, sea del tipo de implantación.

El APR selecciona los productos peligrosos y los equipos principales de la planta.

El APR se puede considerar como una revisión de los puntos en los que pueda ser liberada energía de una forma incontrolada.

Fundamentalmente, consiste en formular una lista de estos puntos con los peligros ligados a:

- Materias primas, productos intermedio o finales y su reactividad.
- Equipos de planta.
- Límites entre componentes de los sistemas.
- Entorno de los procesos.
- Operaciones (pruebas, mantenimiento, puesta en marcha, paradas, etc.).
- Instalaciones.
- Equipos de seguridad.

Los resultados de este análisis incluyen recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros. Estos resultados son siempre cualitativos, sin ningún tipo de priorización.

2.1.3.2 *Ambito de aplicación*

Se utiliza preferentemente para la identificación de riesgos en la fase de diseño previo de nuevas instalaciones para prever los principales y profundizar en el resto de riesgos en el diseño final.

2.1.3.3 *Recursos necesarios*

Debe disponerse de los criterios básicos de diseño de la planta, especificaciones básicas de equipos principales y especificaciones de materiales.

Este método puede ser desarrollado por uno o dos técnicos con conocimientos y experiencias en seguridad. En algunos casos, puede ser aplicado por personal con relativamente poca experiencia.

Con todo lo comentado hasta aquí, está claro que el esfuerzo necesario para el desarrollo de un APR es mucho menor que otros métodos de mayor complejidad que se comentarán más adelante.

2. Identificación de riesgos químicos

2.1.3.4 Soportes informáticos

Normalmente no se utiliza un soporte informático en la realización de esta técnica.

2.1.3.5 Ventajas/Inconvenientes

Es un método que requiere relativamente poca inversión en su realización, por lo que es adecuado para examinar los proyectos de modificaciones o plantas nuevas en una etapa inicial.

En instalaciones existentes no es un método adecuado para entrar en el detalle de los riesgos asociados a las mismas.

2.1.3.6 Ejemplos

Para realizar un APR deben cubrirse las siguientes etapas:

- Recogida de la información necesaria
- Realización del APR propiamente dicho
- Informe de resultados.

Estas etapas consisten en:

a) Información necesaria:

Debe recogerse la información existente en relación con la nueva planta, incluyendo aquella referente a instalaciones semejantes o en plantas con otros procesos pero con equipos o materiales semejantes.

Son informaciones básicas las del propio proceso, así como las referentes a los equipos principales, y las del entorno en el que la planta será operada.

Son fundamentales las informaciones en relación con anteriores procesos, y otras plantas semejantes.

b) Realización del APR:

El objetivo principal del APR es identificar los peligros, los sucesos iniciadores y otros sucesos que provoquen consecuencias indeseables. Pueden identificarse, asimismo, criterios de diseño o alternativas que contribuyan a eliminar o reducir estos peligros o riesgos.

Deben considerarse los siguientes puntos:

- Equipos y materiales peligrosos (combustibles, sustancias altamente reactivas, tóxicas, sistemas de alta presión, etc.)
- Interrelaciones peligrosas entre equipos y sustancias (iniciación y propagación de fuegos y explosiones, sistemas de control y paro)
- Factores ambientales (vibraciones, humedad, temperaturas externas, descargas eléctricas)
- Procedimientos de operación, pruebas, mantenimiento y emergencias (errores humanos, distribución de equipos, accesibilidad, protección personal)
- Instalaciones (almacenamientos, equipos de pruebas, formación)
- Equipos de seguridad (sistemas de protección, redundancias, sistemas contra incendios, equipos de protección personal).

c) Informe de los resultados.

Los resultados del APR deben ser registrados adecuadamente de forma que se vea claramente los peligros identificados, la causa, la consecuencia potencial, y las diferentes medidas preventivas o correctivas.

A título de ejemplo se incluye una parte de un APR de un posible almacenamiento de sulfuro de hidrógeno (H₂S) para utilización en proceso:

<i>Riesgo</i>	<i>Causa</i>	<i>Consecuencia</i>	<i>Medidas preventivas o correctivas</i>
Fuga tóxica	1) Pérdida en cilindro de almacenamiento.	Peligro de muerte si la fuga es importante.	a) Colocar sistemas de detección y alerta. b) Minimizar la cantidad almacenada. c) Desarrollar un procedimiento de inspección de los cilindros.

2. Identificación de riesgos químicos

2.1.4 Análisis «What if ...?» (¿Qué pasa si ...?)

La traducción literal de este nombre podría ser «¿Qué pasa si ...?»; es un método de análisis que no es tan estructurado como otros (HAZOP -*Hazard Operability Study*-, descrito en el apartado 2.1.5 de esta Guía o FMEA -*Failure Mode Effects Analysis*-, descrito en el apartado 2.1.6 de esta Guía, y necesita la adaptación por parte del usuario al caso particular que se pretende analizar.

Como su nombre sugiere, consiste en cuestionarse el resultado de la presencia de sucesos indeseados que pueden provocar consecuencias adversas.

2.1.4.1 Descripción

El método exige el planteamiento de las posibles desviaciones desde el diseño, construcción, modificaciones de operación de una determinada instalación.

Evidentemente, requiere un conocimiento básico del sistema y la disposición mental para combinar o sintetizar las desviaciones posibles ya comentadas, por lo que normalmente es necesaria la presencia de personal con amplia experiencia para poder llevarlo a cabo.

2.1.4.2 Ambito de aplicación

El método tiene un ámbito de aplicación amplio ya que depende del planteamiento de las preguntas que pueden ser relativas a cualquiera de las áreas que se proponga la investigación como: seguridad eléctrica, protección contra incendios, seguridad personal, etc.

Las preguntas se formulan en función de la experiencia previa y se aplican, tanto a proyectos de instalación, como a plantas en operación, siendo muy común su aplicación ante cambios propuestos en instalaciones existentes.

2.1.4.3 Recursos necesarios

Normalmente las cuestiones se formulan por un equipo de dos o tres personas especialistas en las áreas apuntadas en el apartado anterior, los cuales necesitan documentación detallada de la planta, del proceso, de los procedimientos y posibles entrevistas con personal de operación.

El resultado del trabajo será un listado de posibles escenarios incidentales, sus consecuencias y las posibles soluciones para la reducción del riesgo.

2.1.4.4 Soportes informáticos

Normalmente no se utiliza un soporte informático en la aplicación de esta técnica.

2.1.4.5 Ventajas/Inconvenientes

Es un método menos estructurado que el HAZOP y FMEA, ver apartados 2.1.5 y 2.1.6 de esta Guía, por lo que su aplicación es más sencilla, sin embargo su exhaustividad depende más del conocimiento y experiencia del personal que lo aplica.

2.1.4.6 Ejemplos

Normalmente el equipo de trabajo empieza sus preguntas en el comienzo del proceso y las prosigue a lo largo del mismo. En ocasiones el método puede centrarse en determinadas consecuencias específicas (seguridad personal, por ejemplo).

Se van anotando sucesivamente todas las preguntas, y respuestas, incluyendo peligros, consecuencias y soluciones. El estudio se contempla recopilando los comentarios de todos los equipos y revisando las recomendaciones por parte del nivel adecuado de gerencia.

Las etapas fundamentales de un análisis *What If* son:

- Definición del alcance del estudio.
- Recogida de la información necesaria.
- Definición de los equipos.
- Desarrollo de las cuestiones.
- Informe de resultados.

Las características básicas de cada etapa son las siguientes:

a) Definición del alcance del estudio:

Existen dos alcances básicos en un análisis *What If*: las condiciones físicas del sistema investigado y la categoría de las consecuencias del mismo.

Debe definirse en primer lugar la categoría de las consecuencias (para el público, para los trabajadores de la planta o económicas), siendo que, a su vez, estas categorías pueden subdividirse en otras menores. Una vez definidas estas categorías, puede definirse el alcance físico del estudio, incluyendo posibles interacciones entre diferentes partes de la planta.

2. Identificación de riesgos químicos

b) Recogida de la información necesaria:

Es necesaria que toda la información requerida se encuentre disponible al inicio del trabajo para poder desarrollarlo sin interrupciones. Un resumen típico de la información requerida se muestra a continuación.

I. Diagramas de Flujo:

1. Condiciones de operación:

- Sustancias utilizadas, con características físicas.
- Química y termodinámica del proceso.

2. Descripción de los equipos.

II. Implantación de los equipos (*Plot Plan*).

III. Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID):

1. Controles:

- Sistemas de control en continuo.
- Alarmas y sus funciones.

2. Instrumentación.

- Cuadros.
- Indicadores.
- Monitores.

IV. Operaciones:

1. Responsabilidades y obligaciones del personal.

2. Sistemas de comunicación.

3. Procedimientos:

- Mantenimiento preventivo.
- Permisos de trabajo en caliente.
- Entradas en recipientes.
- Emergencia.

La última parte de la recogida de la información es la preparación de las preguntas. En este aspecto, otros métodos como las Listas de Inspección o *Check List* o el HAZOP (ver apartados 2.1.2 y 2.1.5, respectivamente de esta Guía) pueden sugerir ideas para el desarrollo de las preguntas.

c) Definición del equipo de trabajo:

Para cada área específica deben definirse equipos de dos o tres personas. Cada equipo debe poseer:

- Experiencia en las consecuencias a analizar.
- Conocimientos de la planta o el proceso.
- Experiencias en técnicas de evaluación de riesgos.

El equipo debe ser multidisciplinar e incluir puntos de vista de producción, fabricación, mantenimiento, ingeniería y seguridad.

d) Desarrollo del cuestionario:

La revisión empieza con una explicación básica del proceso, utilizando la información disponible de la planta, por parte del mejor conocedor del sistema.

Los equipos no es necesario que trabajen aislados, sino que es conveniente que intercambien cuestiones para asegurar el buen camino del proceso. Es conveniente que trabajen en días alternos y con una dedicación diaria de cuatro a seis horas como máximo.

El equipo va formulando las preguntas desde el inicio del proceso y va respondiendo las mismas y, eventualmente, añadiendo nuevas cuestiones; y va identificando los peligros, las posibles consecuencias y las soluciones.

Se considera, como ejemplo simplificado, un proceso de fabricación en continuo de fosfato diamónico (PAD) por reacción de ácido fosfórico con amoníaco. El PAD es inocuo. Si se reduce la proporción de fosfórico, la reacción no se completa y se desprende amoníaco. Si se reduce el amoníaco, se obtiene un producto seguro pero indeseable.

Se destina un equipo a investigar los peligros de la reacción para las personas.

Las cuestiones planteadas por *What If ...?* son las siguientes:

¿Qué ocurre si ...?:

- ¿Se suministra un producto de mala calidad en vez de ácido fosfórico?
- ¿La concentración de fosfórico no es correcta?
- ¿El fosfórico está contaminado?
- ¿No llega fosfórico al reactor?

2. Identificación de riesgos químicos

- ¿Se suministra al reactor una proporción de amoníaco demasiado elevada?
- ¿Se detiene la agitación del reactor?
- ¿Se cierra la descarga del reactor?

Para la primera cuestión, se analizarían las sustancias presentes en la planta o disponibles por el suministrador de ácido fosfórico que pudieran ser incompatibles con el amoníaco, provocando daños en las personas. Deberá asegurarse un sistema de preidentificación de estos posibles productos para evitar su introducción en el tanque de ácido fosfórico. Así continúan las respuestas en todo el proceso.

e) Resultados:

Como en otros estudios, la presentación de los resultados es básica para garantizar una aplicación correcta de las conclusiones.

Estas deberán ser revisadas por el director de planta para garantizar que las conclusiones son transmitidas a cada uno de los responsables por las diferentes actuaciones.

A continuación se adjunta un ejemplo de presentación de resultados, para el ejemplo anterior.

¿Qué ocurre si...?	Consecuencia	Recomendaciones
...¿se suministra producto de mala calidad?	No identificada.	-
...¿la concentración de fosfórico es incorrecta?	No se consume todo el amoníaco y hay una fuga en la zona de reacción.	Verificar la concentración del fosfórico antes de la operación.
...¿el fosfórico está contaminado?	No identificada.	-
...¿no llega fosfórico al reactor?	El amoníaco no reacciona. Fuga en la zona de reacción.	Alarma/corte del amoníaco por señal de falta de flujo en la línea de fosfórico al reactor.
...¿demasiado amoníaco en el reactor?	Exceso de amoníaco. Fuga en la zona de reacción.	Alarma/corte del amoníaco por señal de falta de flujo en la línea de fosfórico al reactor.

2.1.5 Análisis funcional de operatividad (HAZOP)

2.1.5.1 Descripción

El método nació en 1963 en la compañía ICI (*Imperial Chemical Industries*), en una época en que se aplicaba en otras áreas las técnicas de análisis crítico. Estas técnicas consistían en un análisis sistematizado de un problema a través del planteamiento y respuestas a una serie de preguntas (¿cómo?, ¿cuándo?, ¿por qué? ¿quién?, etc.). La aplicación de estas técnicas al diseño de una planta química nueva puso de manifiesto una serie de puntos débiles del diseño.

El método se formalizó posteriormente y ha sido hasta ahora ampliamente utilizado en el campo químico como una técnica particularmente apropiada a la identificación de riesgos en un instalación industrial.

El HAZOP o AFO (Análisis Funcional de Operatividad) es una técnica de identificación de riesgos inductiva basada en la premisa de que los accidentes se producen como consecuencia de una desviación de las variables de proceso con respecto de los parámetros normales de operación. La característica principal del método es que es realizado por un equipo pluridisciplinario de trabajo (ver apartado 2.1.5.3 de esta Guía).

La técnica consiste en analizar sistemáticamente las causas y las consecuencias de unas desviaciones de las variables de proceso, planteadas a través de unas «palabras guías».

1. Definición del área de estudio

La primera fase del estudio HAZOP consiste en delimitar las áreas a las cuales se aplica la técnica. En una instalación de proceso, considerada como el sistema objeto de estudio, se definirán para mayor comodidad una serie de subsistemas o unidades que corresponden a entidades funcionales propias, como por ejemplo: preparación de materias primas, reacción, separación de disolventes...

2. Definición de los nudos

En cada subsistema se identificarán una serie de nudos o puntos claramente localizados en el proceso. Unos ejemplos de nudos pueden ser: tubería de alimentación de una materia prima un reactor aguas arriba de una válvula reductora, impulsión de una bomba, superficie de un depósito,... Cada nudo será numerado correlativamente dentro de cada subsistema y en el sentido de proceso para mayor comodidad. La técnica HAZOP se aplica a cada uno de estos puntos. Cada

2. Identificación de riesgos químicos

nudo vendrá caracterizado por unos valores determinados de las variables de proceso: presión, temperatura, caudal, nivel, composición, viscosidad, estado, ...

Los criterios para seleccionar los nudos tomarán básicamente en consideración los puntos del proceso en los cuales se produzca una variación significativa de alguna de las variables de proceso.

Es conveniente, a efectos de la reproducibilidad de los estudios reflejar en unos esquemas simplificados (o en los propios diagramas de tuberías e instrumentación), los subsistemas considerados y la posición exacta de cada nudo y su numeración en cada subsistema.

Es de notar que por su amplio uso la técnica tiene variantes en cuanto a su utilización que se consideran igualmente válidas. Entre estas destacan, por ejemplo, la sustitución del concepto de nudo por el de tramo de tubería o la identificación nudo-equipos.

3. Definición de las desviaciones a estudiar:

Para cada nudo se planteará de forma sistemática las desviaciones de las variables de proceso aplicando a cada variable una palabra guía. En la tabla 2.2, se indican las principales palabras guía y su significado.

El HAZOP puede consistir en una aplicación exhaustiva de todas las combinaciones posibles entre palabra guía y variable de proceso, descartándose durante la sesión las desviaciones que no tengan sentido para un nudo determinado. Alternativamente, se puede fijar a priori en una fase previa de preparación del HAZOP la lista de las desviaciones esenciales a estudiar en cada nudo. En el primer caso se garantiza la exhaustividad del método, mientras que en el segundo el estudio «más dirigido» puede resultar menos laborioso.

4. Sesiones HAZOP:

Las sesiones HAZOP tienen como objetivo inmediato analizar las desviaciones planteadas de forma ordenada y siguiendo un formato de recogida similar al propuesto en la figura 2.1. En la tabla 2.3 se describe el contenido de cada una de las columnas.

El documento de trabajo principal utilizado en las sesiones son los diagramas de tuberías e instrumentación aunque puedan ser necesarias consultas a otros documentos: diagramas de flujo o *flow sheet*, manuales de operación, especificaciones técnicas, etc.

TABLA 2.2 PALABRAS GUIAS DEL HAZOP

Palabra guía	Significado	Aplicación	Observaciones
No.	Se plantea para estudiar la ausencia de la variable a la cual se aplica.	Caudal. Nivel (vaciado de un equipo).	
Inverso.	Analiza la inversión en el sentido de la variable.	Caudal.	Esta variable en algunos casos se omite y su efecto se contempla en la anterior.
Más.	Se plantea para estudiar un aumento cuantitativo de la variable.	Temperatura. Presión. Caudal (composición constante). Nivel.	
Menos.	Se plantea para estudiar una disminución cuantitativa de la variable.	Idem.	
Más cualitativo.	Estudia el aumento o presencia de un componente en una mezcla.	Caudal (mayor cantidad de un producto en una mezcla, presencia de impurezas).	
Menos cualitativo.	Estudia la reducción de un componente en una mezcla.	Caudal (menor cantidad de un producto en una mezcla, alta de un componente).	Ambos términos corresponden a los originales <i>Part of</i> . Cambio de composición. <i>More than</i> : Más componentes presentes en el sistema (vapor, sólidos, impurezas).
Otro.	Estudia el cambio completo en la variable.	Caudal (cambio completo de producto). Estado.	El término original (<i>other than</i>) se aplica a cambios respecto de la operación normal (mantenimiento, cambio, catalizador...).

Para plantas de proceso discontinuo al ser secuencial el proceso el planteamiento difiere y la reflexión tiene que llevarse a cabo para cada paso del proceso. El formato de recogida es el señalado en la figura 2.2.

Es de notar en este último caso que el método no es tan apropiado.

Las sesiones son llevadas a cabo por un equipo de trabajo cuya composición se describe con detalle en el apartado 2.1.5.3 de esta Guía.

5. Informe final

El informe final de un HAZOP constará de los siguientes documentos:

- Esquemas simplificados con la situación y numeración de los nudos de cada subsistema.

2. Identificación de riesgos químicos

- Formatos de recogida de las sesiones con indicación de las fechas de realización y composición del equipo de trabajo.
- Análisis de los resultados obtenidos. Se puede llevar a cabo una clasificación cualitativa de las consecuencias identificadas.
- Lista de las medidas a tomar obtenidas. Constituyen una lista preliminar que debería ser debidamente estudiada en función de otros criterios (impacto sobre el resto de la instalación, mejor solución técnica, coste, etc.) y cuando se disponga de más elementos de decisión (frecuencia del suceso y sus consecuencias).
- Lista de los sucesos iniciadores identificados.

2.1.5.2 Ambito de aplicación.

El método encuentra su utilidad principalmente en instalaciones de proceso de relativa complejidad o en áreas de almacenamiento con equipos de regulación o diversidad de tipos de trasiego.

Es particularmente provechosa su aplicación en plantas nuevas porque puede poner de manifiesto fallos de diseño, construcción, etc. que han podido pasar desapercibidos en la fase de concepción. Por otra parte las modificaciones que puedan surgir del estudio pueden ser más fácilmente incorporadas al diseño.

TABLA 2.3 CONTENIDO DE LAS COLUMNAS DEL FORMATO HAZOP

Columna	Contenido
Causas	Describe numerándolas las distintas causas que pueden conducir a la desviación.
Consecuencias	Para cada una de las causas planteadas, se indican con la consiguiente correspondencia en la numeración las consecuencias asociadas.
Respuesta del sistema	Se indicará en este caso: 1. Los mecanismos de detección de la desviación planteada según causas o consecuencias (p.ej.: alarmas). 2. Los automatismos capaces de responder a la desviación planteada según causas (p.ej.: lazo de control).
Acciones a tomar	Propuesta preliminar de modificaciones a la instalación en vista a la gravedad de la consecuencia identificada o a una desprotección flagrante de la instalación.
Comentarios	Observaciones que complementan o apoyan algunos de los elementos reflejados en las anteriores columnas.

2. Identificación de riesgos químicos

Aunque el método esté enfocado básicamente a identificar sucesos iniciadores relativos a la operación de la instalación, por su propia esencia, también puede ser utilizado para sucesos iniciadores externos a la misma.

2.1.5.3 Recursos necesarios

La característica principal de la técnica es que se realiza en equipo en sesiones de trabajo dirigidas por un coordinador. El equipo de trabajo debería de estar compuesto, como mínimo, por:

- Responsable de proceso
- Responsable de la operación de la planta
- Responsable de seguridad
- Responsable del mantenimiento
- Coordinador

Adicionalmente se puede recurrir a consultas puntuales a técnicos de otras áreas como instrumentación, laboratorio, etc. En una planta en fase de diseño se completará el equipo con un responsable del diseño, uno de proyecto y el futuro responsable de la puesta en marcha.

Las personas que toman parte en las sesiones deberán de ser personas:

- Muy conocedoras de la planta y expertas en su campo.
- Dispuestas a participar activamente.

No es necesario que tengan un conocimiento previo del método en sí.

Una de las personas que formen parte del equipo de trabajo tendrá encomendada la labor de transcripción de las sesiones de forma precisa y lo más completa posible. Deberá tener capacidad de síntesis y un buen conocimiento tanto de la instalación como del método.

Destaca en el método el papel del *coordinador* quien conduce las sesiones. Deberá de ser una persona:

- Relativamente «objetiva».
- Con un buen conocimiento del método.
- Con amplia experiencia industrial.
- Con capacidad de organización (debe potenciar la participación de todos los presentes, cortar disquisiciones improductivas, estimular la

imaginación, favorecer un ambiente de colaboración y competencia «sanos», etc.).

En promedio se podría evaluar en tres horas el tiempo de dedicación necesario para cada nudo a estudiar repartidas en partes iguales en:

- Preparación
- Sesión
- Revisión y análisis de resultados

siendo las actividades primera y última las realizadas por el coordinador.

2.1.5.4 *Soportes informáticos.*

Existen algunos códigos informáticos que permiten registrar las sesiones de HAZOP de forma directa. Entre ellos se puede citar: el código desarrollado por la compañía Dupont de Nemours, HAZSEC (compañía Technica), HAZTRAC (Technica), HAZOP (compañía ITSEMAP), etc. Guían al técnico durante las sesiones y permiten en general una posterior agrupación y clasificación de las recomendaciones surgidas en el estudio.

2.1.5.5 *Ventajas/Inconvenientes.*

Además de cubrir los objetivos para los cuales se utiliza el método, se pueden destacar, entre otras, las siguientes ventajas adicionales al método:

1. Ocasión perfecta y quizás «única» para contrastar distintos puntos de vista de una planta.
2. Es una técnica sistemática que puede crear desde el punto de vista de seguridad hábitos metodológicos útiles.
3. El coordinador mejora su conocimiento del proceso.
4. No requiere prácticamente recursos a exclusión del tiempo de dedicación, etc.

Como inconvenientes se podrían citar también:

1. Es una técnica cualitativa. No hay una valoración real de la frecuencia de las causas que producen una consecuencia grave ni tampoco del alcance de la misma.
2. Las modificaciones a la planta surgidas del HAZOP deben analizarse con mayor detalle y otros criterios (económicos, etc.).
3. Los resultados obtenidos son muy dependientes de la calidad del equipo.

2. Identificación de riesgos químicos

4. Es muy dependiente de la información disponible. Puede omitirse un riesgo si los datos de partida son erróneos o incompletos.

2.1.5.6 Ejemplos

EJEMPLO 1

En la figura 2.3 se reseña un esquema simplificado de una línea de fabricación de un producto intermedio en una instalación de producción de productos farmacéuticos. El proceso es de tipo *batch* (discontinuo) y el subsistema de HAZOP considerado abarca toda la línea hasta la obtención del producto final.

Se consideran cuatro nudos: el discontinuo nudo 1 corresponde al reactor de media caña **R-1** donde se realiza la cloración de un producto sólido molido, obtenido en otra línea de fabricación, con pentacloruro de fósforo. El nudo 2 corresponde al reactor **R-2** donde ocurre la hidrólisis del producto descargado del reactor R-1. En la centrífuga **C-1**, nudo 3, se escurre el producto.

Por último, el nudo 4 está situado en la torre de lavado, una columna de vidrio de absorción de gases con ventilador en cabeza y que neutraliza los gases con una disolución de hidróxido sódico regulada por un medidor de pH automático.

La secuencia del proceso consiste en:

En R1:

- Cloración del oxiclорuro de fósforo para producir pentacloruro de fósforo. Se desprende ácido clorhídrico durante esta fase. Los gases son neutralizados en la torre de lavado.
- Cloración del producto sólido con pentacloruro de fósforo.
- Destilación del tricloruro de fósforo.
- Descarga lenta a R2.

En R2:

- Hidrólisis del producto obtenido con adición de hielo.
- Descarga a C1.

En C1:

- Centrifugado del producto para eliminación del agua.

En la tabla 2.4 se recoge el HAZOP correspondiente al nudo 1 y que refleja las operaciones asociadas al reactor: acondicionamiento al principio del batch y carga con bombeo del oxiclорuro desde el depósito de almacenamiento.

FIGURA 2.3 METODO HAZOP. EJEMPLO DE PROCESO BATCH (DISCONTINUO)

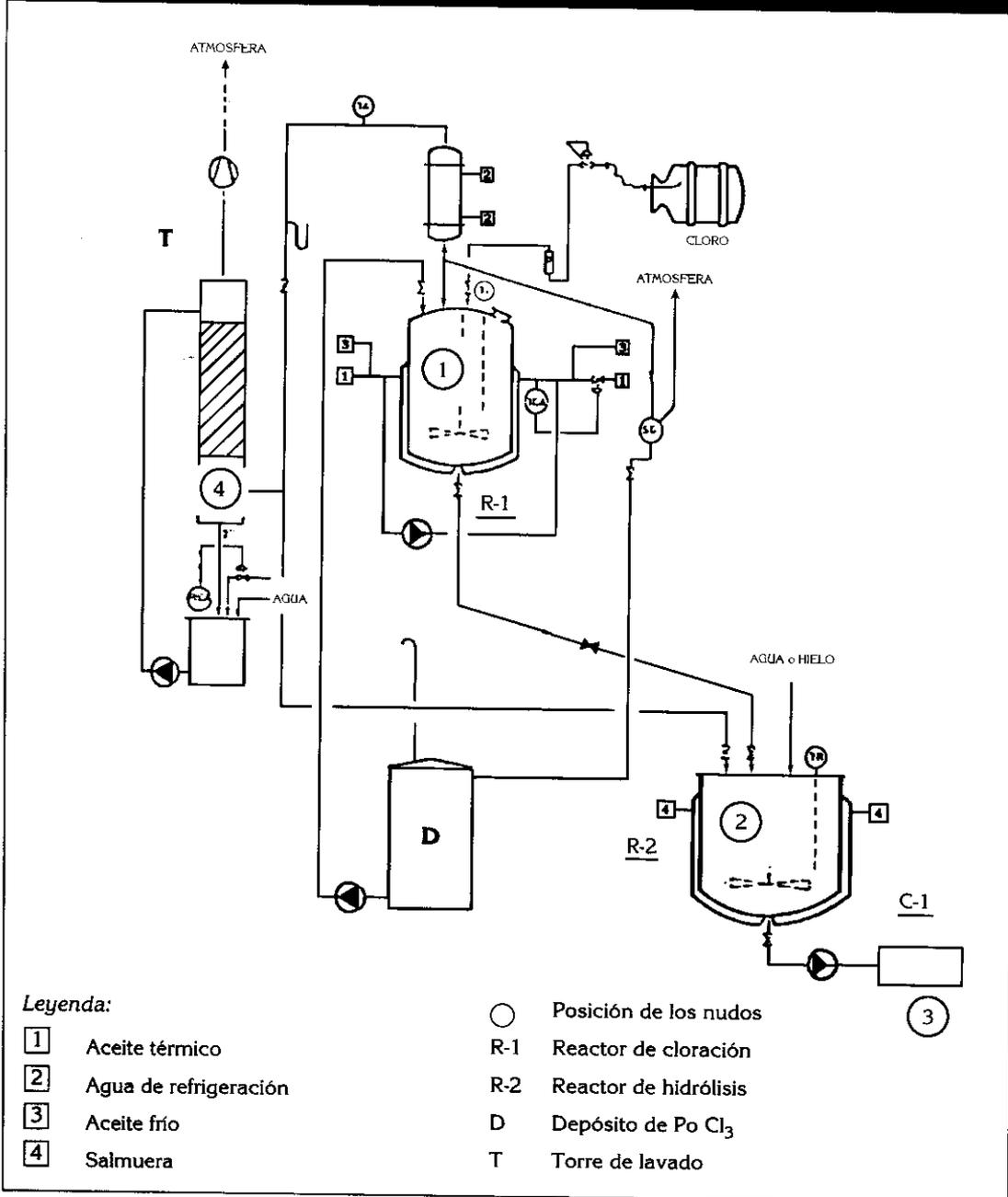


TABLA 2.4 METODO HAZOP. EJEMPLO DE PROCESO DISCONTINUO

Planta:		Proceso		Preparación)					
Subsistema: 1		(Línea							
Nudo	Operación	Palabra guía	Desviación de la variable	Posibles causas	Consecuencias	Señalización	Acción requerida	Observaciones	
1	1. Acondicionar reactor a) Lavado	NO	No lavado	1. Fallo operador (omisión)	Restos batch anterior (no pasa nada)	Comprobar visualmente (anotación)		Antes de empezar el siguiente batch comprobar visualmente el reactor	
		OTRO	Lavado con otro fluido	1. Fallo operador	Según la naturaleza del producto			Comprobar la correcta señalización de las mangueras	
		MENOS	Menos lavado	Idem NO	Idem NO	Idem NO	Idem NO	Idem NO	Idem NO
	b) Secado	NO	No secado	1. Fallo humano	1. Fallo humano	1. Descomposición del $POCl_3$ (volante)	Comprobar visualmente		Incluido en la hoja de control
		MENOS	Menos secado	1. Pasar menos aceite caliente	1. Pasar menos aceite caliente				
		NO	No se carga	1. Fallo humano 2. Depósito vedado 3. Bomba parada 4. Tubería totalmente obstruida 5. Fuga por tubería	1. Fallo humano 2. Depósito vedado 3. Bomba parada 4. Tubería totalmente obstruida 5. Fuga por tubería	4. Recalentamiento bomba 5. Desprendimiento de vapores de ácido clorhídrico			Alarma bajo nivel en depósito $POCl_3$
			MENOS	Menos $POCl_3$	1. Error humano en medida nivel 2. Fuga parcial del producto al exterior 3. Falta nivel en depósito	2. Desprendimiento vapores tóxicos Masa de reacción más viscosa			Instalación contenedores, con preselección de cantidad
			MAS	Más $POCl_3$	1. Error medida nivel 2. Repetición operación carga	Posible sobrellenado reactor			Instalar registro de nivel en el reactor

2. Identificación de riesgos químicos

EJEMPLO 2

En la figura 2.4 se reseña un esquema simplificado de una parte de planta de proceso continuo de fabricación de nitrato amónico. El subsistema considerado es el de reacción en el que se produce la reacción entre el amoníaco gas y el ácido nítrico.

Los nudos considerados son los reseñados en el esquema:

- Nudo 1, alimentación al reactor de amoníaco
- Nudo 2, alimentación al reactor de ácido nítrico
- Nudo 3, suministro de ácido sulfúrico (un aditivo)
- Nudo 4, reactor en línea
- Nudo 5, separador

En la tabla 2.5 se reseña el HAZOP correspondiente al nudo 1 de alimentación de amoníaco gas al reactor.

El esquema representa básicamente:

- Las tres tuberías de alimentación al reactor: dos líneas de amoníaco de distinta procedencia, una de ácido nítrico y la correspondiente al ácido sulfúrico (un aditivo). El amoníaco gas es calentado a través de un intercambiador de calor de doble tubos con vapor.
- Un reactor en línea en el cual se produce la reacción fuertemente exotérmica entre el amoníaco gas y el ácido nítrico.
- La cámara donde se produce la separación entre los vapores residuales y el nitrato amónico producido y, por último el tanque de alimentación de nitrato amónico al área de tratamiento correspondiente.

2. Identificación de riesgos químicos

FIGURA 2.4 METODO HAZOP. EJEMPLO: ESQUEMA DEL SISTEMA CONTINUO

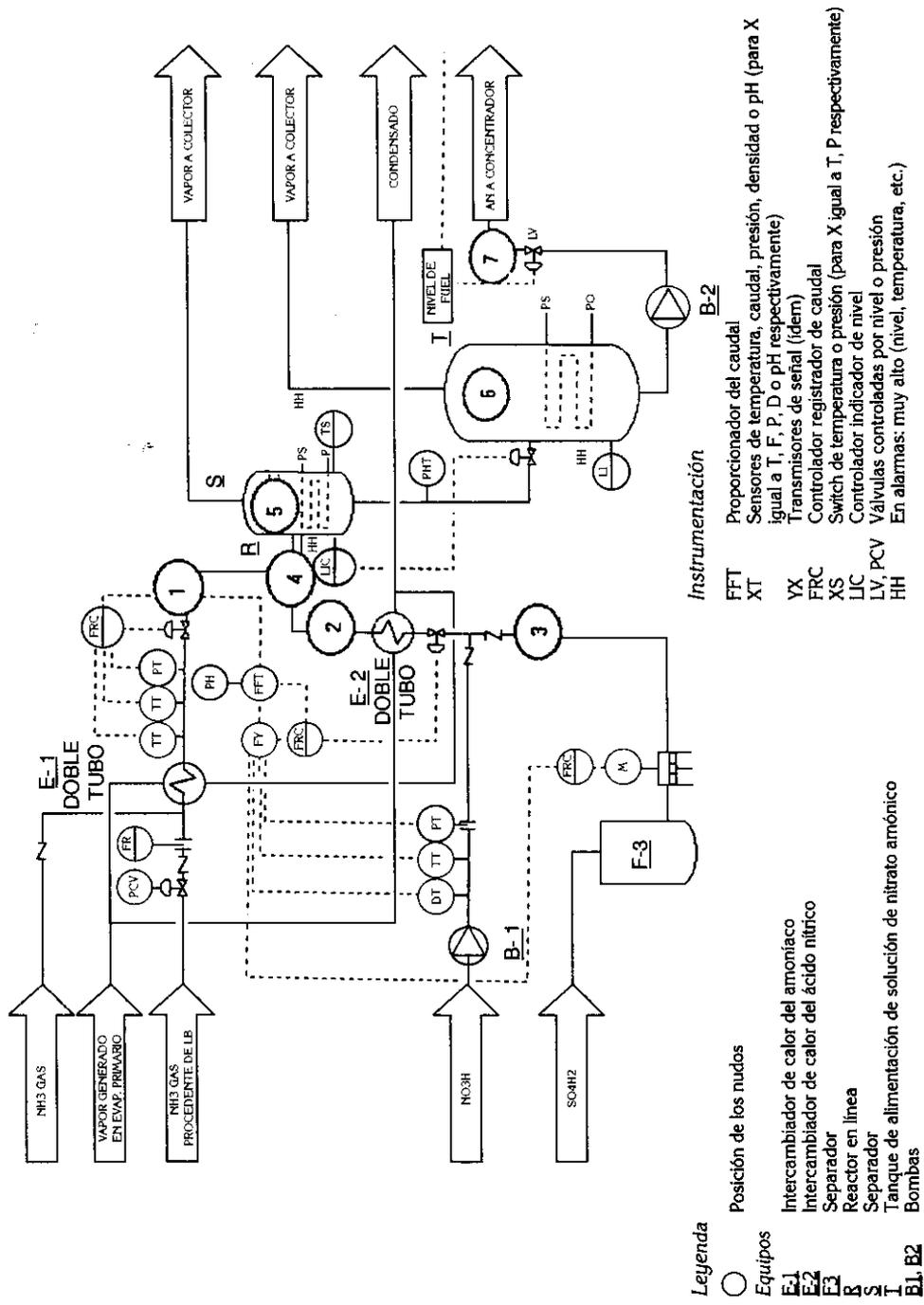


TABLA 2.5 METODO HAZOP. EJEMPLO DE PROCESO CONTINIO

Niudo	Palabra guía	Desviación	Posibles causas	Consecuencias	Respuesta control	Señalización	Acciones a tomar	Comentarios
1	Más	Caudal de NH ₃	1. Fallo lazo control FRC-1	1. NH ₃ en exceso en el producto (licor) NH ₃ en línea de vapor de proceso (contaminación de vapor)	FRC-1 abre la válvula FV-2 de NH ₃ pH-C-1 actúa sobre FRC-1	FR-2, FR-1, PHR-1	- Alarmas de mínimo y máximo pH (4-5) de pH - Instalar alarma de alto caudal - Alarma en proporcionalador FFV-2	
	Menos	Caudal de NH ₃	1. Fuga en tubería 2. Línea parcialmente obstruida 3. Rotura de tubos E-104 4. Fallo lazo FV-1 5. Evaporador (E-2y E-3) en funcionamiento no opera correctamente 6. Fallo válvula retención (quede medio cerrada)	1. Riesgo toxicidad 1/6. Exceso NH ₃ en el producto. Disminución de la temperatura de descomposición, aumento de ácidos y posibles vapores nitrosos en línea de vapor 3. Contaminación de NH ₃ en E-1, F-1 y en E-1 (*) 5. El aire para el secado no se acondiciona correctamente 1/6. Aumento temperatura NH ₃ en E-1	FRC-2 cierra la válvula FV-2 de NH ₃ pH-C-1 actúa sobre FRC-1	FR-2, FR-1, PHR-1	- Mantenimiento estricto de los electrodos de pH - Comprobar instrumentación en área de alarmamiento - Instalar alarma en el proporcionalador (ratio NH ₃ /HNO ₃)	(*) T-1, torre de lavado, el vapor de proceso se lava con NH ₃ en esta torre
	No	Caudal de NH ₃	1. Factor lazo FRC-1 2. Válvula FV-1 cerrada (fallo solenóide) 3. Rotura tubería 4. Obstrucción total 5. Bloqueo válvula retención 6. Error humano de las válvulas 7. Fallo aire instrumentación (sin presión) 8. Falta amoníaco sustituto 9. Rotura de tubo en cambiador E-1	1/9. Contaminación en producto, disminución del pH 3. Riesgo tóxico 9. Contaminación línea vapor por 50-PS-1	FRC-2 cierra la válvula FV-2 pH-C-1 actúa sobre FRC-1	FR-2, FR-1, PHR-1, TR-1, bajará	9. By-pasar E-1 - Igual a «Menos caudal»	
	Más	Temperatura	1. Menos vacío en circuito de vapor 2. Sobrecalentamiento en E-3	1/2. Mejor reacción por alta temperatura 1/2. Aumento temperatura reacción (*) 1/2. Licor más concentrado	FRC-1: corrección caudal por sensor temperatura T-1	TR-2, PR-1, TI-2, TI-3	- Ninguna para un límite no peligroso	(*) No se podría bajar a temperatura excesivamente alta (la presión de vapor de NH ₃ a 40° C es de 15 bar)

2.1.6 Análisis del modo y efecto de los fallos (FMEA)

Corresponde al acrónimo anglosajón del *Failure Mode and Effects Analysis*. Una descripción de una aplicación completa del método se incluye en el artículo de King y Rudd publicado en el AIChE J. (*American Institute of Chemical Engineers Journal*) en 1971.

2.1.6.1 Descripción

Este método consiste en la tabulación de los equipos y sistemas de una planta química, estableciendo las diferentes posibilidades de *fallo* y las diversas influencias (*efectos*) de cada uno de ellos en el conjunto del sistema o de la planta.

Los *fallos* que se consideran son, típicamente, las situaciones de anomalía tales como:

- abierto cuando normalmente deba estar cerrado
- cerrado cuando normalmente deba estar abierto
- marcha cuando normalmente deba estar parado
- paro cuando normalmente deba estar en marcha
- fugas cuando normalmente deba ser estanco
- otros.

Los *efectos* son el resultado de la consideración de cada uno de los fallos identificados individualmente sobre el conjunto de los sistemas o de la planta.

El método FMEA establece finalmente, qué fallos individuales pueden afectar directamente o contribuir de una forma destacada al desarrollo de accidentes de una cierta importancia en la planta.

Este método no considera los errores humanos directamente, sino su consecuencia inmediata de mala operación o situación de un componente o sistema.

Tampoco establece las diferentes combinaciones de fallos de equipos o secuencias de los mismos que pueden llegar a provocar un accidente final de mayores consecuencias.

El FMEA es un método cualitativo que establece una lista de fallos, sistemática, con sus consiguientes efectos y puede ser de fácil aplicación para cambios en el diseño o modificaciones de planta.

2.1.6.2 *Ambito de aplicación*

El método FMEA puede ser utilizado en las etapas de diseño, construcción y operación.

En la etapa de *diseño* es útil para la identificación de protecciones adicionales, que puedan ser fácilmente incorporados para la mejora de equipos y sistemas.

En la etapa de *construcción* puede ser utilizado para una evaluación de modificaciones que puedan surgir por cambios inducidos en campo.

En período de *operación* el FMEA es útil para la evaluación de fallos individuales que puedan inducir a accidentes potenciales.

Su uso puede ser, con limitaciones, alternativo a un HAZOP, aunque encuentre su mayor aplicación como fase previa a la elaboración de árboles de fallos, ya que permite un buen conocimiento de los sistemas.

2.1.6.3 *Recursos necesarios*

Normalmente, el método FMEA puede llevarse a cabo por un equipo de dos analistas que conozcan perfectamente las funciones de cada equipo o sistema, así como la influencia de estas funciones en el resto de la línea o proceso. Para sistemas complejos, el número de analistas deberá ser incrementado en función de la complejidad y especialidades a ser cubiertas.

Para garantizar la efectividad del método, debe disponerse de:

- Lista de equipos y sistemas.
- Conocimiento de las funciones de los equipos.
- Conocimiento de las funciones de los sistemas y la planta.

La dedicación ya se ha comentado que es proporcional a la complejidad, y es muy poco significativo intentar establecer un índice promedio de dedicación.

2.1.6.4 *Soportes informáticos*

Normalmente no es necesario un sistema informático de apoyo, aunque en sistemas más complejos puede ser útil un sistema corriente de base de datos en el caso de establecer comentarios simples y objetivos para cada caso.

2. Identificación de riesgos químicos

2.1.6.5 *Ventajas e inconvenientes.*

Se ha citado anteriormente la rapidez del método frente a otros más complejos como pueden ser el HAZOP.

Los resultados que proporciona el método son función de esta misma simplicidad siendo en todo caso meramente cualitativos.

En todo caso, supone un análisis metódico y ordenado de todos los fallos que pueden presentarse en un equipo, sistema, proceso o planta y que puede suponer una aproximación relativamente poco costosa a las situaciones accidentales que estos fallos puedan provocar.

2.1.6.6 *Ejemplos*

Para desarrollar un FMEA, deben contemplarse las siguientes etapas:

- Determinar el nivel de detalle
- Desarrollar un formato de trabajo
- Definir el problema y las condiciones de contorno
- Rellenar la tabla FMEA
- Informar de los resultados

Se comenta brevemente a continuación cada uno de estos conceptos:

a) Nivel de detalle

El análisis puede desarrollarse a nivel de sistemas o de componentes, y ello debe definirse claramente al inicio de la labor.

Un ejemplo puede aclararlo mejor: si se estudia una planta, se puede definir como sistemas en fallo el sistema de alimentación, el sistema de mezcla, el de oxidación, el de separación de producto y los sistemas auxiliares. Para cada uno de estos grandes conjuntos, por ejemplo el de oxidación, se podría estudiar los fallos en las bombas de alimentación, la bomba de refrigeración, la válvula de control del circuito de agua de refrigeración, el sensor de temperatura del reactor, el controlador de temperatura, la alarma de temperatura máxima, el transmisor, etc.

b) Formato de trabajo

El tipo de tabla que debe ser desarrollado para soporte de la labor, debe tener en cuenta, inicialmente, el nivel de detalle definido en el apartado anterior.

Un ejemplo podría ser:

Fecha		Página de		
Planta		Analista		
Sistema		Referencia		
Item	Identificación	Designación	Modo de fallo	Efectos

Pueden introducirse otras columnas (criticidad, por ejemplo, en el caso del FMEA), (probabilidades de fallo cuando se conozcan), en preparación de otros tipos de análisis (cuantitativos, por ejemplo).

c) Definición del problema y condiciones de contorno

Se trata de determinar previamente qué partes deberá tener en cuenta el FMEA.

Los elementos mínimos para la definición del problema son:

- Identificación de la planta y/o sistemas a analizar
- Establecer los límites físicos del sistema de análisis. Ello implica definir los límites con otros sistemas. Un buen método es dibujar estos límites en un diagrama de flujo.
- Recoger la información necesaria para identificar tanto los equipos como su relación con el sistema o planta.

d) Rellenar la tabla FMEA

La tabla desarrollada en b) debe ser completada de forma sistemática, reduciendo la posibilidad de omisiones.

2. Identificación de riesgos químicos

Un diagrama de flujo puede ser un buen auxiliar para este fin. A medida que se colocan los equipos en la lista se van tachando en el diagrama original de forma bien visible.

En el desarrollo de la labor no debe dejarse ningún item por completar antes de pasar al siguiente.

Deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Identificación de equipos de forma biunívoca, utilizando, si es necesario, códigos o denominaciones particulares.
- Descripción de los equipos de forma que se incluya en la misma la función y posibles características básicas, como por ejemplo: «válvula motorizada, normalmente cerrada, en la línea de DN50 de sosa cáustica».
- Deben establecerse todos los modos de fallos para cada equipo en relación a sus condiciones normales de operación. Así, por ejemplo, los fallos de una válvula de control normalmente abierta pueden ser:
 - Fallo abre.
 - Cambio a posición cerrada.
 - Pérdidas al exterior.
 - Ruptura del cuerpo.

En cualquier caso, deben limitarse las consideraciones a aquellas situaciones que puedan provocar consecuencias importantes.

Para cada fallo identificado, deben determinarse los efectos en otros equipos o en el sistema.

Por ejemplo, una pérdida de líquido por el sello de una bomba tiene como efecto inmediato un derrame en la zona de la bomba. Si el fluido es inflamable, puede preverse un incendio que pueda afectar los equipos vecinos.

El analista puede introducir comentarios adicionales sobre los equipos afectados.

e) **Resultados**

El resultado de un FMEA será una tabla de los efectos de los fallos de cada componente sobre el proceso o sistema.

Los fallos identificados que provoquen consecuencias inaceptables deberán ser corregidos hasta niveles de aceptabilidad.

Los resultados de un FMEA pueden ser utilizados como primer paso de análisis más detallados de partes especialmente críticas (HAZOP o Árboles de Fallos -ver apartado 2.1.5 y 3.3 de esta Guía, respectivamente-).

2.1.7 Análisis del modo, efecto y criticidad de los fallos (FMEAC)

2.1.7.1 Descripción

Para no caer en reiteraciones, se referirá este método en relación con el FMEA comentado en el apartado 2.1.6 de esta Guía.

La diferencia fundamental en relación con el FMEA es que el FMEAC, además de establecer una relación entre los diferentes modos de fallo de un equipo o sistema y las consecuencias de cada uno de ellos, añade a esta consideración el establecimiento de la criticidad de cada uno de estos fallos. Es decir, establece un orden relativo de importancia de los fallos en función de las consecuencias de cada uno de ellos.

Como consideraciones generales de la metodología, se relacionarán todas las características indicadas en el apartado 2.1.6 de esta Guía con los siguientes aspectos adicionales.

- a) En la Tabla del Formato de Trabajo [apartado 2.1.6.6 de esta Guía punto b)] se añadirá una columna con el concepto de criticidad.
- b) En cuanto a la definición del problema y las condiciones de contorno, [apartado 2.1.6.6 de esta Guía punto c)], se añadirá la necesaria definición de unas condiciones o conceptos básicos de criticidad que permitan apreciar las diferencias de importancia entre las posibles consecuencias derivadas de los fallos analizados.

2. Identificación de riesgos químicos

A título de ejemplo se puede citar, para un caso hipotético:

Efecto	Criticidad
- Ninguno.	1
- Peligro menor para las personas y las instalaciones. No se requiere parada del proceso	2
- Peligros para las personas y las instalaciones. Se requiere parada programada del proceso	3
- Peligro inmediato para las personas y las instalaciones. Se requiere parada de emergencia	4

- c) Cada uno de los fallos y sus efectos son comparados bajo los conceptos básicos definidos en el apartado criticidad, y se ordenan en función de esta criticidad.
- d) En el informe final, se destacan los fallos que pueden provocar efectos de criticidad absolutamente inaceptables. Las actuaciones prioritarias irán dirigidas a aportar soluciones frente a estos fallos.

Con estas consideraciones adicionales, el resto del método FMEAC es absolutamente igual al FMEA.

2.2 METODOS SEMICUANTITATIVOS

Se entiende por métodos de evaluación de riesgo semicuantitativos, aquellos que, no llegando al detalle y rigor de una evaluación cuantitativa del riesgo, suponen un avance hacia ello desde los métodos cualitativos, en el sentido que son métodos que dan como resultado una clasificación relativa del riesgo asociado a una planta química o a partes de la misma.

Los métodos desarrollados en este sentido y que son de mayor difusión y conocimiento general son los denominados «Índice de DOW de fuego y explosión» y el «Índice de Mond».

El primero de ellos fue desarrollado por la compañía Dow Chemical y el segundo por el grupo ICI-Imperial Chemical Industries PLC.

Ambos métodos se basan en la asignación de penalizaciones y/o bonificaciones a las instalaciones de una planta química.

Las penalizaciones son asignadas en función de las sustancias presentes y las condiciones de proceso.

Las bonificaciones tienen en cuenta las instalaciones de seguridad que pueden mitigar o prevenir los efectos accidentales.

La combinación de ambas lleva a la determinación del índice con el que se afecta una determinada parte de la instalación, pudiendo examinar, a la vista de estos índices, la importancia relativa de las partes estudiadas en función del riesgo asociado.

Para que no resulte reiterativa la descripción y con la idea, por otra parte, que cualquiera de las Guías publicadas para aplicación de los métodos son suficientemente claras y detalladas, se procede a un comentario sobre el Índice de DOW, refiriendo posteriormente el Índice de Mond a todo lo detallado para el primero.

2.2.1 Índice de DOW de incendio y explosión

Con el título original de DOW's Fire & Explosion Index, publicado por primera vez en 1966, llegó a su sexta edición en el año 1987, en el que se incorpora por primera vez una penalización específica a los productos tóxicos.

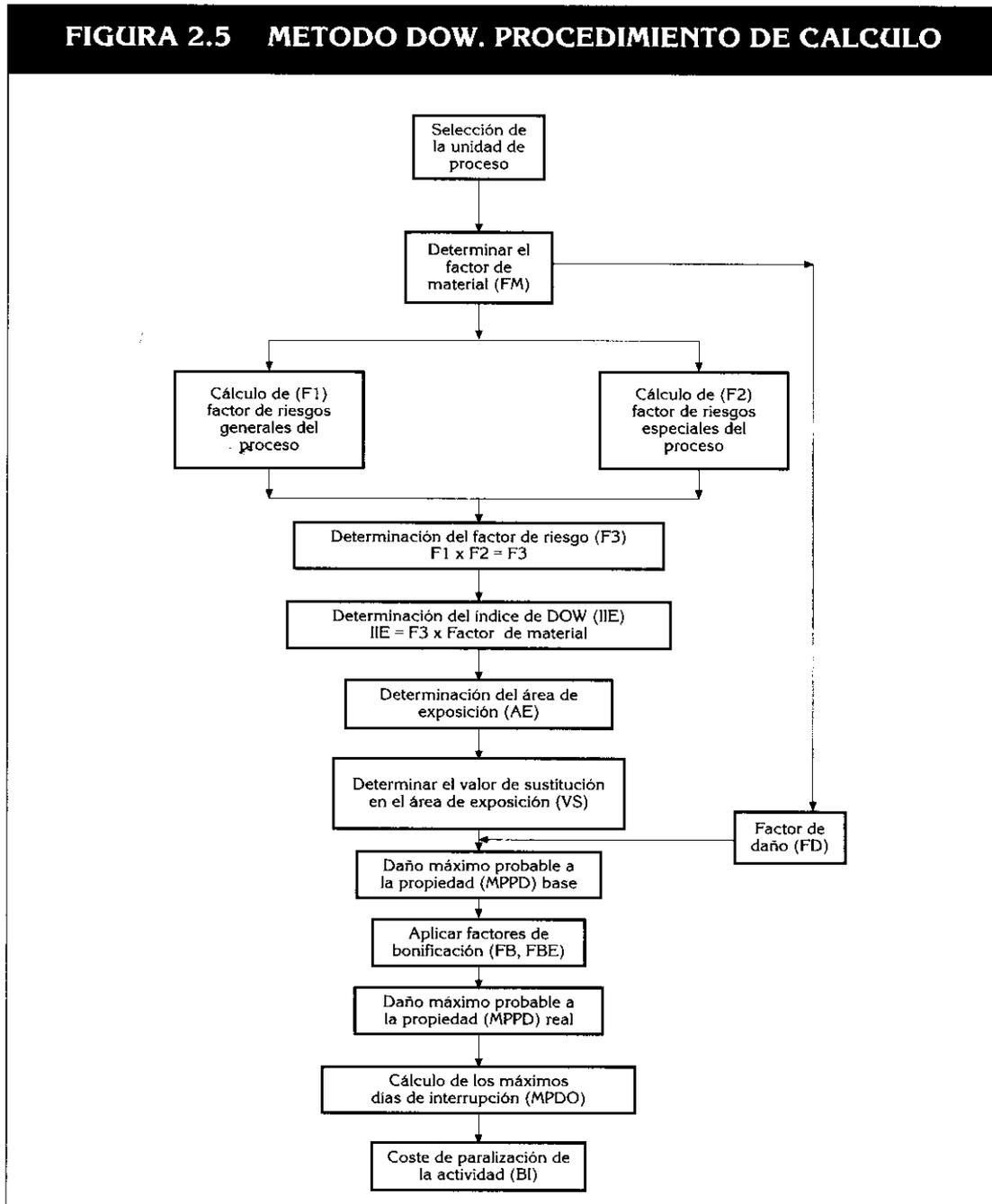
Con los principios básicos que se comentarán a continuación, y ya apuntados en el preámbulo de este capítulo, las ediciones sucesivas han ido acumulando las experiencias adquiridas en las aplicaciones del método. En estas líneas por ejemplo, la quinta edición incluía métodos de estimación de los tiempos de interrupción del servicio y de los costes derivados de estas interrupciones, en función de los riesgos evaluados; la sexta edición incluye, entre otras, la novedad de considerar la toxicidad de los productos como una posible complicación en las respuestas frente a emergencias.

2.2.1.1 Descripción

El método se desarrolla siguiendo las etapas que a continuación se comentarán brevemente y que se exponen de forma gráfica y resumida en la figura 2.5).

2. Identificación de riesgos químicos

FIGURA 2.5 METODO DOW. PROCEDIMIENTO DE CALCULO



FUENTE: DOW's Fire & Explosion Index Hazard Classification Guide. Sexta edición 1987.

-
- a) Dividir la planta química en estudio en «unidades de proceso» para cada una de las cuales se determinará su «Índice de Incendio y Explosión» (IIE) (ver página 65).
 - b) Determinar el «Factor de Material» (FM) para cada Unidad (ver página 63).
 - c) Evaluar los factores de riesgo, considerando las condiciones generales de proceso (reacciones exotérmicas o endotérmicas, transporte de material, accesos, etc.) (F1) y los riesgos específicos del proceso/producto tóxico peligroso, operación en vacío, operación dentro o cerca del rango de inflamabilidad, y otra (F2) (ver página 63).
 - d) Calcular el «Factor de Riesgo» (F3) y el «Factor de Daño» (FD) para cada unidad determinada en a).
 - e) Determinar los Índices de Incendio y Explosión (IIE) y el Área de Exposición para cada Unidad de Proceso seleccionada (AE) (ver página 65).
 - f) Calcular el valor de sustitución del equipo en el área de exposición (VS) (ver página 65).
 - g) Calcular el Daño Máximo Probable a la Propiedad (MPPD) (1), tanto básico como real, por consideración de los factores de bonificación (FB y FBE) (ver páginas 65 y 66).
 - h) Determinar los Máximos Días de Interrupción (MPDO) (2) y los costes por Paralización de la Actividad (BI) (3) en estos días (ver página 67).

Para tener una idea básica de los parámetros que el desarrollo del Índice de DOW obliga a considerar, se estudia con un mínimo de detalle el contenido de cada una de las etapas indicadas anteriormente. Como consideración general, no se pretende en este punto sustituir el contenido de las Guías de Aplicación del índice de DOW, que son claras y precisas para la aplicación del método.

(1) Se ha mantenido la sigla original del manual de aplicación del método correspondiente a *Maximum Probable Property Damage*.

(2) Se ha mantenido la sigla original del manual de aplicación del método correspondiente a *Maximum Probable Days Outage*.

(3) Se ha mantenido la sigla original del manual de aplicación del método correspondiente a *Business Interruption*.

2. Identificación de riesgos químicos

2.2.1.1.1 Unidades de proceso

Las instalaciones en estudio se dividen en «Unidades de Proceso» que pueden consistir en equipos individuales de proceso (columnas, reactores, tanques, etc.) o líneas de proceso que presenten condiciones operatorias semejantes y con implicación de las mismas sustancias.

El criterio básico de adopción para seleccionar estas unidades será, por un lado, el nivel de detalle del estudio pretendido y, por otro, la homogeneidad necesaria que permita la aplicación correcta del método.

2.2.1.1.2 Factor de Material

Es el denominado «Material Factor» (**FM**) en la versión original y da una medida de la intensidad de liberación de energía de una sustancia o mezcla de las mismas.

Este valor es un índice variable de 1 a 40, y el método facilita la forma de determinarlo directamente para una lista de más de 300 sustancias, así como los criterios para determinar el correspondiente a sustancias no incluidas en la lista o las mezclas de multicomponentes, o la corrección necesaria en caso de operación a temperaturas diferentes de la temperatura ambiente.

2.2.1.1.3 Factores de Riesgo

Para tener en cuenta las especiales condiciones de proceso que modifiquen el riesgo de las instalaciones en estudio se consideran dos tipos de «Factores» de riesgo:

- a) Factor de Riesgos Generales del Proceso (*General Process Hazards*) (**F1**).
- b) Factor de Riesgos Especiales del Proceso (*Special Process Hazards*) (**F2**).

Ambos suponen unas penalidades a aplicar al FM, que tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- F1:** Reacciones exotérmicas (ligeramente exotérmicas, moderadamente exotérmicas, exotérmicas con control crítico, exotérmicas particularmente sensibles).

-
- Procesos endotérmicos (calcinación, electrólisis, pirólisis).
 - Transferencia de producto (carga o descarga de sustancias altamente inflamables, mezcla, introducción de aire, atmósferas no inertes, etc.).
 - Condiciones de ventilación (filtros, manipulación en locales cerrados, ventilaciones mecánicas).
 - Condiciones de acceso a las áreas de proceso.
 - Características de los sistemas de drenaje y de control de derrames (cubetos, distancias de tanques a instalaciones y otros).

F2: Toxicidad de las sustancias, considerada como complicación adicional en caso de intervención en emergencias, no desde el punto de vista de seguridad e higiene ni medioambiental.

- Operación en presiones inferiores a la atmosférica (por posible entrada de aire y formación de atmósferas inflamables o explosivas).
- Operación en temperaturas cercanas al punto de inflamabilidad.
- Presencia de polvos explosivos.
- Sistemas de alivio de presión y presiones de operación.
- Bajas temperaturas.
- Cantidades de sustancias inflamables o inestables.
- Corrosión y erosión.
- Condiciones de estanqueidad (juntas, sellos, empaquetaduras).
- Utilización de generadores de calor con combustión (generadores de fluido térmico y otros).
- Equipos rotativos (compresores, bombas, agitadores).
- Calentadores con llama directa.

Determinados los valores de **F1** y **F2**, se calcula el Factor de Riesgo (*Unit Hazard Factor*) **F3**, por el producto entre ambos:

$$F3 = F1 \cdot F2$$

donde,

F1: Factor de riesgos generales del proceso.

F2: Factor de riesgos especiales.

F3: Factor de riesgo.

2. Identificación de riesgos químicos

2.2.1.1.4 Índice de Incendio y Explosión

El valor del Índice DOW de Incendio y Explosión, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{IIE} = \text{FM} \cdot \text{F3}$$

donde,

FM: Factor de material.

F3: Factor de riesgo.

IIE: Índice de Incendio y Explosión.

Según el valor calculado para este índice, y a través del proceso que facilita la propia Guía, se determina el Radio (**RE**) o Área de Exposición (**AE**) que representaría, o daría una idea de la parte afectada por un incendio o una explosión generada en la Unidad de Proceso estudiada.

Paralelamente, y en función del Factor de Material (FM) y del Factor de Riesgo (F3) se determina, asimismo, el denominado Factor de Daño (**FD**). El valor de sustitución (**VS**) se puede calcular de acuerdo con:

$$\text{VS} = \text{Valor de la instalación} \times 0.82 \times \text{FE}$$

donde, FE es el factor de escalado, relación del área afectada o de exposición (AE) con respecto del área total de la instalación.

El Factor de Daño (FD), unido a la consideración del Radio de Exposición (RE), proporciona el Máximo Daño Probable a la Propiedad (**MPPD**).

2.2.1.1.5 Factores de Bonificación

Hasta aquí se han considerado todos los factores (material y riesgos) que en algún aspecto incrementan el riesgo global de la planta y a través de ellos se ha determinado el Máximo Daño Probable a la Propiedad.

Una interpretación de este valor podría ser el considerar que sería el daño producido cuando fallasen absolutamente todas las medidas de prevención y protección existentes en una instalación industrial.

El hecho es que estas instalaciones existen y, por lo tanto, el estudio de la realidad debe considerarlas.

Por ello, una vez determinados todos los valores de riesgo, se introducen los Factores de Bonificación que tienen tres aspectos principales:

- C1: por control de proceso
- C2: por aislamiento material
- C3: por protección contra el fuego

Brevemente, estos factores consideran:

- C1:** Energía de emergencia, refrigeración, control de explosiones, paro de emergencia, control por ordenador, disponibilidad de gas inerte, procedimientos de operación, programas de revisión de procesos y operaciones.
- C2:** Válvulas de control remoto, drenajes, enclavamientos, tanques para vertidos de emergencia.
- C3:** Detectores, protección de estructuras, tanques de doble pared, suministro de agua contra incendios, sistemas especiales (Halón, CO₂, detectores de humos y de llama), rociadores, cortinas de agua, espuma contra incendios, extintores manuales, protección de cables eléctricos y de instrumentación.

Los factores C1, C2 y C3 siempre poseen valores menores que la unidad y variables desde 0,74 a 0,99.

El Factor de Bonificación FB se obtiene como producto de los valores anteriormente citados.

$$FB = C1 \times C2 \times C3$$

Partiendo de este valor se calcula el factor de bonificación efectivo (**FBE**) recurriendo a la gráfica correspondiente del manual. Con este valor se puede corregir el **MPPD** (Daño Máximo Probable a la Propiedad), para obtener el valor real:

$$MPPD \text{ (real)} = MPPD \times FBE$$

2. Identificación de riesgos químicos

Con este valor se puede obtener, recurriendo a la gráfica correspondiente del manual, el **MPDO** o número de días de interrupción de la actividad industrial que supondría un accidente en la instalación en una situación real (considerando los sistemas de seguridad de la misma).

Por último con este valor y el valor de la producción mensual (expresado en unidades monetarias) se calcula el coste asociado a la interrupción de la actividad industrial, **BI**, durante estos días de acuerdo con:

$$\frac{MPDO}{30} \times VPM \times 0,7 = BI$$

donde,

VPM: es el valor de la producción mensual.

MPDO: número de días máximos probables de interrupción de la actividad industrial.

2.2.1.2 *Ambito de aplicación*

El Índice de Incendio y Explosión encuentra su empleo como método de clasificación previa principalmente en grandes unidades o complejos (refinerías, complejos petroquímicos con varias unidades) en orden a identificar las áreas con mayor riesgo potencial, a las que se deben aplicar otro tipo de técnicas de identificación y cuantificación de riesgos.

2.2.1.3 *Recursos necesarios*

Para el correcto desarrollo de la metodología expuesta, es imprescindible la siguiente documentación:

- Planos de implantación de la unidad.
- Diagrama de flujo.
- Diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID).
- Hojas de especificaciones de equipos.
- Guía de cálculo del Índice DOW de Fuego y Explosión (actualmente en su sexta edición).

En función del gran número de parámetros que hay que manejar, y en función, asimismo, del número de unidades que el analista vaya a definir como objeto de estudio, puede ser recomendable la utilización de un sistema informático de apoyo.

Para la aplicación del método es necesario el conocimiento detallado de la mencionada Guía, así como el apoyo de personal cualificado conocedor de las condiciones de proceso y físicas de las instalaciones en estudio.

2.2.1.4 *Soportes informáticos.*

Existen modelos informáticos que facilitan y aceleran la elaboración del Índice de Incendio y Explosión evitando los posibles errores en la consulta de las numerosas tablas y gráficos. Un ejemplo de este tipo de programa lo constituye el modelo INDICES (TEMA).

2.2.1.5 *Ventajas/Inconvenientes.*

Como se ha comentado inicialmente, la aplicación del método permitirá una ordenación, en función del riesgo asociado, de las unidades en que se haya dividido la instalación.

El método puede ser de gran utilidad como paso previo para centrar la atención del analista en las unidades más críticas del proceso y decidir posteriormente las que deban ser analizadas con mayor profundidad.

En cualquier caso, es conveniente no confundir la exactitud con la que el índice de DOW facilita valores tales como el Área de Exposición o el Máximo Daño a la Propiedad, con los valores que pueden determinarse por aplicación de herramientas mucho más complejas y avanzadas, como pueden ser los modelos de simulación y vulnerabilidad.

2.2.1.6 *Ejemplos*

Los apartados marcados a continuación siguen el orden de los pasos mencionados en el apartado 2.2.1.1 de Descripción del método DOW.

a) Selección de la unidad

Se considera una estación de carga de cisternas constituida por tres recipientes de gasolina de 1.000 m³, dos bombas y un brazo de carga.

2. Identificación de riesgos químicos

Los sistemas de seguridad de los cuales dispone la instalación son:

- Sistema de inertización con nitrógeno (los depósitos son de techo flotante).
- Cubeto con drenaje a zona segura.
- Válvulas automáticas de corte.
- Sistema contraincendios constituido por «sprinklers» de espuma y monitores.

El valor de la instalación se estima en 220 millones de pesetas.

El ejemplo se basa sobre las tablas y datos, correspondientes a la quinta edición del manual del método (1980).

b) Factor de material (FM)

Para gasolina las tablas del manual proporcionan un valor de 16.

c) Factores (F1) y (F2):

- Factor general de riesgo (F1)	
Factor base	1,0
Carga de producto con T_i (1) < 37,8 °C	+ 0,5
Cubeto con drenaje a balsa	+ 0,25
	<u>1,75</u>
	F1 =
- Factor especial de riesgo (F2):	
Factor base	1,0
Temperatura de operación > T_i (1).....	+ 0,30
Condiciones de inflamabilidad en caso de fallo de purga	+ 0,30
Por presión de alivio.....	+ 0,15
Cantidad de energía (2,4E+10kcal).....	+ 1,1
Pérdidas menores por estopadas	+ 0,1
Empleo de bombas de potencia > 56 kW	+ 0,50
	<u>3,45</u>
	F2 =

d) Factor de riesgo (F3)

Se obtiene como producto de los anteriores:

$$F3 = F1 \cdot F2 = 1,75 \times 3,45 = 6,04$$

(1) T_i : Temperatura de inflamación o *flash point* (°C).

- Factor de daño (FD)

$$FD = 0,55(\text{ver figura 2.6})$$

Un 55% de la zona expuesta quedará dañada seriamente

e) Índice de incendio y explosión (IIE)

Se obtiene como producto del factor de material (FM) y del factor de riesgos (F3):

$$IIE = FM \times F3 = 16 \times 6,04 = 97$$

Los criterios de clasificación según el índice IIE y de acuerdo con la versión anterior del manual son:

1 - 60	Ligero
61 - 96	Moderado
97 - 128	Intermedio
128 - 158	Intenso
≥ 159	Grave

de donde se desprende que el riesgo de la unidad es, en este caso, intermedio.

- Radio de exposición (RE)

Se obtiene en la figura 2.7 a partir del índice DOW (IIE):

$$RE = 83 \text{ feet, es decir, aproximadamente } 25 \text{ m.}$$

f) Valor de sustitución (VS)

$$VS = \text{Valor de instalación} \times 0,82 \times FE$$

donde el valor de instalación es de 220 millones de pesetas.

$$FE = \frac{RE^2}{R^2}$$

donde,

RE: Radio de exposición

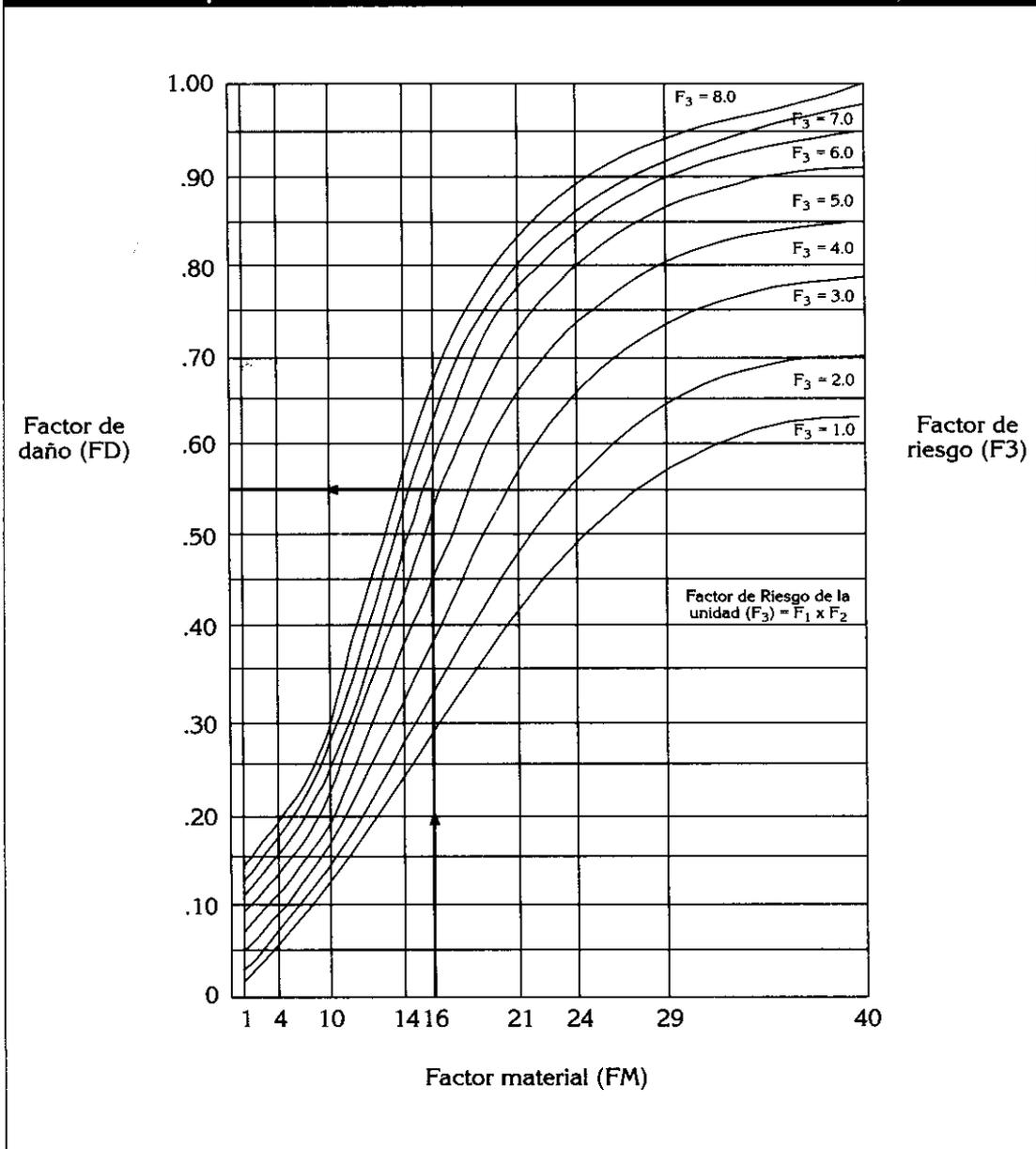
R: Radio de la instalación, estimado en 50 m.

FE: Factor de escalado

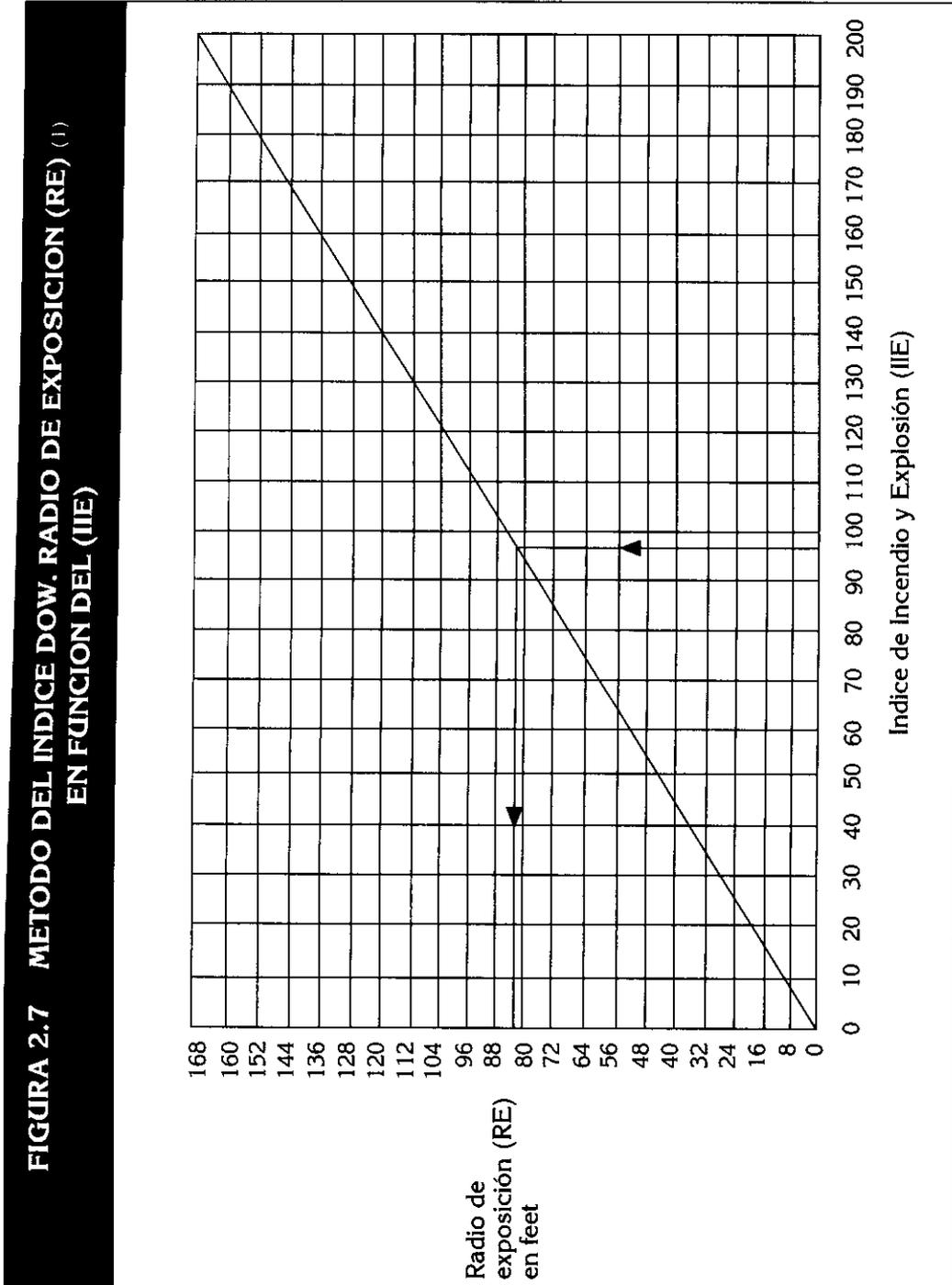
$$VS = 220 \times 0,82 \times \frac{25^2}{50^2} = 45 \text{ millones de pesetas}$$

2. Identificación de riesgos químicos

FIGURA 2.6 METODO DEL INDICE DOW. FACTOR DE DAÑO DE LA UNIDAD (FD) (1) EN FUNCION DE (F3) Y (FM).



(1) Gráfica extraída del manual del método (1985).



(1) Gráfica extraída del manual del método (1985).

2. Identificación de riesgos químicos

g) Máximo daño probable a la propiedad (MPPD)

Valor base:

$$\text{MPPD} = \text{FD} \times \text{VS}$$

donde,

FD: Factor de daño

VS: Valor de sustitución

MPPD: $0,55 \times 45 = 24,8$ millones de pesetas.

- Factores de bonificación (FB, FBE)

De acuerdo con las características de la instalación y los valores especificados en el manual de aplicación del método.

Inertización con N ₂	0,94
Instrucciones detalladas de operación	x 0,86
C1 =	0,81

Válvula automática de corte.....	0,94
Drenaje con pendiente > 2%.....	x 0,95
C2 =	0,89

Agua contra incendio a presión superior a 7 bar.....	0,90
Sistema de espuma manual.....	x 0,90
Monitores.....	x 0,95
C3 =	0,77

- Factor de bonificación (FB)

Se obtiene como producto de los anteriores.

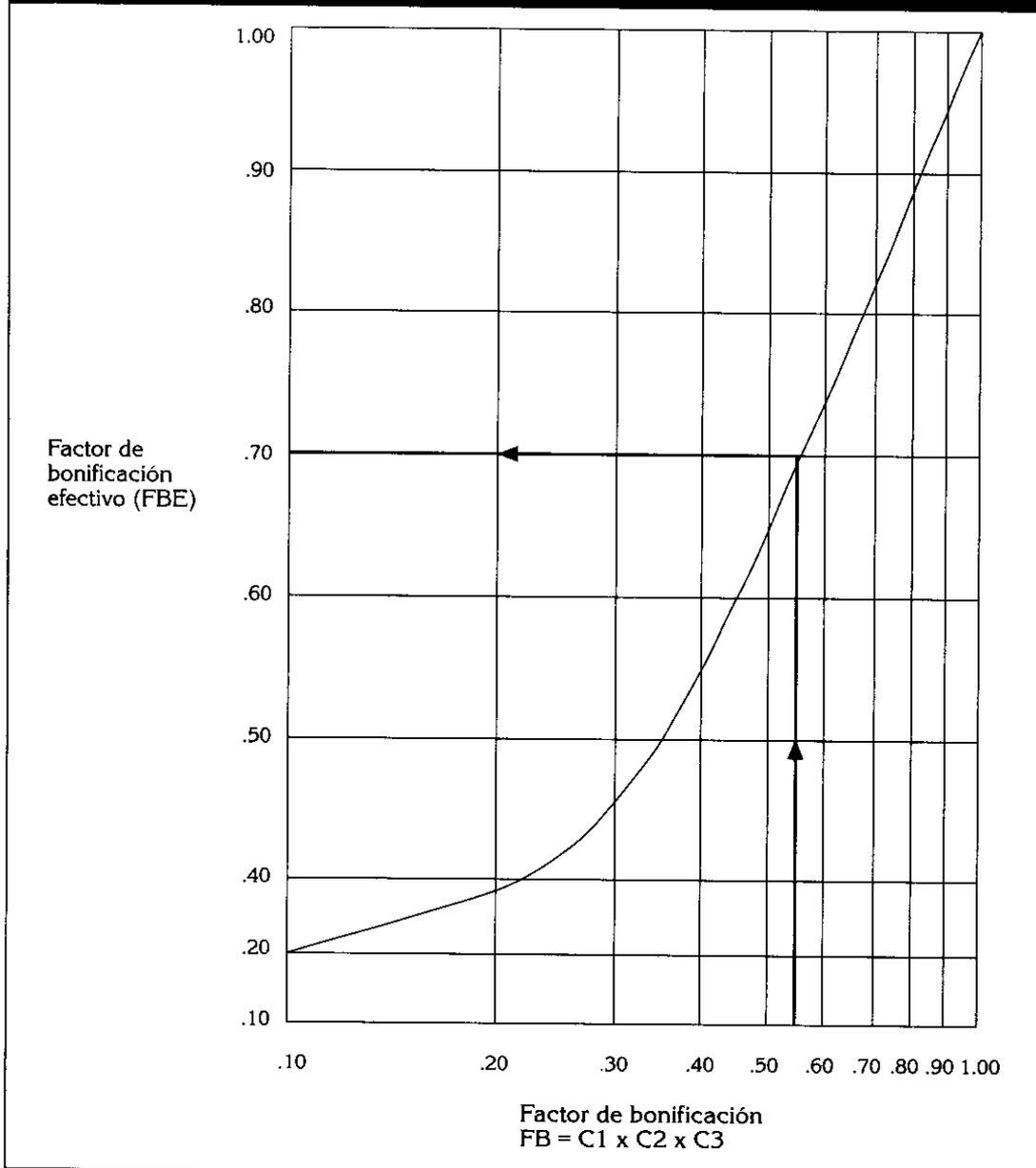
$$\text{FB} = \text{C1} \times \text{C2} \times \text{C3} = 0,81 \times 0,89 \times 0,77 = 0,56$$

- Factor de bonificación efectivo (FBE)

Se obtiene a partir de FB en la gráfica correspondiente del manual.

$$\text{FBE} = 0,7 \text{ (ver figura 2.8)}$$

FIGURA 2.8 METODO DEL INDICE DOW. FACTOR DE BONIFICACION EFECTIVO (FBE) A PARTIR DEL FACTOR DE BONIFICACION (1) (FB)



(1) Gráfica extraída del manual del método (1985).

2. Identificación de riesgos químicos

Valor real de MPPD

$$\text{MPPD Real} = \text{MPPD base} \times \text{FBE}$$

siendo

MPPD base: 24,8 millones de pesetas.

FBE: 0,7

Resultando:

$$\text{MPPD Real} = 17,36 \text{ millones de pesetas}$$

h) Máximos días probables de indisponibilidad (MPDO)

MPDO se obtiene a partir de MPPD real de la figura 2.9, pasando las unidades a dólares.

Los máximos días probables de indisponibilidad se sitúan entre 4 y 12 días con un 70% de probabilidad.

- Coste asociado a la paralización de la actividad (BI)

$$BI = \frac{MPDO}{30} \times VPM \times 0,7$$

donde,

MPDO: máximo número de días probables de indisponibilidad

VPM: valor mensual de la producción.

Estimando VPM en 90 millones de pesetas, resulta:

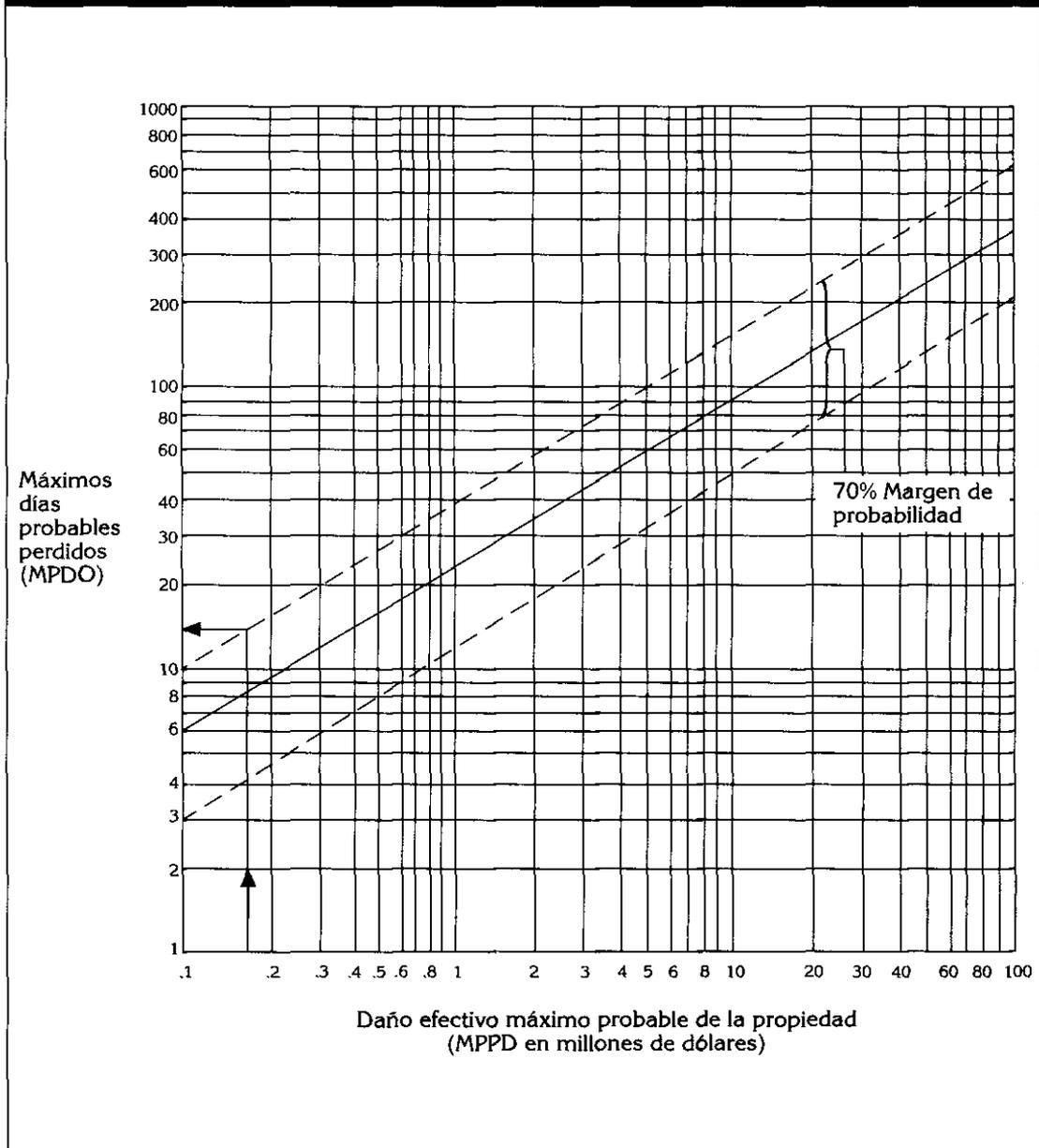
$$BI = \frac{8}{30} \times 9,0 \times 0,7 = 17 \text{ millones de pesetas}$$

2.2.2 Índice de MOND

2.2.2.1 Descripción

Este método fue desarrollado por técnicos de Imperial Chemical Industries PLC (ICI) a partir del índice DOW. La primera versión fue publicada en 1979 y la segunda, que se describe a continuación, en 1985.

FIGURA 2.9 METODO DEL INDICE DOW. MAXIMOS DIAS PROBABLES PERDIDOS (MPDO) EN FUNCION DE MPPD (1)



(1) Gráfica extraída del manual del método (1985).

2. Identificación de riesgos químicos

Ya se ha comentado anteriormente que la principal diferencia frente al Índice de DOW, ampliamente expuesto en el apartado 2.2.1 de esta Guía, es que el Índice de MOND considera la toxicidad de las sustancias presentes, y este parámetro es introducido como un factor independiente, considerando los efectos de las sustancias tóxicas por contacto cutáneo o por inhalación.

Para un conocimiento exhaustivo del método, como en el caso del índice de DOW, se recomienda consultar la Guía publicada por ICI. Como comentario general, y referido al índice de DOW, hay que indicar que el índice de MOND es, en general, más detallado, tienen en cuenta mayor número de parámetros de riesgo y bonificaciones y, finalmente, facilita una clasificación de unidades en función del riesgo.

Un diagrama descriptivo del método se incluye en la figura 2.10.

2.2.2.2 *Ambito de aplicación*

Se seleccionará este método cuando en la instalación a estudiar la presencia de productos tóxicos sea importante.

2.2.2.3 *Recursos necesarios*

En comparación con el índice DOW, el método MOND utiliza menos recursos gráficos, siendo necesario un mayor número de cálculos para determinar el mayor número de parámetros a considerar.

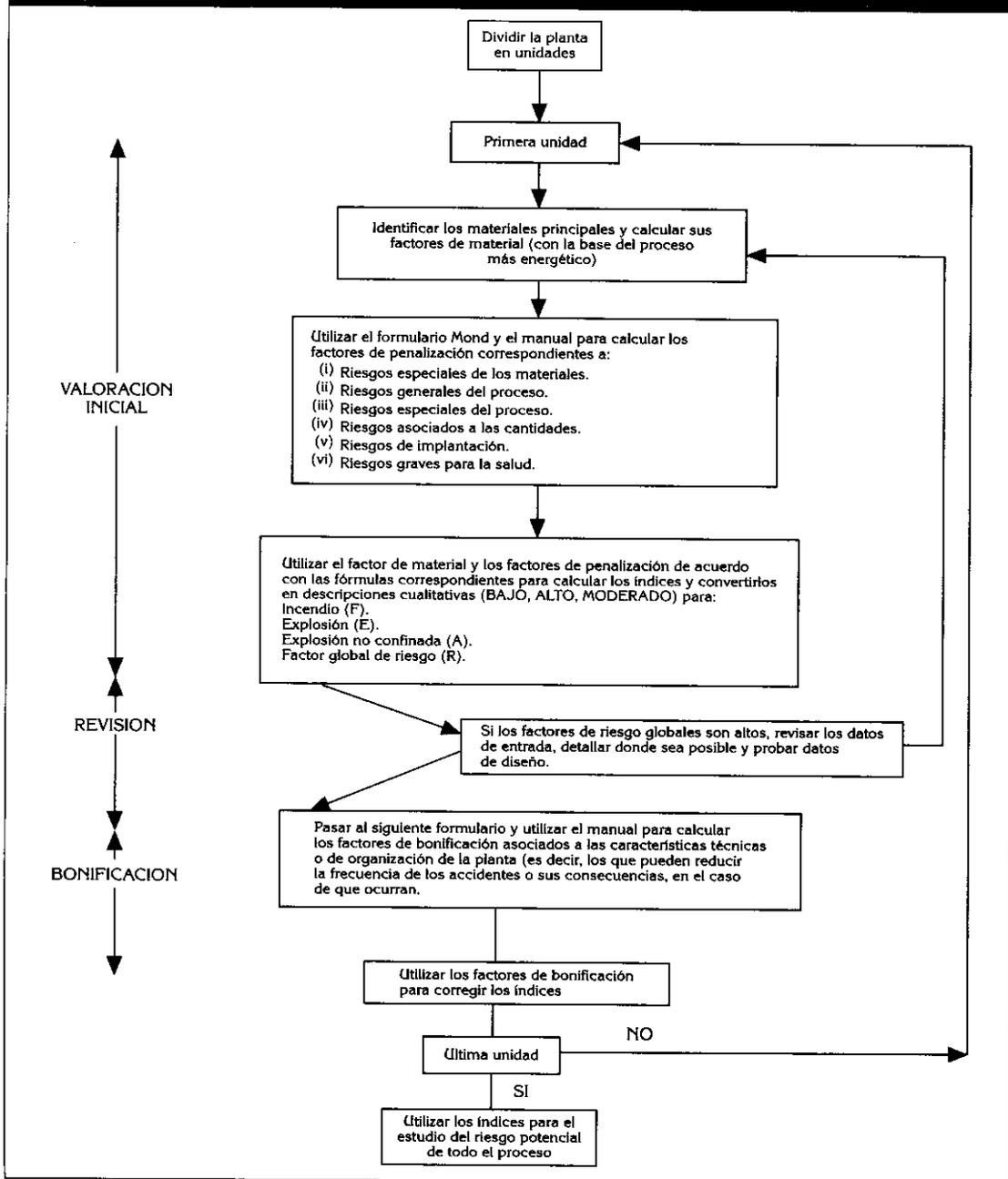
Por ello, ya desde la publicación de la segunda edición en 1985, se anunciaba la disponibilidad de una versión informatizada para ser utilizada en un ordenador tipo PC compatible.

La documentación y formación necesarias son las mismas comentadas en el apartado 2.2.1.3 de esta Guía para el índice de DOW.

2.2.2.4 *Ventajas/Inconvenientes*

Caben los mismos comentarios que para el índice de DOW, con la consideración, en este caso, de que se tienen en cuenta mayor número de parámetros.

FIGURA 2.10 ESQUEMA GENERAL DEL METODO DEL INDICE MOND



2. Identificación de riesgos químicos

En cualquier caso, los valores obtenidos facilitan la clasificación relativa de las unidades en que se haya dividido la instalación en estudio, facilitando la posterior aplicación de métodos más detallados.

2.2.2.5 Ejemplos

A modo de ejemplo se incluye en la tabla 2.6 de forma más detallada y de acuerdo con lo que especifica el manual del método (versión 1985) el proceso de cálculo del índice de MOND.

TABLA 2.6 PROCESO DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE MOND (1985)

PRIMERA FASE DE CÁLCULO

Considera la unidad en su forma más básica con el número mínimo de controles necesarios para su operación normal. Se mide la energía de la unidad por unidad de peso de material.

Consiste en determinar:

- Material o mezcla principal (1):
- Factor de material (2) (B):

SEGUNDA FASE DE CÁLCULO

Considera los factores que pueden agravar el riesgo.

Consiste en ponderar cada uno de los siguientes ítems:

- RIESGOS ESPECIALES DEL MATERIAL (3) (M)

	Rango	Nombre de la variable (4)
1. Productos oxidantes	0 + 20	
2. Dar lugar a gas combustible con agua	0 + 30	
3. Características de mezcla y dispersión	-60 + 100	(m)
4. Puede inflamarse espontáneamente	30 + 250	
5. Puede polimerizar espontáneamente de forma rápida	25 + 75	
6. Sensibilidad a la ignición	-75 + 150	
7. Puede dar descomposición explosiva	75 + 125	
8. Puede dar lugar a detonación del gas	0 + 150	
9. Propiedades de la fase condensada	200 + 1500	
10. Otros	0 + 150	
Factor de riesgo especial del material (M)	Valor: suma del valor de estos diez términos	

(1) Desarrollo en sección 4 del manual.

(2) Desarrollo en sección 5 del manual.

(3) Desarrollo en sección 6 del manual.

(4) Símbolo utilizado para referirse al ítem y posteriormente utilizado en las fórmulas de cálculo de los índices. Así se representan las características de mezcla y dispersión del material, mientras que M representa el factor de riesgo especial del material.

**TABLA 2.6 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
(Continuación)**

- RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (5) (P)

	Rango
1. Manipulación y cambios físicos únicamente	10 + 60
2. Características de la reacción	25 + 60
3. Reacciones batch	10 + 60
4. Multiplicidad de reacciones	25 + 75
5. Desplazamiento de material	0 + 150
6. Contenedores transportables	10 + 100

Factor de riesgo general del proceso (P)

Valor: suma del valor de estos seis terminos

- RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (5) (S)

	Rango	Nombre de la variable
1. Presión baja (< 15psia)	50 + 150	
2. Alta presión	0 + 150	(p) (6)
3. Temperatura baja		
3.1 Acero al carbono +10 °C a -25 °C	0 + 30	
3.2 Acero al carbono -25 °C	30 + 100	
3.3 Otros materiales	0 + 100	
4. Alta temperatura		
4.1 Material inflamable	0 + 35	
4.2 Resistencia del material	0 + 100	
5. Corrosión y erosión	0 + 400	
6. Fuga por juntas y cierres	0 + 60	
7. Vibración, fatiga, etc.	0 + 100	
8. Proceso/reacciones difíciles de controlar	20 + 300	
9. Operación cerca o en el rango de inflamabilidad	25 + 450	
10. Riesgo de explosión superior a un valor medio	40 + 100	
11. Riesgo de explosión de inflamabilidad	30 + 70	
12. Oxidantes potentes	0 + 100	
13. Sensibilidad del proceso a la ignición	0 + 400	
14. Riesgo de electricidad estática	10 + 200	

Factor de riesgos especiales del proceso (S)

Valor: suma del valor de estos catorce terminos

- (5) Desarrollo en sección 6 del manual.
(6) Este valor se encuentra en los gráficos de la figura 2.11

2. Identificación de riesgos químicos

**TABLA 2.6 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
(Continuación)**

RIEGOS ASOCIADOS A LAS CANTIDADES (7) (Q)

	Variable
1. Cantidad total de material (t)	K
2. Factor de cantidad	Q (8)

RIEGOS ASOCIADOS A LA IMPLANTACION (9) (L)

Altura en metros H
Area de trabajo en m² N

	Rango
1. Diseño de la estructura	0 + 200
2. Efecto dominó	0 + 250
3. Bajo tierra	50 + 150
4. Superficie de drenaje	0 + 100
5. Otro	50 + 250

Factor de riesgo de implantacion (L)

Valor: suma del valor de estos cinco terminos

RIEGOS ASOCIADOS A DAÑOS GRAVES PARA LA SALUD (10) (T)

	Rango
1. Efecto sobre la piel	0 + 50
2. Efectos por inhalación	0 + 50

Factor de riesgos graves para la salud (T)

Valor: suma del valor de estos dos terminos

- (7) Desarrollo en sección 9 del manual.
 (8) Se calcula según el rango del material en toneladas de acuerdo con las gráficas de la figura 2.12.
 (9) Desarrollo en sección 10 del manual.
 (10) Desarrollo en sección 11 del manual.

**TABLA 2.6 PROCESO DE CALCULO DEL INDICE DE MOND (1985)
(Continuación)**

TERCERA FASE DE CALCULO. DETERMINACION DE LOS FACTORES DE BONIFICACION

A. RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTENCIÓN (11) (K1)

1. Recipientes a presión
2. Tanques verticales atmosféricos
3. Tuberías de transferencia:
 - 3.1 Esfuerzos de diseño
 - 3.2 Juntas y uniones
4. Detección y respuesta frente a una fuga
5. Alivio de presión de emergencia o tanques de vertido de emergencia

Factor de riesgos graves para la salud (K1)

Valor: producto del valor de estos cinco terminos

B. RIESGOS ASOCIADOS AL CONTROL DEL PROCESO (12) (K2)

1. Sistemas de alarma
2. Suministros eléctricos de emergencia
3. Sistemas de refrigeración
4. Sistemas de inertización
5. Actividades de estudios de riesgos
6. Sistemas de seguridad de parada de la planta
7. Control por ordenador
8. Protecciones de los reactores
9. Procedimientos de operación
10. Supervisión de la planta

Factor de control del proceso (K2)

Valor: producto del valor de estos diez terminos

C. ACTITUD CON RESPECTO A LA SEGURIDAD (13) (K3)

1. Implicación por parte de la dirección
2. Entrenamiento en seguridad
3. Procedimientos y mantenimiento de seguridad

Factor de actitud frente a seguridad (K3)

Valor: producto del valor de estos tres terminos

(11) Desarrollo en sección 16.1 del manual.
 (12) Desarrollo en sección 16.2 del manual.
 (13) Desarrollo en sección 16.3 del manual.

2. Identificación de riesgos químicos

**TABLA 2.6 PROCESO DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE MOND (1985)
(Continuación)**

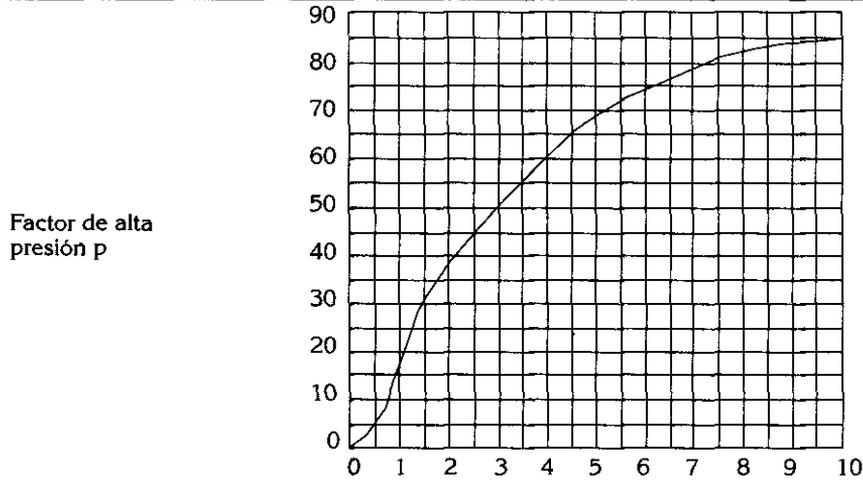
D. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS (14) (K4)	
1. Protección estructural contra el fuego	
2. Barreras, muros corta fuego	
3. Equipos de protección contra incendios	
Factor de protección contra incendios (K4)	Valor: producto del valor de estos tres terminos
E. AISLAMIENTO (15) (K5)	
1. Sistemas de cálculos	
2. Ventilación	
Factor de aislamiento de fugas (K5)	Valor: producto del valor de estos dos terminos
F. LUCHA CONTRA INCENDIOS (16) (K6)	
1. Alarmas de incendio	
2. Extintores manuales	
3. Suministro de agua	
4. Rociadores de agua o monitores	
5. Instalaciones de espumógeno o inertización	
6. Brigada contra incendio	
7. Pactos de ayuda mutua en caso de incendio	
8. Ventilación de gases	
Factor de lucha contra incendios (K6)	Valor: producto del valor de estos ocho terminos

- (14) Desarrollo en sección 17.1 del manual.
 (15) Desarrollo en sección 17.2 del manual.
 (16) Desarrollo en sección 17.3 del manual.

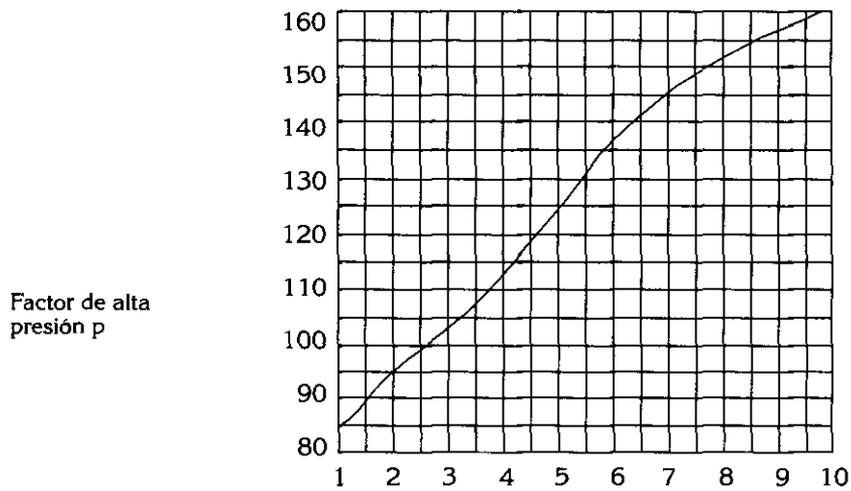
En las figuras 2.11 y 2.12, respectivamente, se incluyen las gráficas a utilizar para determinar los factores de presión alta (p) y de cantidad (Q).

Por último, en la tabla 2.7 se reseñan las ecuaciones a aplicar para evaluar los distintos índices en función de los factores definidos.

FIGURA 2.11 CURVAS PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR P DE PRESION ALTA PARA EL METODO DE INDICE DE MOND (1)



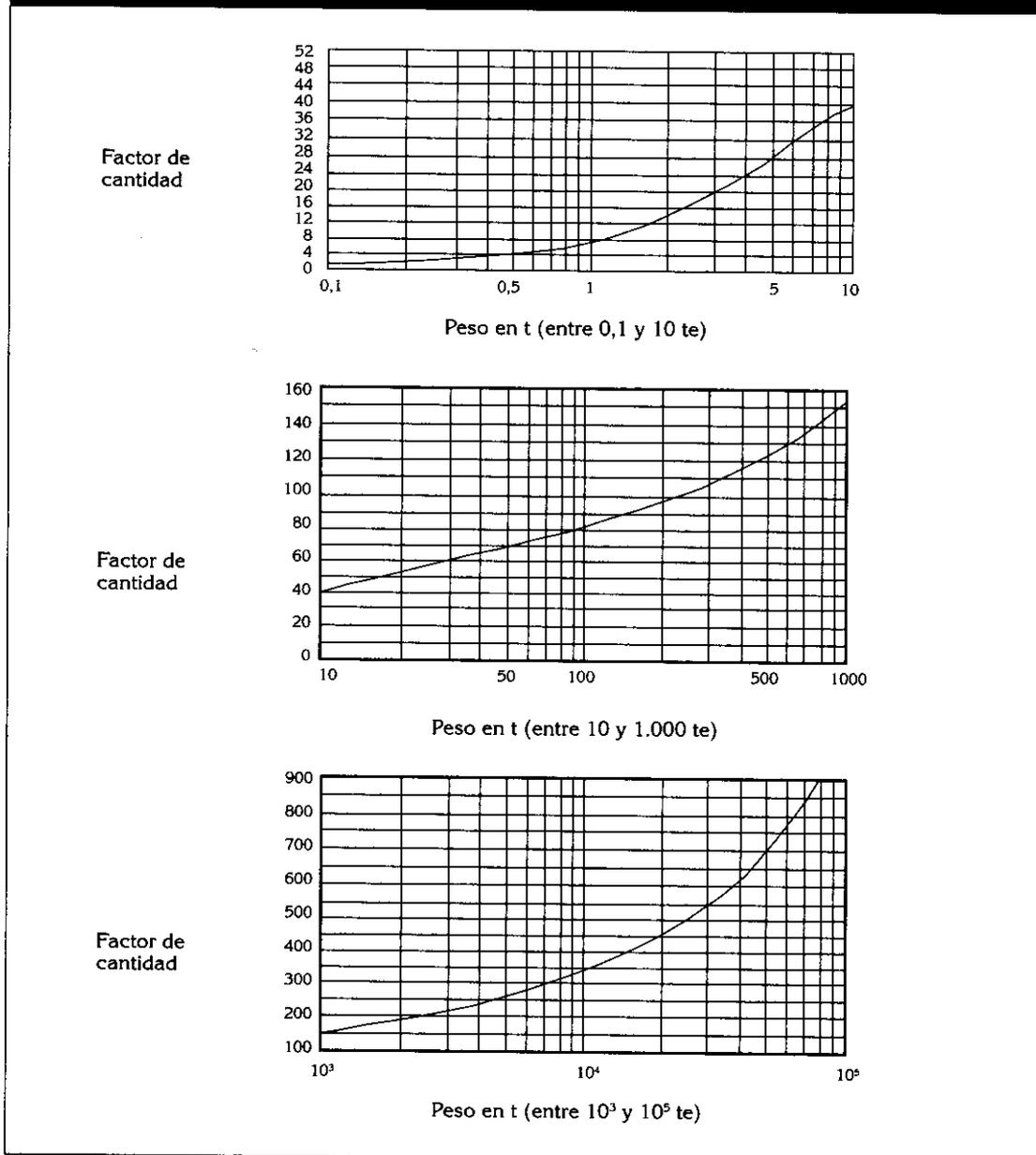
Presión de operación de la unidad (psig/100)
Factor de alta presión para el rango 0 a 1.000 psig



Presión de operación de la unidad (psig/100). Para presiones por encima de 10.000 psig se incrementará p por un valor de 10 para cada incremento
Factor de alta presión para el rango de presiones superiores a 1.000 psig

(1) Ver tabla 2.6.

FIGURA 2.12 CURVAS PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR Q DE CANTIDAD PARA EL METODO DE INDICE DE MOND (1)



(1) Ver tabla 2.6.

TABLA 2.7 ECUACIONES DEL METODO DEL INDICE DE MOND

- **INDICE EQUIVALENTE DE DOW**
(Valoración inicial y revisión)

$$D = B \times \left(1 + \frac{M}{100}\right) \times \left(1 + \frac{P}{100}\right) \times \left(1 + \frac{(S+Q+L+T)}{100}\right)$$

donde,

- B: Factor de material (ver tabla 2.6).
- M: Factor de riesgo especial del material (ver tabla 2.6).
- P: Factor de riesgos generales del proceso (ver tabla 2.6).
- S: Factor de riesgos especiales del proceso (ver tabla 2.6).
- Q: Factor de cantidad (ver tabla 2.6 y figura 2.12).
- L: Factor de riesgos asociados a la implantación (ver tabla 2.6).
- T: Factor de riesgos graves para la salud (ver tabla 2.6).

- **INDICE DE INCENDIO**
(Valoración inicial y revisión)

$$F = \frac{B \times K}{N}$$

donde,

- B: Factor de material (ver tabla 2.6).
- K: Cantidad total de material (ver tabla 2.6).
- N: Area de trabajo (ver tabla 2.6).

(Valor corregido)

$$F \times K1 \times K3 \times K5 \times K6$$

donde,

- F: Índice de incendio.
- K1: Factor de contención total (ver tabla 2.6).
- K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).
- K5: Factor de aislamiento de fugas (ver tabla 2.6).
- K6: Factor de lucha contra incendios (ver tabla 2.6).

- **INDICE DE EXPLOSION INTERNA**
(Valoración inicial y revisión)

$$E = 1 + \frac{(M+P+S)}{100}$$

donde,

- M: Factor de riesgo especial del material (ver tabla 2.6).
- P: Factor de riesgos generales del proceso (ver tabla 2.6).
- S: Factor de riesgos especiales del proceso (ver tabla 2.6).

2. Identificación de riesgos químicos

**TABLA 2.7 ECUACIONES DEL METODO DEL INDICE DE MOND
(Continuación)**

(Valor corregido)

$$E \times K2 \times K3$$

donde,

K2: Factor de control de proceso (ver tabla 2.6).

K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).

- **INDICE DE EXPLOSION NO CONFINADA**

(Valoración inicial y revisión)

$$A = B \times \left(1 + \frac{m}{100}\right) \times (1 + p) \times \frac{(Q \times H \times E)}{1.000} \times \frac{(t(^{\circ}) + 273)}{300}$$

donde,

B: Factor de material (ver tabla 2.6).

m: Características de mezcla y dispersión (ver tabla 2.6).

p: Factor de alta presión (ver tabla 2.6 y figura 2.11).

Q: Factor de cantidad (ver tabla 2.6 y figura 2.12).

H: Altura (ver tabla 2.6).

E: Índice de explosión interna anteriormente definido.

t: Temperatura de operación.

(Valor corregido)

$$A \times K1 \times K2 \times K3 \times K5$$

donde,

A: Índice de explosión no confinada.

K1: Factor de contención total (ver tabla 2.6).

K2: Factor de control de proceso (ver tabla 2.6).

K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).

K5: Factor de aislamiento de fugas (ver tabla 2.6).

- **INDICE DE RIESGO GLOBAL**

(Valoración inicial y revisión)

$$R = D \times 1 + (0,2 E \times \sqrt{A \times F})$$

donde,

D: Índice equivalente de DOW.

E: Índice de explosión interna.

A: Índice de explosión no confinada.

F: Índice de incendio.

(Valor corregido)

$$R \times K1 \times K2 \times K3 \times K4 \times K5 \times K6$$

donde,

K1: Factor de contención total (ver tabla 2.6).

K2: Factor de control de proceso (ver tabla 2.6).

K3: Factor de actitud frente a seguridad (ver tabla 2.6).

K4: Factor de protección contra incendios (ver tabla 2.6).

K5: Factor de aislamiento de fugas (ver tabla 2.6).

K6: Factor de lucha contra incendios (ver tabla 2.6).

**TABLA 2.7 ECUACIONES DEL METODO DEL INDICE DE MOND
(Continuación)**

- CALCULO DE INDICES

Indice	Valor inicial ¹		Valor revisado ²		Bonificación ³	
	Valor ⁴	Categoría ⁵	Valor	Categoría	Valor	Categoría
D						
F						
E						
A						
R						

¹ Este valor de los índices es el correspondiente a la primera evaluación de los parámetros con tendencia pesimista en la asignación de los parámetros.

² Este valor de los índices corresponde a una estimación corregida más real del valor de los parámetros.

³ Este valor de los índices toma en consideración los elementos de protección de los que dispone la instalación.

⁴ Valor numérico obtenido para el índice.

⁵ Categoría de índice de acuerdo con la clasificación reseñada en la tabla 2.8

2.3 OTROS METODOS DE APOYO

2.3.1 Revisión/auditoría de Seguridad (Safety Review)

Bajo este epígrafe se incluirían todas las inspecciones que normalmente se realizan y consideran como «Auditorías de Seguridad» en sus diferentes acepciones: desde las de verificación de las condiciones de las instalaciones, hasta las de organización y procedimientos, o de control de pérdidas.

Existen numerosas auditorías publicadas. Entre otras se puede citar la Clasificación Internacional cinco estrellas (Asociación para la Prevención de Accidentes) que consta de veinte elementos de auditoría distintos, cubriendo aspectos muy variados de gestión, seguridad e higiene y control total de pérdidas.

2.3.1.1 Descripción

La finalidad principal es verificar que las instalaciones, en operación y mantenimiento siguen las normas establecidas.

2. Identificación de riesgos químicos

TABLA 2.8 METODO DEL INDICE DE MOND. CLASIFICACION DE LOS INDICES

- **INDICE DE EXPLOSION INTERNA (E)**

Rango	Categoría
0-1,5	Leve
1,5-2,5	Bajo
2,5-4	Moderado
4-6	Alto
> 6	Muy alto

- **INDICE DE EXPLOSION NO CONFINADA (A)**

Rango	Categoría
0-10	Leve
10-30	Bajo
30-100	Moderado
100-400	Alto
400-1700	Muy alto
> 1700	Extremo

- **INDICE DE INCENDIO (F)**

Rango	Categoría
0-2	Leve
2-3	Bajo
5-10	Moderado
10-20	Alto
20-50	Muy alto
50-100	Intenso
100-250	Extremo
> 250	Muy extremo

- **INDICE DE RIESGO GLOBAL (R)**

Rango	Categoría
0-20	Leve
20-30	Bajo
100-500	Moderado
500-1100	Alto (grupo 1)
1100-2500	Alto (grupo 2)
2500-12500	Muy alto
12500-65000	Extremo
> 65000	Muy extremo

Estas revisiones de seguridad deben entenderse siempre como un complemento de las inspecciones rutinarias y deben partir siempre de un espíritu de colaboración para conseguir la operación de la planta en las mejores condiciones posibles de seguridad.

La labor incluye el desarrollo de entrevistas con personas de todo nivel: operadores de planta, mantenimiento, ingeniería, seguridad, gerencia, dirección general. Ello permite contemplar las situaciones desde diferentes y a veces contrastantes puntos de vista.

Generalmente, como instrumentos de apoyo de la labor realizada, pueden utilizarse métodos ya descritos tales como listas de chequeo, partes del método *What If* y otras.

El resultado de estas inspecciones son recomendaciones para mejorar las deficiencias observadas.

2.3.1.2 *Ambito de aplicación*

Estas revisiones son comúnmente empleadas en plantas de proceso. Ello no obsta, sin embargo, para que tengan su aplicación en plantas piloto, laboratorios, almacenamientos, y puedan ser utilizadas en diferentes fases de su vida (proyectos, construcción, puesta en marcha, operación, desactivación).

Estas diferentes fases sirven para cubrir los siguientes objetivos básicos:

- Cumplimiento de las normas de los procedimientos de operación y mantenimiento.
- Detección de nuevos riesgos.
- Revisión de nuevos procedimientos.
- Detección de cambios en equipos o procesos que pueden introducir nuevos riesgos.
- Introducción de nuevas tecnologías frente a riesgos existentes.

Es normal que en plantas de alto riesgo se realicen auditorías cada 2 ó 3 años, mientras que en otras de riesgo menor se llevan a cabo cada 5 ó 10 años.

2. Identificación de riesgos químicos

2.3.1.3 Recursos necesarios

Para llevar a cabo una auditoría completa, el equipo auditor, compuesto por un total de 2 a 5 personas, debe tener acceso a todas las normas aplicables, descripción de procesos, diagramas de proceso, diagramas de tuberías e instrumentación, procedimientos de puesta en marcha, parada, operación normal y emergencias, informes sobre accidentes, informes de mantenimiento, pruebas de presión, inspecciones de recipientes a presión, características físico-químicas (toxicidad, reactividad, etc.).

Los inspectores deben estar familiarizados con las normas y procedimientos y, eventualmente, pueden precisarse especialistas en algunos puntos (electricidad, instrumentación).

Una auditoría de una instalación completa puede requerir una labor de campo de hasta una semana.

Existen métodos clasificados para el desarrollo de inspecciones o auditorías. Muchos de ellos son de uso interno de compañías y otros son de amplia difusión como puede ser, el ya citado de Clasificación Internacional de cinco estrellas (APA).

2.3.1.4 Soportes informáticos

Normalmente no se utiliza soporte informático en la realización de esta técnica.

2.3.1.5 Ventajas/Inconvenientes

Son similares a las enumeradas en el epígrafe 2.1.2.5. para los *check list*.

2.3.1.6 Ejemplos

Como ejemplo genérico de una revisión, se concretan diferentes etapas a cubrir en una inspección típica:

a) Preparación:

Consistirá en una recopilación de la información relativa a la instalación en estudio y que incluya:

- Descripción completa de la planta incluyendo diagramas de proceso, instrumentación y tuberías, implantación y procedimientos de operación, mantenimiento y emergencia.
- Conjunto de normas y reglamentos aplicables.
- Selección de personas a entrevistar.
- Informes disponibles (accidentes personales, accidentes mayores, inspecciones de recipientes a presión, pruebas de válvulas, etc.).
- Visita de planta con el responsable de la misma.

b) Realización:

Normalmente se inicia con una visita a planta con adquisición o verificación de información general.

El equipo inspector recoge toda la información escrita comentada anteriormente. Se contrastará el cumplimiento real de los procedimientos prescritos, incluyendo los procedimientos de trabajos especiales.

Una buena herramienta de trabajo es observar las reacciones frente a una situación de emergencia ficticia.

La inspección de equipos críticos requiere una verificación de las condiciones de los mismos. Algunas consideraciones típicas al respecto son:

- ¿El equipo en general está en buenas condiciones?
- ¿Los sistemas de alivio de presión están instalados correctamente, con buen mantenimiento, identificados correctamente?
- ¿Existen informes y registros de las pruebas?
- ¿Se han realizado periódicamente las pruebas de presión?
- ¿Se han hecho periódicamente medidas de espesores de pared?
- ¿Existen inspectores cuyas recomendaciones para reparaciones o sustituciones sean aceptadas por la gerencia?

2. Identificación de riesgos químicos

Por otro lado, los instrumentos y enclavamientos típicos deben ser, asimismo, inspeccionados. Las alarmas e instalaciones de emergencia deben ser probadas periódicamente.

Las instalaciones y equipos contra incendios sufrirán una especial revisión, para asegurarse que están debidamente entrenados y a punto de uso.

Los planes de emergencia deben ser contrastados en cuanto a actualización, conocimiento y familiarización.

Cuestiones típicas a plantearse en este punto son:

- ¿Alcanza el agua los equipos que protege?
- ¿La espuma está en buenas condiciones?
- ¿Es correcta la presión en las líneas contra incendios?

c) Resultados:

El resultado de la inspección es un informe en donde se ponen de manifiesto las impresiones favorables y desfavorables observadas.

Completan el mismo una serie de recomendaciones debidamente justificadas para ser discutidas con el responsable de la planta.

Asimismo, deben preverse los mecanismos de seguimiento de la aplicación de las recomendaciones.

2.4. METODOS PARA LA IDENTIFICACION DE OTROS RIESGOS

Los riesgos de origen natural, tecnológico y social, usualmente se identifican mediante la utilización de un *check list* específico.

2.5. RESUMEN

En la tabla 2.9 se resumen todos los métodos descritos con sus características principales.

TABLA 2.9 RESUMEN DE METODOS Y CARACTERISTICAS PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS

Método	Ámbito de aplicación	Recursos humanos/materiales	Soportes informáticos	Ventajas	Inconvenientes
Análisis histórico de accidentes	Identificación de accidentes. En algún caso proporciona orientación cuantitativa de la probabilidad. Útil para productos e instalaciones de amplia difusión.	Consulta banco de datos. Recopilación de información: publicaciones, revistas especializadas, informes industriales, informes oficiales.	OSIRIS-1, OSIRIS-2, FACTS, SONATA, MARS.	Técnica poco costosa.	A menudo los datos de accidentes son insuficientes.
Check list	Aplicable a todas las fases de un proyecto: diseño, construcción, puesta en marcha, operación y paradas y analizar.	La preparación ha de ser realizada por personas de gran experiencia. Es preciso disponer de referencias o estándares de referencia. Buen conocimiento del sistema o planta. La realización no requiere gran experiencia pero sí el análisis de los resultados.	Formatos recogidos de los datos.	Permite comprobar con detalle el estado de una instalación.	Verificar el cumplimiento de un reglamento o procedimiento para una instalación.
Análisis preliminar de riesgos	Se utiliza en fase de diseño preliminar de nuevas instalaciones.	Se debe disponer de: diseño básico, especificaciones de equipos, especificaciones de materiales.	-	Técnica poco costosa.	No adecuado para instalaciones existentes.
What if...?	Aplicable a modificaciones o instalaciones existentes.	Se debe disponer de: diseño detallado, datos de operación/mantenimiento, conocimiento profundo de la instalación.	-	-	Técnica más general que el HAZOP. No tiene una sistemática tan exhaustiva. Técnica que requiere inversión de tiempo por el equipo.
HAZOP	Aplicable a modificaciones o instalaciones existentes, así como a fase de diseño avanzado.	Se debe disponer de: diseño detallado, datos de operación/mantenimiento, conocimiento profundo de la instalación, equipo.	Códigos informáticos de registro de las sesiones, recomendaciones, etc. (HAZOP, HAZTRAC, HAZOP, etc.)	-	Técnica que requiere una mayor inversión de tiempo. Análisis muy exhaustivo de la instalación.

2. Identificación de riesgos químicos

TABLA 2.9 RESUMEN DE METODOS Y CARACTERISTICAS PARA LA IDENTIFICACION DE RIESGOS (continuación)

Método	Ambito de aplicación	Recursos humanos/materiales	Sopores informáticos	Ventajas	Inconvenientes
FMEA	Aplicable en fases de: diseño, construcción, operación, previo a árboles de fallos.	Información necesaria similar a What if...? y HAZOP.	-	Método menos costoso que HAZOP.	Menos exhaustivo.
FMEAC	Idem FMEA.	Idem FMEA.	-	Incluye una valoración cualitativa de la gravedad.	-
Índice DOW	Evaluación semicuantitativa de riesgo. Aplicable para la clasificación previa de áreas en instalaciones con varias unidades (refinerías, complejos petroquímicos).	Se debe disponer de: planos de implantación, diagramas de flujo, diagramas de tubería e instrumentación, guía de cálculo, etcétera).	Códigos informáticos facilitan la labor de evaluación (INDICES, etcétera).	Permite una clasificación previa del área y unidades.	La precisión de los resultados obtenidos con fines de identificación de riesgos es muy poca.
Índice MOND	Idem Índice DOW.	Lo mismo que Índice DOW. Comparativamente utiliza menos recursos gráficos.	-	Idem que Índice DOW. Tiene en cuenta la toxicidad de los productos.	Idem que Índice DOW.
Revisión auditoría de seguridad.	Puede tener objetivos muy variados. Generalmente se enfoca bajo una óptica monográfica: cumplimiento de normativa o legislación, revisión de procedimientos, gestión de seguridad, control de pérdidas.	Se debe disponer de: normas internas de instalaciones, procedimientos de operación, procedimientos de emergencia, documentación de equipos, permisos de trabajo, etc.	-	Idem que Índice DOW. Tiene en cuenta la toxicidad de los productos. Permite analizar las instalaciones o la organización con gran detalle.	El enfoque contempla únicamente un aspecto (normativa, legislación, etc.).

3.1 INTRODUCCION

La evaluación cualitativa de las frecuencias de ocurrencia, se puede realizar mediante dos enfoques fundamentalmente distintos:

1. Mediante una valoración semicuantitativa, que sin entrar en el análisis exhaustivo de las causas, puede asignar un nivel o rango de probabilidad a los accidentes. La metodología de análisis de riesgos es la desarrollada por el UCSIP (*Union des Chambres Syndicales de l'Industrie du Pétrole*), para las industrias del petróleo y refino; consta de dos apartados semicuantitativos en los cuales se ponderan las frecuencias y consecuencias de determinados accidentes. En este capítulo se expone la parte correspondiente a frecuencias, mientras que en el siguiente, se indica la parte relativa a consecuencias. Esta metodología fué desarrollado en Francia pero su aplicación ha sido escasa. Se describe ya que constituye una referencia histórica obligada. Con las correspondientes adaptaciones se puede emplear para la industria química en general.
2. Mediante la construcción y evaluación cualitativa de los árboles de fallos y eventos. A través de esta técnica se puede realizar un estudio exhaustivo de las causas que conducen a un accidente, así como una valoración cualitativa de las que tendrán mayor peso en la frecuencia resultante final.

3.2 INDICES DE FRECUENCIAS

3.2.1 Método UCSIP

3.2.1.1 Descripción

En el método UCSIP, los riesgos considerados, se caracterizan por un valor de probabilidad semicuantitativo.

El método propone una escala de probabilidad de ocurrencia en seis niveles:

- **Nivel 1:** acontecimiento improbable. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad de ocurrencia inferior a 10^{-10} por hora.
- **Nivel 2:** acontecimiento extremadamente raro. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad comprendida entre 10^{-10} y 10^{-8} por hora.

-
- **Nivel 3:** acontecimiento raro. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad comprendida entre 10^{-8} y 10^{-6} por hora.
 - **Nivel 4:** acontecimiento posible, pero poco frecuente. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad de ocurrencia comprendida entre 10^{-6} y 10^{-4} por hora.
 - **Nivel 5:** acontecimiento frecuente. Corresponde en términos cuantitativos a una probabilidad de ocurrencia superior a 10^{-4} por hora.
 - **Nivel X:** acontecimiento al que no se puede atribuir una probabilidad (atentado, efecto de arma pesada, etc.).

El método consiste en determinar un factor de seguridad (FS) sobre la base de tres valores:

- **(PR)** Participación en el riesgo del sistema, calculado en función de seis parámetros ($P1j$) que caracterizan el sistema y que tienen asignada una determinada ponderación entre 0 y 5.
- **(RE)** Importancia del riesgo en operación, calculado en función de seis parámetros ($P2j$) que caracterizan la operación del sistema y que tienen asignada una determinada ponderación entre 0 y 5.
- **(NG)** Nivel de gravedad, valor que mide la magnitud de las consecuencias y que adopta un valor entre 0 y 6. Se obtiene tal como se describe en el apartado 4.2.1.1 de esta Guía.

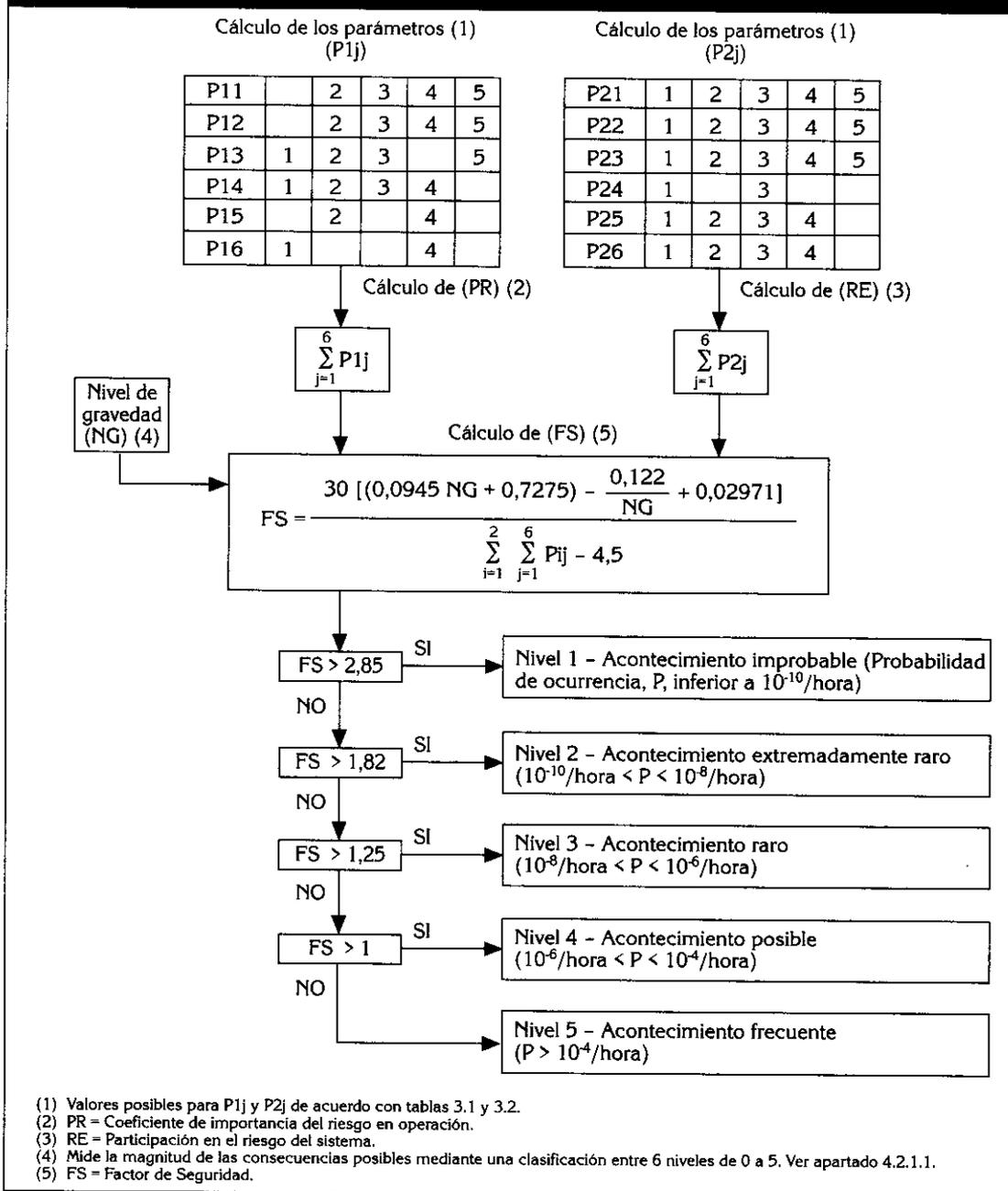
Según el valor de FS se asigna un determinado nivel de probabilidad.

El esquema lógico de la metodología está representado en la figura 3.1. Los parámetros $P1i$ y $P2j$ pueden adoptar según el caso sólo algunos de los valores marcados entre 1 y 5, tal como queda reflejado en las dos matrices de la citada tabla. La forma de calcular estos valores se describe con mayor detalle en el apartado 3.2.1.6 de esta Guía.

3.2.1.2 *Ambito de aplicación*

Estos métodos encuentran su aplicación cuando no sea preciso un análisis exhaustivo de las causas de los accidentes y basta con una idea del orden de magnitud de la frecuencia con que cabe esperar dichos accidentes.

FIGURA 3.1 METODO UCSIP. ESQUEMA PARA LA DETERMINACION DEL NIVEL DE PROBABILIDAD



3.2.1.3 Recursos necesarios

Es necesario disponer de la descripción completa del método y es preciso un cierto grado de experiencia en su aplicación.

3.2.1.4 Soportes informáticos

UCSIP publica el método descrito en un soporte informatizado.

3.2.1.5 Ventajas/Inconvenientes

Precisa una menor dedicación de tiempo que el desarrollo y cuantificación mediante árboles de fallos y eventos.

No se realiza un análisis sistemático de causas que conducen al accidente por lo que se pierde la valiosa información que se recoge en este tipo de estudio, si bien el método toma en consideración los «conjuntos mínimos de fallos» (ver apartado 3.3 de esta Guía).

Este método no permite evaluar el impacto de las posibles mejoras que se pueden incorporar a un sistema o circuito determinado.

3.2.1.6 Ejemplos

A modo de ejemplo, se describe con mayor detalle el proceso de cálculo.

La tabla 3.1/2 agrupa las definiciones de los doce parámetros ($P1j$, $P2j$ siendo $j = 1,6$) y de los criterios de asignación de valores entre 1 y 5 para cada uno de ellos.

Se definen dos coeficientes a partir de los doce parámetros:

- a) A partir de los valores de parámetros $P11$ a $P16$ (ver tabla 3.1, última columna), que definen el tamaño o los estados representativos del sistema estudiado, se define (PR), coeficiente de participación en el riesgo del sistema, que se expresa como:

$$PR = \frac{\sum_{j=1}^6 P1j}{30} \times 100 (\%)$$

El coeficiente PR puede adoptar valores entre un mínimo de 30 por 100 y un máximo de 90 por 100.

3. Frecuencias de ocurrencia

TABLA 3.1 METODO UCSIP. PARAMETROS P1i PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS

Parametro	Definición	Valor	Unidad
P11	Frecuencia de ocurrencia de la falla por fatiga	0,0000	1/año
		0,0000	1/año
P12	Frecuencia de ocurrencia de la falla por corrosión	0,0000	1/año
		0,0000	1/año
P13	Frecuencia de ocurrencia de la falla por impacto	0,0000	1/año
		0,0000	1/año
P14	Frecuencia de ocurrencia de la falla por sobrecarga	0,0000	1/año
		0,0000	1/año
P15	Frecuencia de ocurrencia de la falla por error humano	0,0000	1/año
		0,0000	1/año

TABLA 3.2 METODO UCSIP. PARAMETROS P2i PARA LA DETERMINACION DE FRECUENCIAS

Parámetro	Significado	Valor asignado según el caso	
P21	Frecuencia de inspecciones, controles, mantenimiento	Cada 3 meses o más	1
		Cada 6 meses	2
		Cada año	3
		Cada 2 años	4
		Cada 3 años o menos	5
P22	Proximidad con equipo con llama descubierta	Más de 500 metros	1
		Entre 200 y 500 metros	2
		Entre 100 y 200 metros	3
		Entre 30 y 100 metros	4
		Menos de 30 metros	5
P23	Frecuencia de los transitorios, arranques, movimientos	Menos de 5 veces al año	1
		De 5 a 10 veces al año	2
		De 10 a 20 veces al año	3
		De 20 a 30 veces al año	4
		Más de 30 veces al año	5
P24	Detección con alarma del peligro	Si	1
		No	3
P25	Toma en cuenta el peligro:	A + B + C	1
		A) Procedimiento especial	2
		B) Medios fijos de prevención	
		C) Medios fijos de protección	3
		No	4
P26	Vibraciones	No	1
		Si + dispositivo de amortiguación	2
		Si + seguimiento	3
		Si	4

3. Frecuencias de ocurrencia

- b) A partir de los parámetros P21 a P26 (ver tabla 3.2, última columna), que definen el tamaño o los estados representativos de la operación del sistema estudiado, se define (RE), coeficiente de importancia del riesgo en operación, que se expresa como:

$$PR = \frac{\sum_{j=1}^6 P2j}{30} \times 100 (\%)$$

El coeficiente RE puede adoptar valores entre un mínimo de 20 por 100 y un máximo de 86 por 100.

Esto permite trazar un diagrama donde se representa en abcisas la participación en el riesgo del sistema y en ordenadas la importancia del riesgo en operación.

Se traza en este diagrama la recta que pasa por los puntos (RE=100, PR=0) y (RE=0, PR=100).

Esta recta es la denominada «recta de inseguridad» y se caracteriza por el factor de seguridad FS = 1. Representa el conjunto de puntos para los que:

$$RE + PR = 100\%$$

Si se calcula el riesgo total (R_{tot}) mediante la expresión:

$$R_{tot} = RE + PR,$$

cualquier recta situada a la derecha de la recta de inseguridad está caracterizada por un factor de seguridad FS inferior a 1.

Cualquier recta situada a la izquierda de la recta de inseguridad está caracterizada por un factor de seguridad FS superior a 1.

Sobre la base del riesgo total R_{tot} se fijan mediante un axioma y cuatro postulados los niveles de probabilidad siguientes:

$R_{tot} > 100\%$	NP = 5 FS < 1	(Axioma)
$80 < R_{tot} < 100$	NP = 4 $1 < FS < 1,25$	(Postulado 1)
$55 < R_{tot} < 80$	NP = 3 $1,25 < FS < 1,82$	(Postulado 2)
$35 < R_{tot} < 55$	NP = 2 $1,82 < FS < 2,85$	(Postulado 3)
$R_{tot} < 35\%$	NP = 1 FS > 2,85	(Postulado 4)

donde:

NP = nivel de probabilidad

FS = factor de seguridad

Se establece entonces una relación entre el nivel de probabilidad NP y el factor de seguridad FS, que se ilustra en el diagrama de la figura 3.2, donde las diversas zonas de nivel de probabilidad 5, 4, 3, 2, y 1 están delimitadas por las rectas de factor de seguridad FS = 1; 1,25; 1,82, y 2,85.

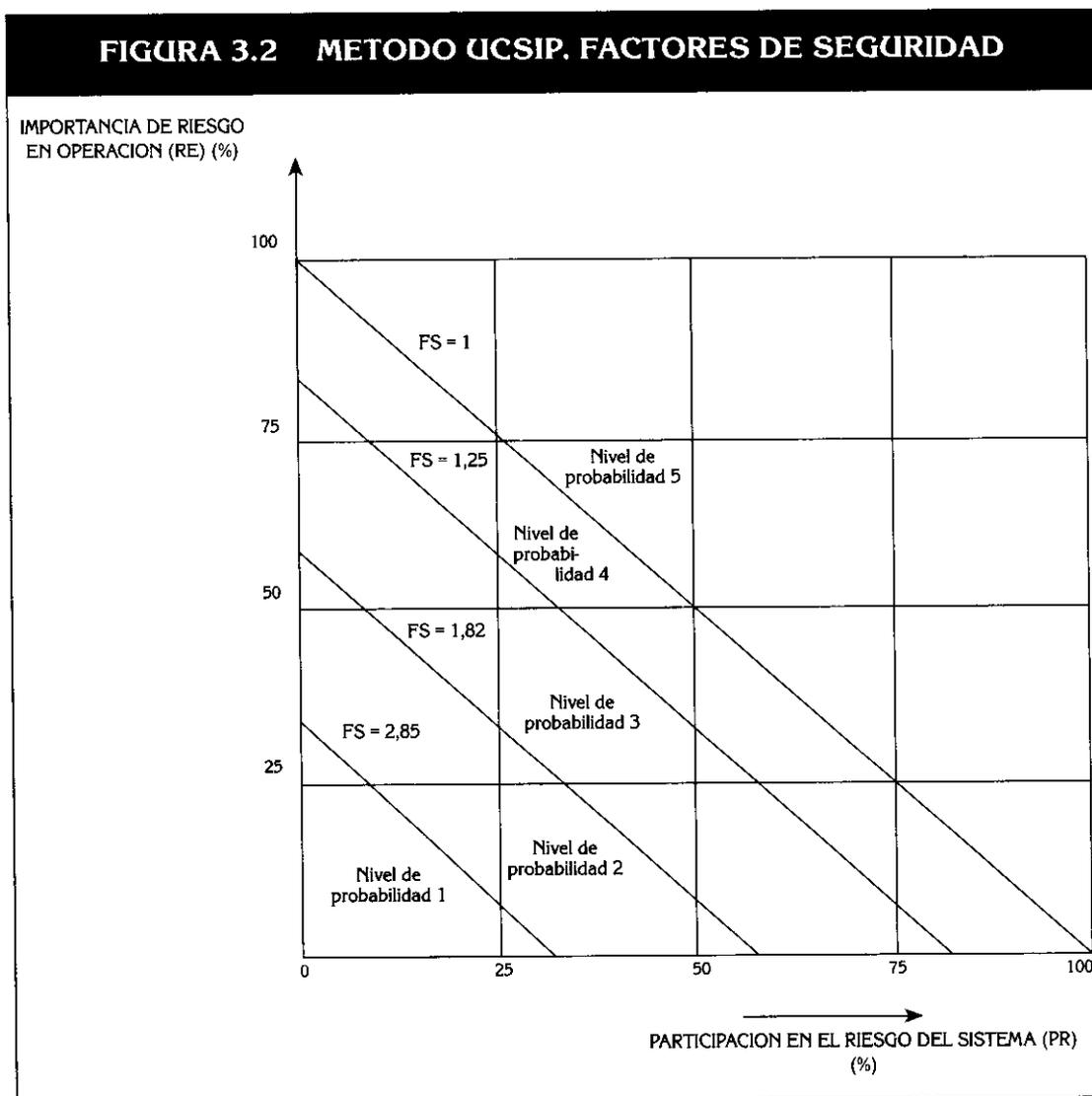
Para un punto de coordenadas (PR, RE), característico de un sistema estudiado, se expresará el factor de seguridad FS bajo forma de una ecuación en función del nivel de gravedad (NG) inherente al sistema estudiado y al riesgo total mínimo, por otro lado:

$$FS = \frac{30 * [(0,0945 * NG + 0,7275) - (0,122/NG - 0,02970)]}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^6 P_{ij} - 4,5}$$

donde,

NG= nivel de gravedad mide la magnitud de las posibles consecuencias. Esta definido el modo de cálculo en el apartado 4.2.1.1 de esta Guía, y adquiere valores entre 0 y 6;

P_{ij} = representa la ponderación dada a los parámetros para la determinación de frecuencias (ver tabla 3.1).



3.2.2 Otros métodos.

3.2.2.1 Descripción

Estos métodos recurren a una asignación directa de la probabilidad de ocurrencia. Son métodos que para que alcancen un mínimo de precisión en la clasificación realizada, exigen en cualquier caso un análisis previo de las causas y fallos que conducen al accidente.

Su aplicación conduce a una clasificación de las probabilidades del siguiente tipo:

- I. Baja.-Probabilidad de ocurrencia considerada REMOTA durante el tiempo de vida expresado de la instalación asumiendo que se realiza una operación y mantenimiento usuales.
- II. Media.-Probabilidad de ocurrencia considerada POSIBLE durante el tiempo de vida esperado de la instalación.
- III. Alta.-Probabilidad de secuencia considerada suficientemente alta para asumir que el evento OCURRIRA por lo menos una vez durante el tiempo de vida esperado de la planta.

3.2.2.2 *Ambito de aplicación*

Se puede emplear esta técnica en un estudio preliminar como método de selección del tipo de accidente a evaluar con mayor detalle.

3.2.2.3 *Recursos necesarios*

La aplicación de estos métodos es sumamente subjetiva y precisa una gran experiencia en su realización.

3.2.2.4 *Soportes informáticos*

Normalmente no se utiliza soporte informático en la aplicación de esta técnica.

3.2.2.5 *Ventajas/Inconvenientes*

Puede ser un método de clasificación para instalaciones con gran número de equipos.

Para conseguir resultados coherentes, es necesaria gran experiencia al aplicar los criterios de clasificación.

3.3 ARBOLES DE FALLOS

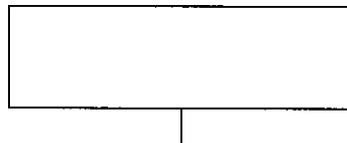
3.3.1 Descripción

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. Los árboles de fallos constituyen una técnica ampliamente utilizada en los análisis de riesgos debido a que proporcionan resultados tanto cualitativos como cuantitativos. En este apartado se describe únicamente la técnica en su aplicación cualitativa.

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. De esta manera, se puede apreciar de forma cualitativa, qué sucesos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.

Consiste en descomponer sistemáticamente un suceso complejo denominado *suceso TOP* en *sucesos intermedios* hasta llegar a *sucesos básicos*.

Suceso TOP: Ocupa la parte superior de la estructura lógica que representa el árbol de fallos. Es el suceso complejo que se representa mediante un rectángulo. Tiene que estar claramente definido (condiciones,...).



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.



Sucesos básicos: Son los sucesos terminales de la descomposición. Pueden representar cualquier tipo de suceso: sucesos de «fallos», error humano,... o su-

cesos 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. 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 3.3 extracto del *Fault Tree Handbook*, 1987 se indican otros tipos de puertas lógicas (menos utilizados) y su simbología.

Sucesos no desarrollados. Existen sucesos en el proceso de descomposición del árbol de fallos cuyo proceso de descomposición no se prosigue, bien por falta de información, bien porque no se considera necesario. Se representan mediante un rombo y 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 el análisis de los resultados y en su tratamiento.

TABLA 3.3 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 e 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 única 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.

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.

Tratamiento cualitativo 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 Álgebra de Boole) de varios sucesos elementales.

Se obtendrá, por tanto, una lista de los conjuntos mínimos de fallos del siguiente tipo:

Conjunto mínimo fallos número	Orden	Composición

En la primera columna se indicará el número de conjuntos mínimos de un orden determinado. Se define como orden de un componente el número de elementos que en él figuran. Por último, la tercera columna describirá la composición de los conjuntos mínimos.

3. Frecuencias de ocurrencia

Del estudio y análisis de esta tabla se podrán sacar las conclusiones cualitativas sobre la importancia de cada suceso.

En un estudio cualitativo también se puede llevar a cabo un análisis de importancia que consiste en determinar los elementos más relevantes en la estructura, en este caso independientemente de la probabilidad que pudieran tener.

En este caso el análisis consiste en asignar a todos los componentes una tasa constante igual para todos a 0,5 y calcular la medida de importancia de Fusell Vesely definida como:

Medida de importancia de Fusell-Vesely: Se define el factor de importancia de Fusell-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:

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

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 su probabilidad
- $C \in C_i$ representa que el componente C es uno de los componentes del conjunto mínimo de fallos C_i .

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

3.3.2 Ambito de aplicación

La técnica por su grado de elaboración se aplica a sucesos relativamente complejos para los cuales intervienen muchos elementos y que se pueden descomponer.

3.3.3 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).

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, ya que el árbol de fallos incorpora multitud de aspectos.

3.3.4 Soportes informáticos

Se recomienda el uso de un programa informático de evaluación de árboles de fallos, ya que para árboles, incluso con un número de componentes no muy elevado, el esfuerzo de evaluación es muy importante.

Se distinguen, básicamente, los códigos informáticos disponibles en el mercado, en su forma de resolución del árbol de fallos. Se indican en la tabla 3.4.

TABLA 3.4 CODIGOS DE CALCULO DEL ARBOL DE FALLOS

Código	Características
Análisis cualitativo: PREP, 1970 ELRAFT, 1971 MOGLIS, 1972 TREE, MICSUP, 1975 ALLGUTS, 1975 SETS, 1974 FTAP, 1976	Calculen los conjuntos mínimos de fallos o caminos de éxito.

**TABLA 3.4 CODIGOS DE CALCULO DEL ARBOL DE FALLOS
(Continuación)**

Código	Características
Análisis cuantitativo:	Realizan el cálculo probabilístico sobre la base de los conjuntos mínimos de fallos.
KITT1, KITT2, 1970	
SAMPLE, MOCARS, 1977	
FRANTIC, 1977	
Evaluación directa:	Realizan la evaluación numérica directa sin calcular previamente todos los conjuntos mínimos de fallos.
ARMA, 1965	
SAFTE, 1968	
GO, 1968	
GOFAULT FINDER, 1977	
NOTED, 1971	
PATREC, 1974	
PATREC.MC, 1977	
BAM, 1975	
WAM-BAM, 1976	
WAMCOT, 1978	
Uso doble:	Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo.
PL-MOD, 1977	
Otros:	
SAL-PC (1), 1987	
MODULE (2), 1988	
CARA (3), 1988	
Etc.	

- (1) Desarrollado por el JRC de Ispra.
 (2) Desarrollado por el reactor *Safety Department of Korea Avanced Energy Research Institute*.
 (3) Desarrollado por la compañía Technica.

3.3.5 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. 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. Solo ofrece una orientación en cuanto a frecuencia de ocurrencia de sucesos basada en el número de causas necesarias para su ocurrencia.

3.3.6 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 de amoníaco. El suceso TOP se define como «Rotura del depósito de amoníaco». Se pretende determinar las causas que pueden conducir al suceso.

a) Descripción del árbol de fallos:

El suceso TOP estudia las posibilidades de rotura catastrófica de un depósito de amoníaco de 180 m³, representado en la figura 3.3.

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 y de desarrollar *stress corrosion cracking*.

En la figura 3.4 se representa el árbol de fallos de la rotura del depósito de amoníaco.

3. Frecuencias de ocurrencia

**FIGURA 3.3 METODO DEL ARBOL DE FALLOS.
EJEMPLO: ESQUEMA DEL DEPOSITO DE AMONIACO**

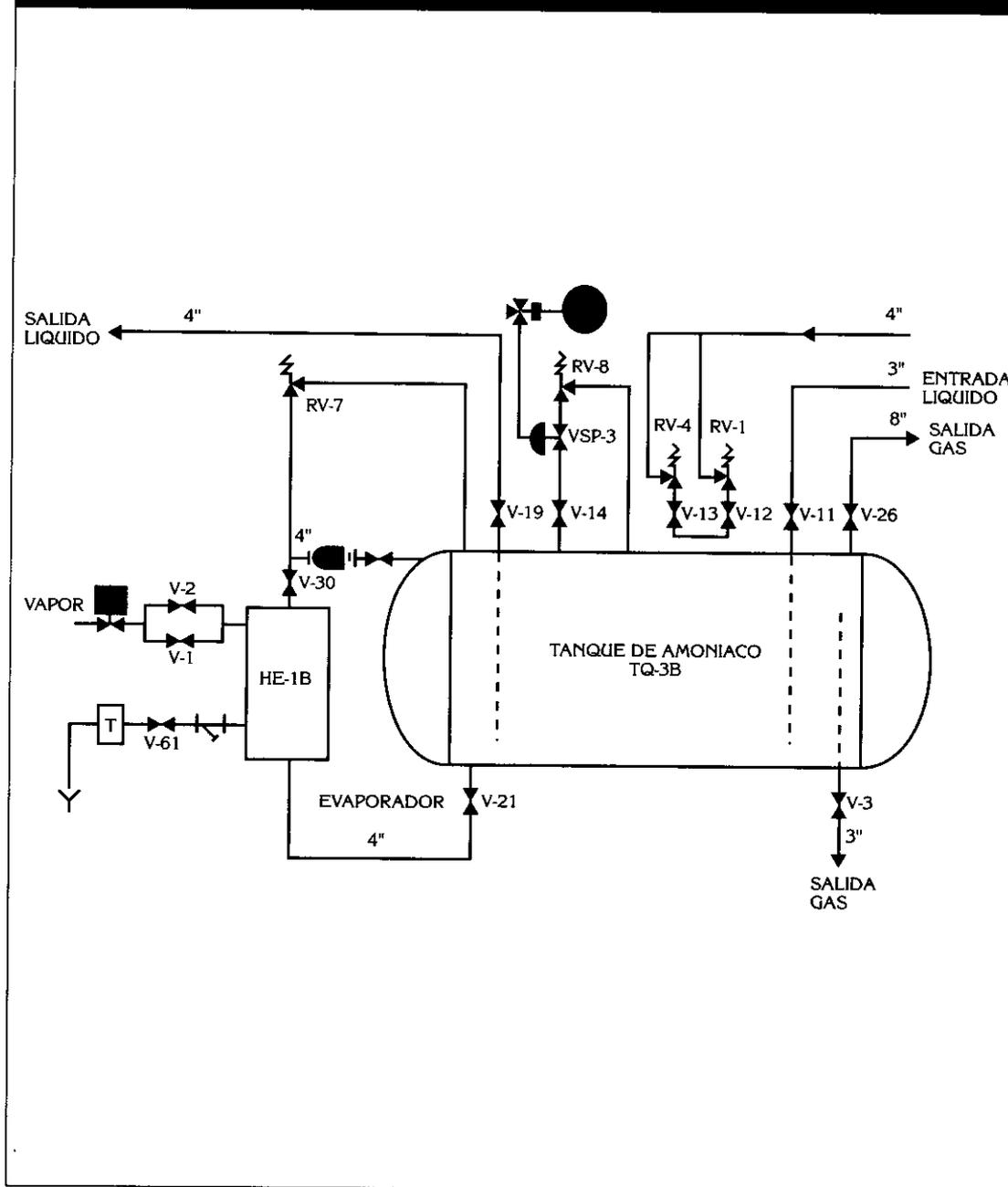
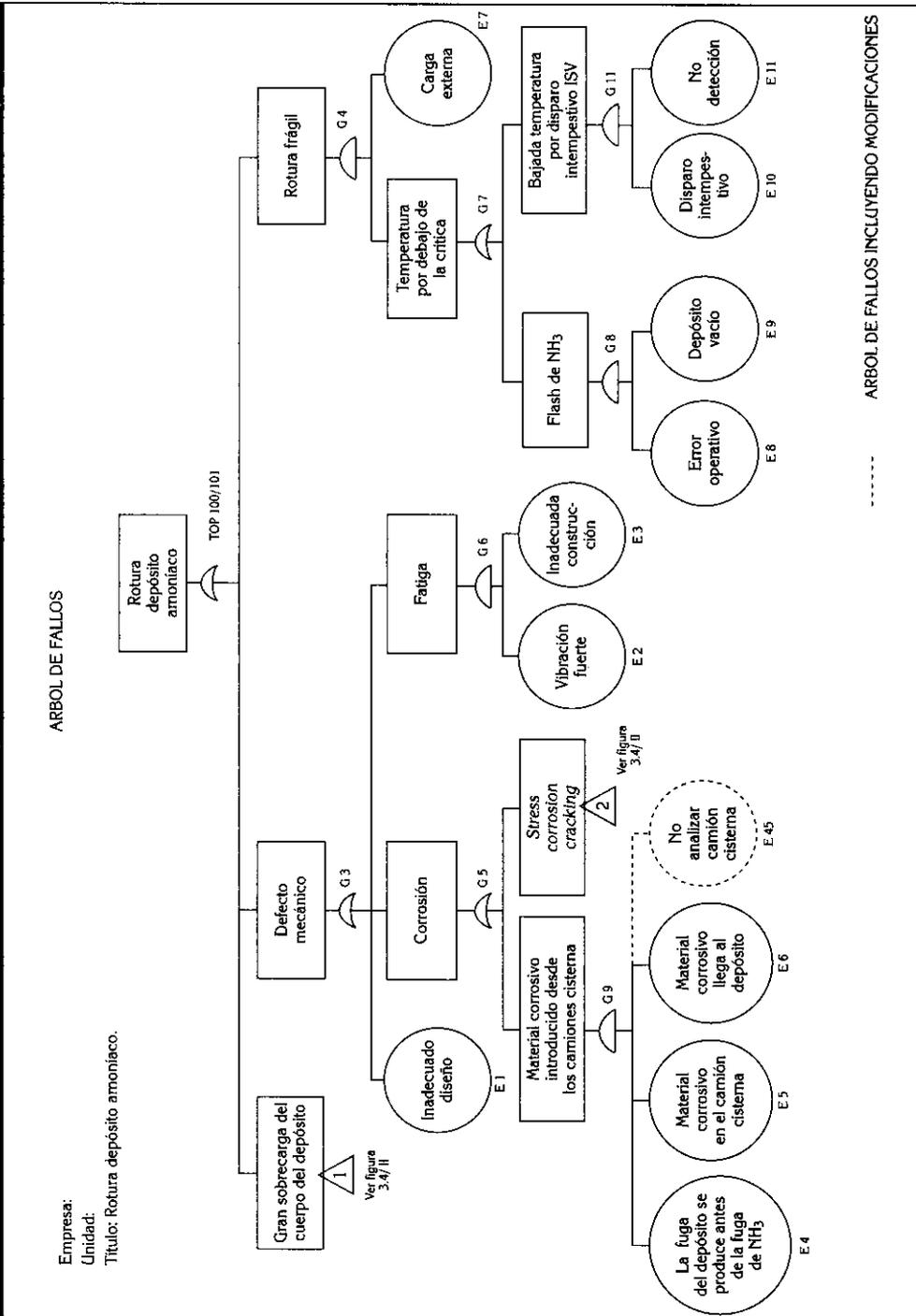


FIGURA 3.4/I. METODO DEL ARBOL DE FALLOS. EJEMPLO: ARBOL DE FALLOS DE ROTURA DEL DEPOSITO DE AMONIACO



**FIGURA 3.4/II METODO DEL ARBOL DE FALLOS.
EJEMPLO: ARBOL DE FALLOS DE ROTURA DEL DEPOSITO DE AMONIACO**

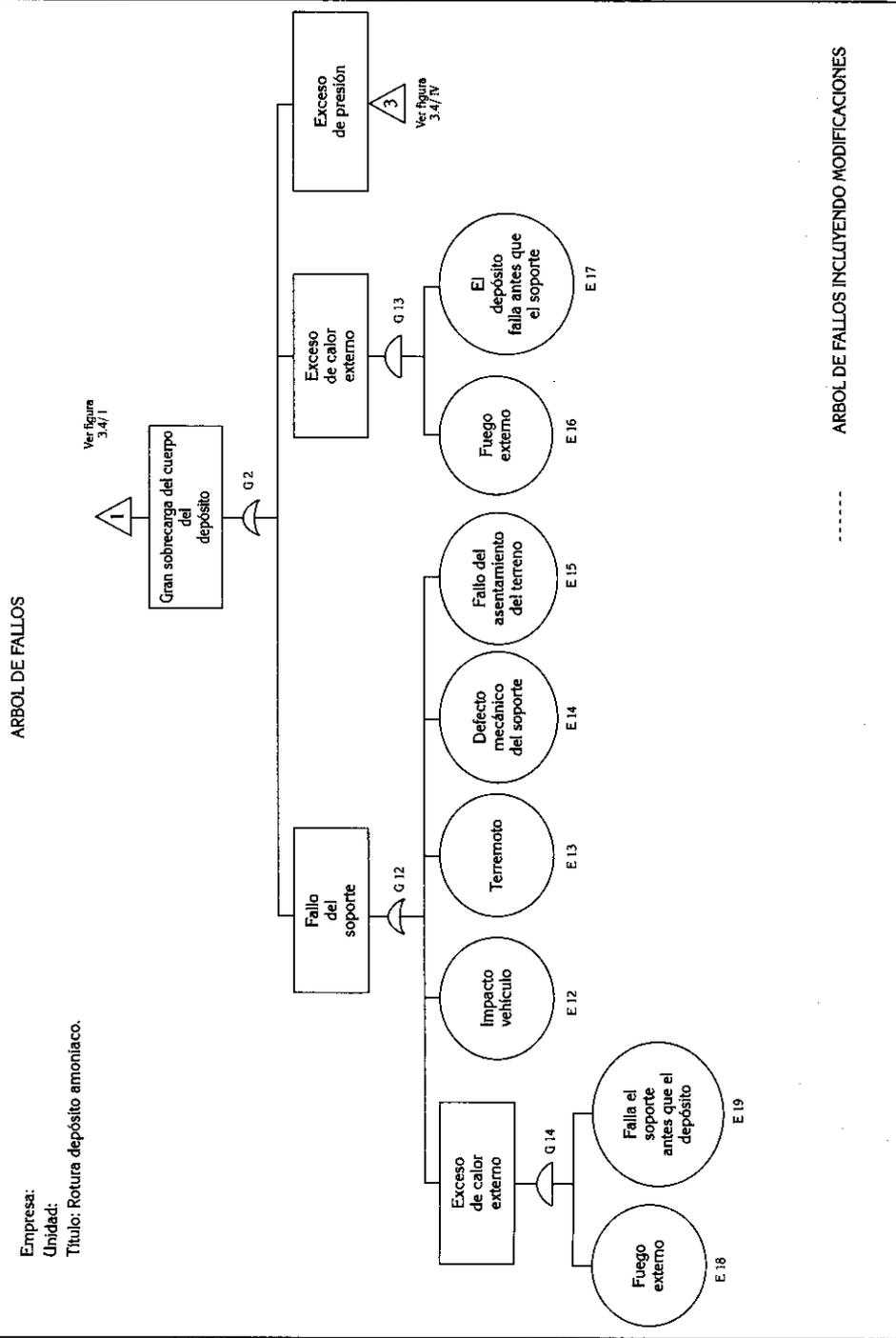
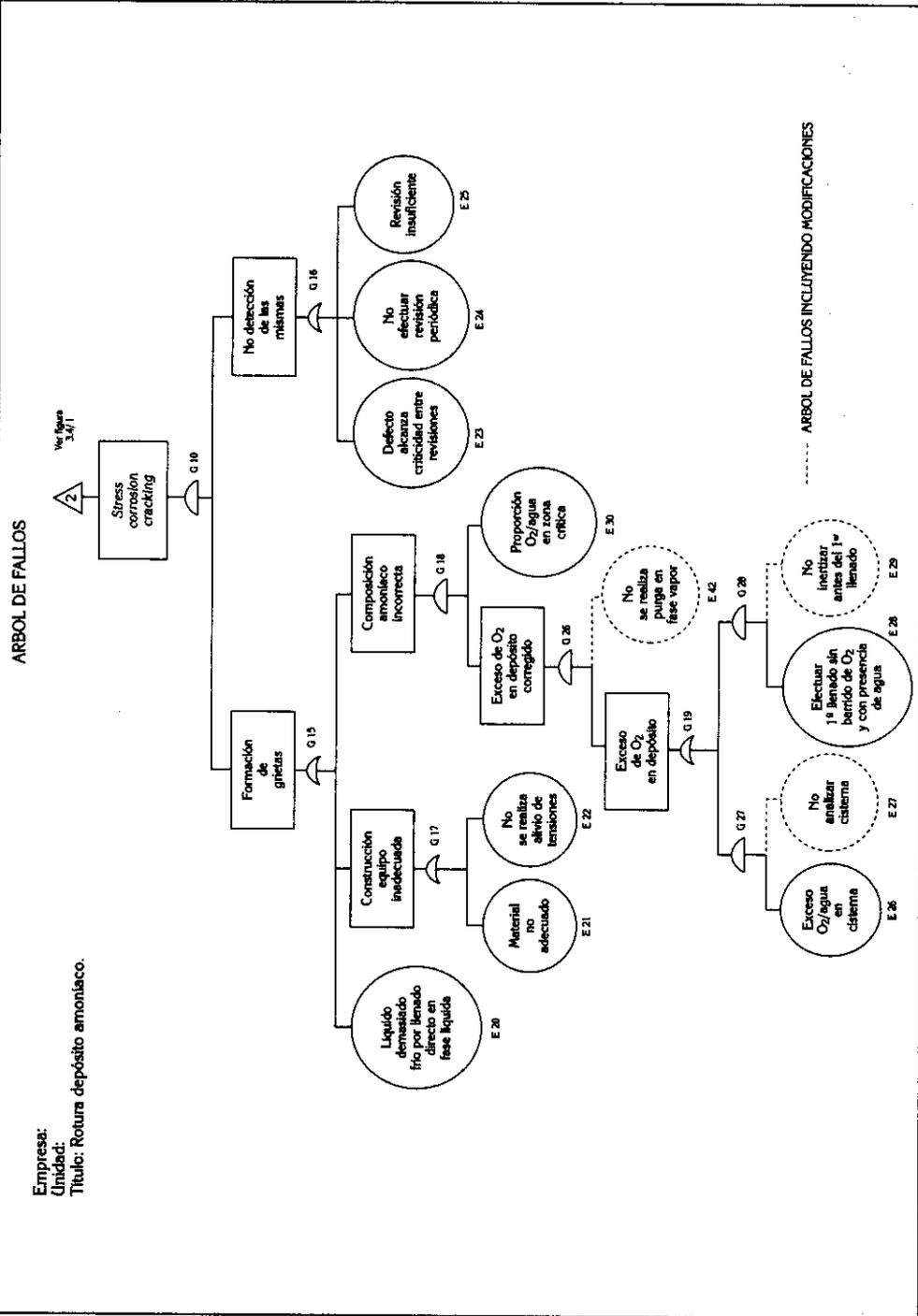
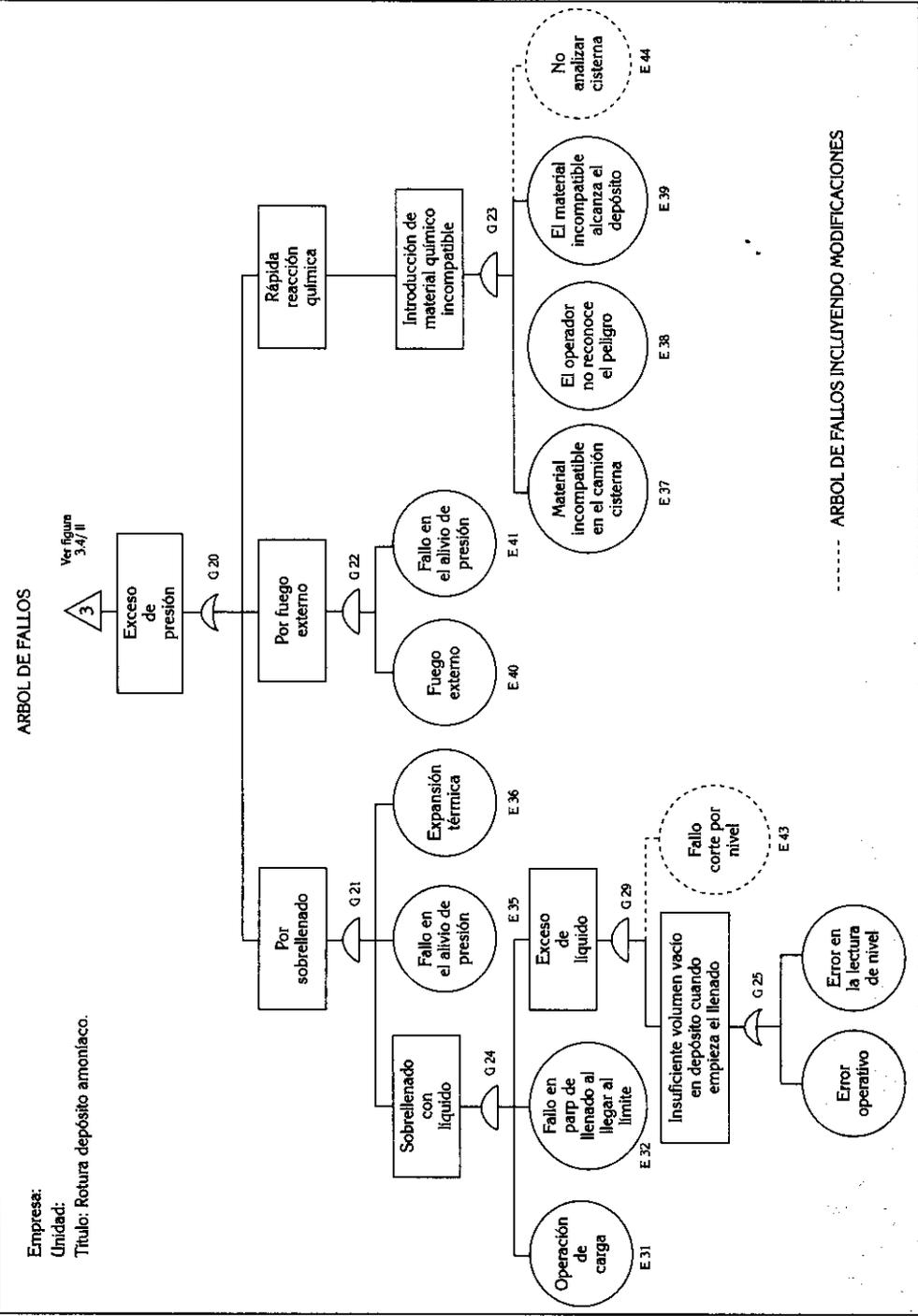


FIGURA 3.4/III METODO DEL ARBOL DE FALLOS.
EJEMPLO: ARBOL DE FALLOS DE ROTURA DEL DEPOSITO DE AMONIACO



**FIGURA 3.4/IV METODO DEL ARBOL DE FALLOS.
EJEMPLO: ARBOL DE FALLOS DE ROTURA DEL DEPOSITO DE AMONIACO**



Resultados cualitativos

La evaluación del árbol de fallos proporciona, desde el punto de vista cualitativo, la siguiente 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).

Orden	Minimal cut set (MCS)	Composición
1	E15 E14 E13 E1 E12 Número de MCS = 5	Fallo del asentamiento del terreno. Defecto mecánico del soporte. Terremoto. Inadecuado diseño del depósito. Impacto de vehículo.
2	E23 E21 E23 E22 E20 E23 E25 E22 E24 E21 E25 E21 E24 E22 E20 E25 E20 E24 E16 E17 E18 E19 E40 E41 E2 E3 Número de MCS = 13	Combinaciones de dos sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> . Incendio externo y fallo mecánico del depósito. Incendio externo y fallo mecánico del soporte. Incendio externo y fallo del de presión. Inadecuada construcción del depósito y vibración fuerte.
3	E37 E38 E39 E23 E30 E26 E23 E30 E28 E25 E30 E26 E25 E30 E28	Introducción de material incompatible al depósito, no detección, ni intervención del operador. Combinaciones de tres sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> .

3. Frecuencias de ocurrencia

Orden	Minimal cut set (MCS)	Composición
	E24 E30 E26 E24 E30 E28 E4 E5 E6 E7 E8 E9 E7 E10 E11 Número de MCS = 10	Introducción de material corrosión en el tanque; no detección ni intervención por parte del operador. Tanque vacío, error operativo con introducción de NH ₃ y carga externa. Disparo intempestivo de válvulas de seguridad con bajada de temperatura en el depósito y carga externa.
5	E35 E36 E32 E33 E35 E36 E31 E34 Número de MCS = 2	Rotura por sobrepresión debida a un sobrellenado

El número total de conjuntos mínimos (*minimal cut sets*) 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 cinco sucesos al mismo tiempo.

b) Descripción de las mejoras propuestas:

Las mejoras introducidas en el árbol son:

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. 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 3.4 mediante trazos discontinuos.

Con estas mejoras la distribución en conjuntos mínimos de fallos se modifica de la siguiente forma:

Orden	Minimal cut set (MCS)	Composición
1	E15 E14 E13 E1 E12 Número de MCS = 5	Fallo del asentamiento del terreno. Defecto mecánico del soporte. Terremoto. Inadecuado diseño del depósito. Impacto de vehículo.
2	E23 E21 E23 E22 E20 E23 E25 E22 E24 E21 E25 E21 E24 E22	Combinaciones de dos sucesos que conducen a rotura por <i>stress corrosion cracking</i> .

3. Frecuencias de ocurrencia

Orden	Minimal cut set (MCS)	Composición
	E20 E25 E20 E24 E16 E17 E18 E19 E40 E41 E2 E3 Número de MCS = 13	Incendio externo y fallo mecánico del depósito. Incendio externo y fallo mecánico del soporte. Incendio externo y fallo del alivio de presión. Inadecuada construcción del depósito y vibración fuerte.
3	E7 E8 E9 E7 E10 E11 Número de MCS = 2	Depósito vacío, error operativo con introducción de NH ₃ y carga externa. Disparo intempestivo de válvulas de seguridad con bajada de temperatura en el depósito y carga externa.
4	E37 E38 E39 <u>E44</u> E4 E5 E6 <u>E45</u> Número de MCS = 2	Introducción de material incompatible al tanque con detección, ni intervención del operador y fallo del análisis previo de material corrosivo/incompatible de la cisterna (E44, E45)
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).
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).

El número total de conjuntos mínimos (*minimal cut sets*) 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 se subrayan los componentes que corresponden a mejoras y que aumentan el orden de los conjuntos mínimos de fallos.

3.4 ARBOLES DE SUCESOS

3.4.1 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.

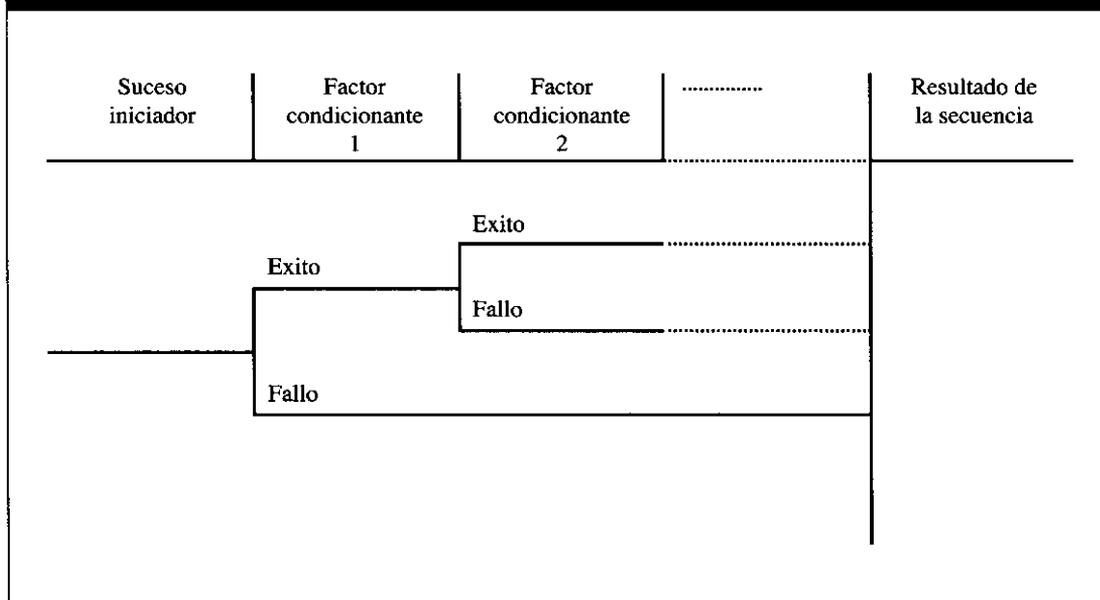
Partiendo del suceso iniciador y considerando los factores condicionantes involucrados, el árbol describe las secuencias accidentales que conducen a distintos eventos.

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 éstos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantean 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 3.5).

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.

FIGURA 3.5 METODO DEL ARBOL DE SUCESOS. ESQUIMA GENERAL



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.

La técnica así aplicada proporciona la lista de las secuencias accidentales posibles, número de elementos que la constituyen y tipo (éxito/fallo). De su estudio se podrán extraer las correspondientes conclusiones.

3.4.2 Ambito de aplicación

Utilizado para describir la evolución de sucesos iniciadores y definir así las secuencias accidentales.

3.4.3 Recursos necesarios

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

3.4.4 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 existen dependencias funcionales en la estructura).

3.4.5 Ventajas/inconvenientes

VENTAJAS

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

INCONVENIENTES

1. Si el árbol es grande su tratamiento puede hacerse laborioso.

3.4.6 Ejemplos

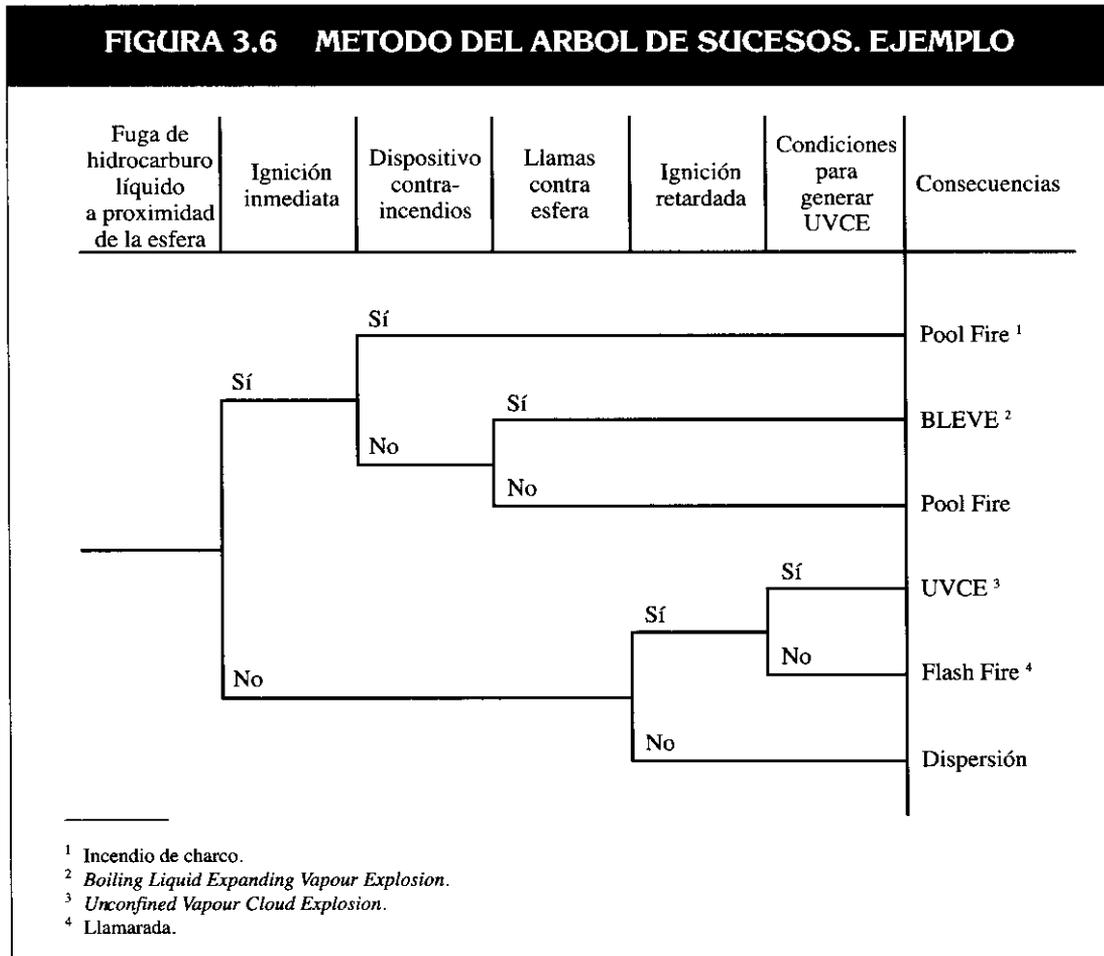
Se reseña a continuación un árbol de sucesos correspondiente al siguiente iniciador «Fuga de hidrocarburo líquido en proximidad de una esfera de GLP (gas licuado del petróleo)». Se estudian las distintas secuencias accidentales. Ver figura 3.6. Nótese que el peligro de BLEVE de la esfera también viene reflejado.

3.5 ANALISIS CAUSA-CONSECUENCIAS

Este método de análisis consiste en una combinación de árboles de fallos y árboles de sucesos. Posee la gran ventaja de la facilidad para ser usado como un buen recurso de comunicación, ya que los diagramas causa-consecuencia son extremadamente gráficos para mostrar las consecuencias de los accidentes postulados y causas elementales que los provocan.

3.5.1 Descripción

Como combinación de los métodos de árboles de fallos y árboles de sucesos descritos en los apartados 3.3 y 3.4 de esta Guía, respectivamente, el análisis



causa-consecuencia es un método cualitativo, pero que puede ser desarrollado, asimismo, en su vertiente cuantitativa estableciendo las probabilidades de cada accidente y determinando sus consecuencias.

Posee la gran ventaja que permite moverse «hacia delante» con la técnica de los árboles de sucesos y «hacia atrás» a través de los árboles de fallos. Todo ello apoyado en un diagrama que permite al analista una gran comodidad de movimientos frente al problema contemplado.

La resolución del diagrama causa-consecuencia es un listado de caminos críticos o secuencias de fallos (*minimal cut sets*) en línea de los determinados en

los árboles de fallos que muestran las secuencias accidentales que provocarán la consecuencia accidental indeseada.

El proceso de desarrollo de este método de análisis es el siguiente:

a) Selección de un suceso para ser evaluado:

Que puede ser, tanto un TOP indicado en los árboles de fallos, como un «suceso iniciador» de los árboles de sucesos.

En los correspondientes apartados se han comentado con profundidad ambos elementos básicos del análisis, por lo que no se repite en este punto su descripción.

b) Identificación de las funciones de seguridad y desarrollo de las secuencias accidentales:

Se desarrollan en paralelo, tanto la sucesión cronológica de sucesos, como los posibles fallos de los sistemas o funciones de seguridad existentes (sistemas de protección o prevención, actuaciones de los operadores, procedimientos, etc.).

Una primera diferencia entre el análisis causa-consecuencia y los árboles de sucesos es la simbología utilizada en los Diagramas.

El diagrama causa-consecuencia utiliza normalmente la simbología que se muestra en la figura 3.7.

En esta simbología destaca el símbolo de «toma de decisión adjunta».

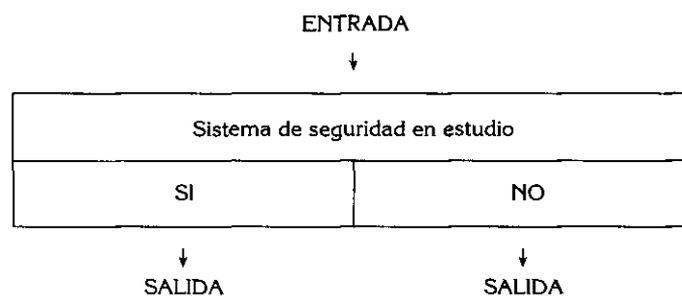
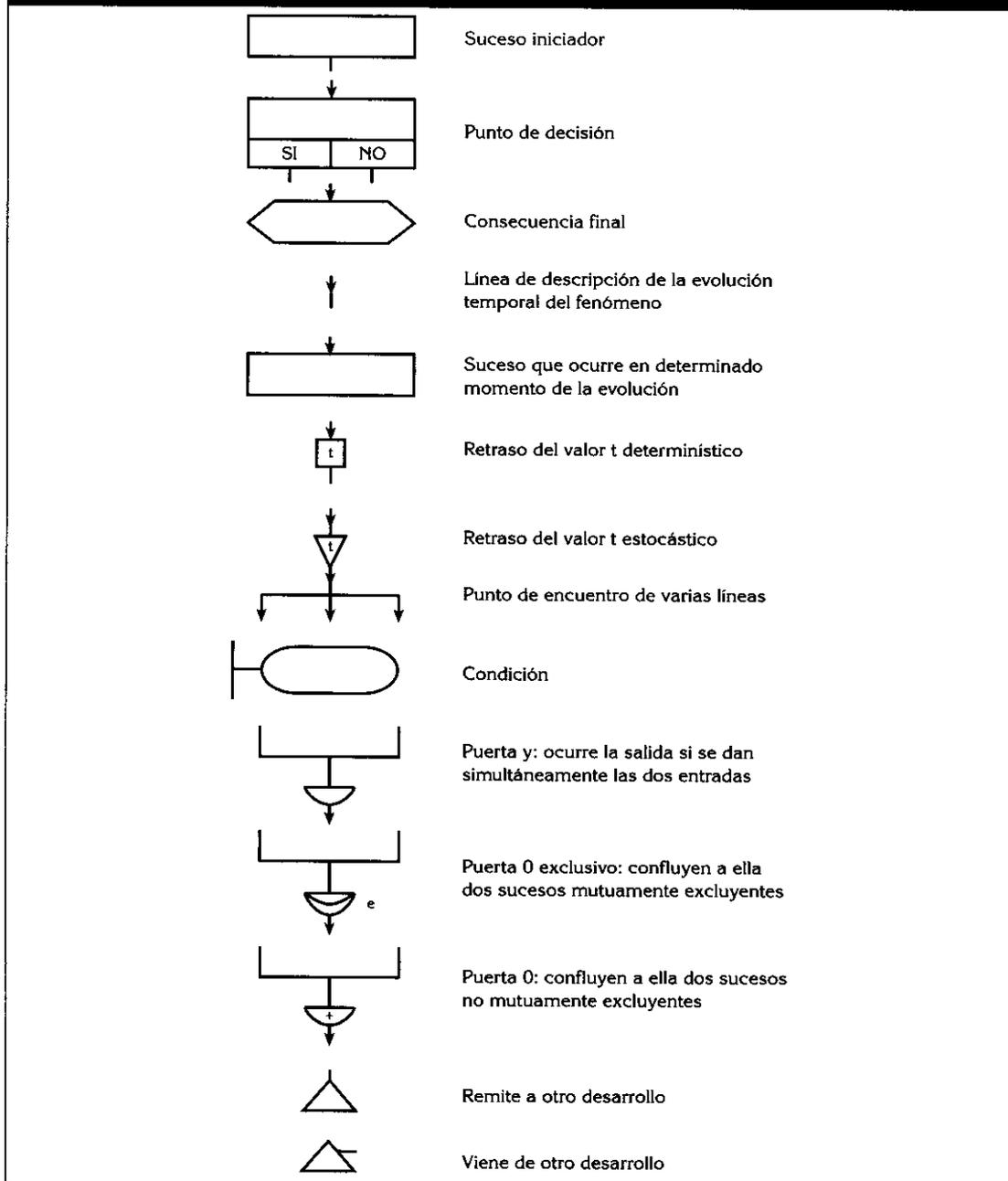


FIGURA 3.7 METODO DEL ANALISIS CAUSA/CONSECUENCIA. SIMBOLOGIA BASICA



Permite analizar el funcionamiento de un sistema de seguridad (cortinas de agua, por ejemplo) que debería actuar en un punto de la secuencia accidental. La operación correcta o incorrecta del sistema analizado conducirá a dos situaciones absolutamente diferentes. En el caso de operación de unas cortinas de agua accionadas frente a una fuga de gas tóxico para un confinamiento, el resultado de su correcta operación (SI) es el confinamiento de la fuga y, por lo tanto, la interrupción o disminución del suceso accidental. Si el sistema falló (NO), la nube de gas tóxico no se diluye y, por lo tanto, se extenderá fuera de los límites del confinamiento previsto.

- c) Desarrollo del suceso y de los fallos de funciones de seguridad para determinar las causas elementales:

Este paso consiste en la aplicación del análisis por árboles de fallos para cada uno de los sucesos iniciales o los fallos de funciones de seguridad identificados en el diagrama causa-consecuencia.

Es decir, cada fallo de las funciones de seguridad es utilizado, en definitiva, como un suceso iniciador o TOP en la técnica de los árboles de fallos descrita en el apartado 3.3.

No se reitera en este punto la técnica de desarrollo de los árboles de fallos y se remite al apartado correspondiente para conocer su desarrollo en detalle.

- d) Determinación de los conjuntos mínimos de fallo (*Minimal Cut Sets*) de las secuencias accidentales:

Emplea la misma técnica de determinación de los *Minimal Cut Sets* que se expone en los árboles de fallos.

Para cada secuencia accidental identificada en el diagrama, se determinan estos conjuntos mínimos de fallos que serán los caminos críticos que serán necesarios que ocurran para que se produzca el suceso final indeseado.

- e) Evaluación de resultados:

Los resultados de aplicación de los diagramas causa-consecuencia son evaluados en las siguientes etapas: en primer lugar se establece un orden decreciente entre las consecuencias evaluadas, en función de su gravedad y de su importancia para la seguridad del entorno y de las propias personas e instalaciones; posteriormente, en un segundo paso, para cada secuencia

accidental notable, se establece una clasificación de caminos críticos de fallo (*Minimal Cut Sets*) para determinar los fallos elementales o causas más importantes que puedan provocar los accidentes postulados.

3.5.2 Ambito de aplicación

Vista la gran semejanza entre el diagrama causa-consecuencia y las técnicas de árboles de fallos y árboles de sucesos, es claro que el ámbito de aplicación es idéntico en los casos mencionados.

En este sentido, es indudable que el momento más óptimo de aplicación de un análisis como el comentado es en la etapa de diseño y proyecto de cualquier instalación, lo que facilitará enormemente la implantación de las recomendaciones derivadas del estudio. Esta mayor viabilidad comentada no excluye, sin embargo, su aplicación en instalaciones existentes para evaluar en profundidad los sistemas de seguridad existentes.

3.5.3 Recursos necesarios

Como conjunción de los métodos de árboles de fallos y árboles de sucesos, está claro que para el desarrollo de este tipo de análisis es necesaria una persona con conocimiento profundo de aplicación de las técnicas que ambos métodos requieren.

El resto de miembros del equipo deben conocer con probada experiencia las posibles interacciones entre los sistemas, equipos o elementos incluidos en el desarrollo del análisis.

Ello supone un equipo multidisciplinar en línea de los comentados como necesarios para el desarrollo del HAZOP u otros análisis semejantes.

En función de la complejidad de la instalación en estudio, y del nivel de detalle de los árboles de fallos exigido, el desarrollo de un estudio como el descrito puede implicar varios meses de dedicación del equipo de trabajo.

3.5.4 Soportes informáticos

En este caso es absolutamente necesario el apoyo en sistemas informáticos que faciliten los cálculos tanto de consecuencias accidentales como de desarrollo de los árboles de fallos o sucesos. La mayoría de los paquetes informáticos que permiten el tratamiento de los árboles de fallos suele ofrecer también un módulo para el estudio de los diagramas de causa-consecuencia.

3.5.5 Ventajas/Inconvenientes

Este método condensa las técnicas de árboles de fallos y de sucesos y se obtienen resultados que pueden ser seguidos fácilmente de forma gráfica.

Exige mayor control sobre su aplicación que las técnicas individualizadas de árboles de fallos y sucesos.

3.5.6 Ejemplos

En la figura 3.8 se presenta un ejemplo de aplicación del método.

El ejemplo publicado en la revista *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* (Department of Chemical Engineering, South Bank Polytechnic, Borough Road, London SE10AA, UK) corresponde a un análisis de riesgo en molinos de pulpa de sulfatos.

El problema medioambiental que se deriva de la operación normal de estas plantas consiste en el escape de gases irritantes y malolientes. El diagrama de la citada figura estudia en qué circunstancias y cuáles pueden ser las consecuencias de un quemado insuficiente de los gases de salida en el horno.

Se ponen de manifiesto las siguientes consecuencias:

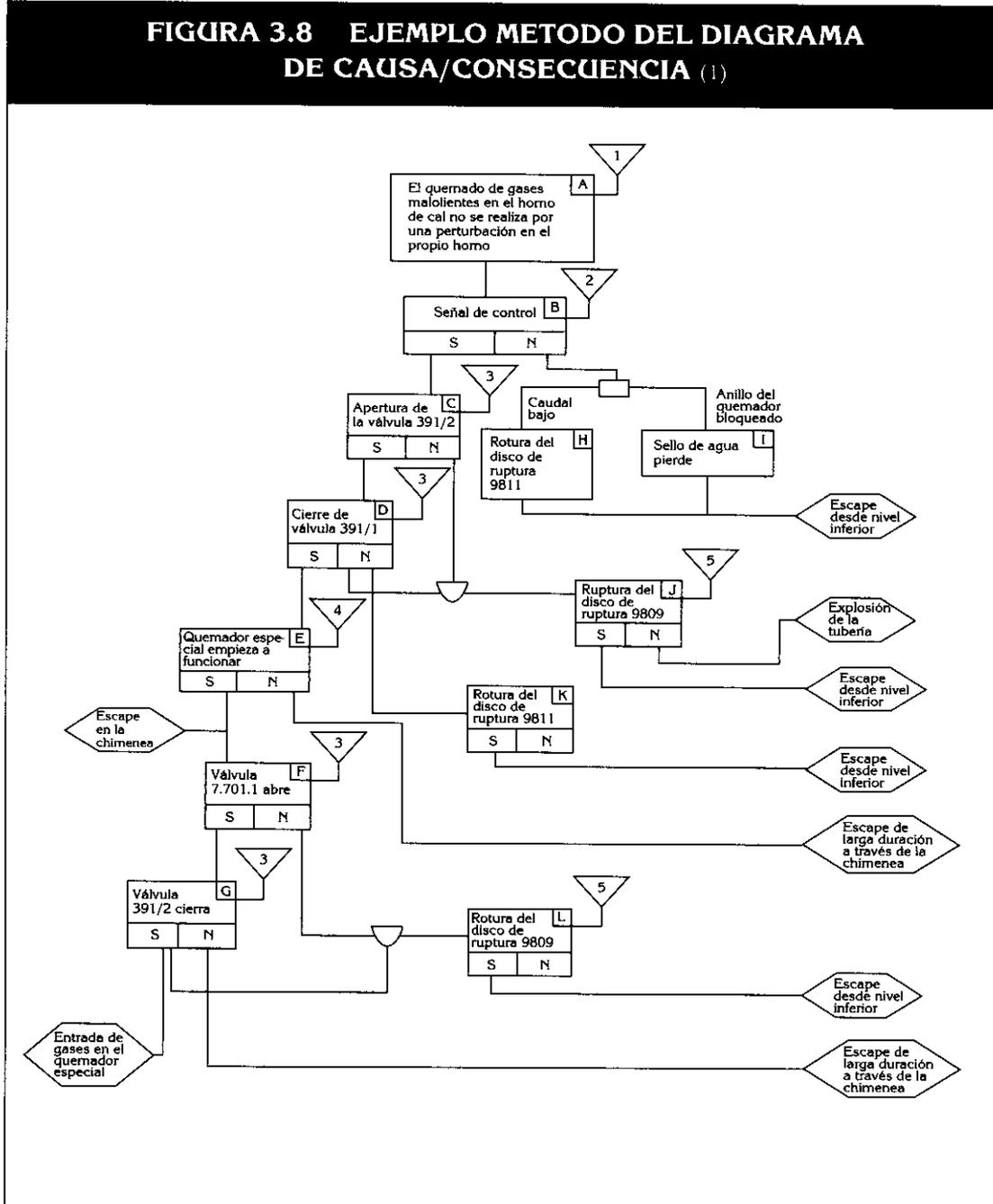
- Escape de gases por la chimenea (de larga o corta duración).
- Gases alimentan al quemador especial.
- Escape a baja altura.
- Rotura del disco.
- Explosión de tubería.

Cada suceso de la secuencia viene representada mediante una letra mayúscula.

Los triángulos numerados remiten a unos árboles de fallos donde se estudia con mayor detalle cada uno de los sucesos.

El estudio de las secuencias permite obtener de forma cualitativa los sucesos que condicionan su ocurrencia.

FIGURA 3.8 EJEMPLO METODO DEL DIAGRAMA DE CAUSA/CONSECUENCIA (1)



(1) Extraído de la revista *Journal of Loss Prevention Process Industry*, 1992, vol. 5, núm. 5.

3.6 RESUMEN

En la tabla 3.5 se resumen las características de los métodos descritos en este capítulo.

Método	Ambito de aplicación	Recursos humanos/materiales/	Soportes informáticos	Ventajas	Inconvenientes
UCSIP	En los casos en que no se requiera un estudio exhaustivo de las causas de los accidentes.	Buen conocimiento del método.	Se publica en soporte informático.	Resultados fácilmente obtenibles.	No hay un estudio completo de causas.
Clasificación cualitativa	Estudio preliminar.	Gran experiencia en su uso.	-	Útil para instalaciones con muchos equipos.	Subjetividad del analista si no tiene suficiente experiencia.
Arbol de fallos	Sucesos complejos con muchos elementos distintos.	Analista debe conocer bien el método. Requiere excelente conocimiento del sistema al cual se aplica y toda la documentación necesaria.	Existen muchos códigos de ordenador para el tratamiento analítico del árbol de fallos.	Evidencia puntos débiles del sistema. Permite conocer a fondo el sistema.	Ofrece orientación sobre la frecuencia del suceso sobre la base del número de causas que lo pueden producir.
Arbol de sucesos	Descripción de la evolución de sucesos iniciadores.	Poco laboriosa.	Existen códigos para el tratamiento de árboles de sucesos muy complejos con dependencias funcionales.	Estudio sistemático de un suceso. Fácil de aplicar.	Tratamiento complejo si el árbol es grande.
Causa/Consecuencia	Investigar conjuntamente las causas de un accidente y la evolución.	Buen conocimiento del método y del sistema sobre el que se aplica.	Es imprescindible.	Condensa los resultados obtenidos mediante a fallos y a eventos.	Es de aplicación más compleja que las técnicas de a fallos y a eventos por separado.

4.1 INTRODUCCION

La evaluación cualitativa o mejor semicualitativa de los alcances de consecuencias de accidentes se basa normalmente sobre métodos simplificados de cálculo que contemplan la aceptación de criterios sencillos para la determinación de los tipos de accidentes posibles y sus alcances.

4.2 INDICES DE GRAVEDAD

4.2.1 Método UCSIP

4.2.1.1 Descripción

El método UCSIP, que ya se comentó en el apartado correspondiente a los índices de frecuencias, permite calcular también unos índices de gravedad.

De hecho, para definir los índices de frecuencias, también era necesario conocer estos índices de gravedad.

En el método UCSIP, del cual conviene remarcar de nuevo que se reseña más por motivos históricos que por su uso que ha sido poco extenso, la gravedad de un suceso viene determinada por dos elementos, las consecuencias que de él se derivan y daño potencial que puede causar.

Se utiliza una escala creciente de la gravedad, graduada en seis niveles:

- *Nivel 0*: Consecuencias nulas. Caracteriza los sucesos que ocurren normalmente durante el funcionamiento del sistema.
- *Nivel 1*: Consecuencias menores. No hay pérdida sensible en la capacidad de la instalación, ni interrupción de la operación, ni heridas a personas, ni daños notables a los bienes o a las instalaciones.
- *Nivel 2*: Consecuencias significativas. Hay pérdida significativa de la capacidad de la instalación, pudiendo representar la detención de la operación normal. No hay heridas a las personas ni daños notables al sistema o a los bienes. Este nivel implica riesgos muy limitados en alcance e importancia.

-
- *Nivel 3:* Consecuencias críticas. Pueden haber heridas a las personas y/o daños notables al sistema o a los bienes. Este nivel comporta daños limitados a la unidad que incluye el sistema accidentado.
 - *Nivel 4:* Consecuencias catastróficas con efectos limitados a la instalación industrial. Hay destrucción del sistema o de los sistemas vecinos, y/o varios heridos, y/o varios muertos.
 - *Nivel 5:* Consecuencias críticas o catastróficas en las que los efectos sobrepasan los límites de la instalación industrial. Además de los descritos anteriormente, hay daños a las personas, a los bienes o a los sistemas exteriores a la instalación industrial.

La asignación del nivel de gravedad se basa sobre el empleo de un esquema lógico dividido en seis diagramas. El seguimiento del esquema proporciona, según las características del sistema al cual se aplica, las ecuaciones a utilizar para calcular las distintas consecuencias y los criterios para asignar NG según el efecto considerado. El valor de NG resultante es el máximo obtenido. Las ecuaciones o de correlaciones altas que recurre el método son simplificadas en sentido conservador o tendentes a sobreestimar las magnitudes.

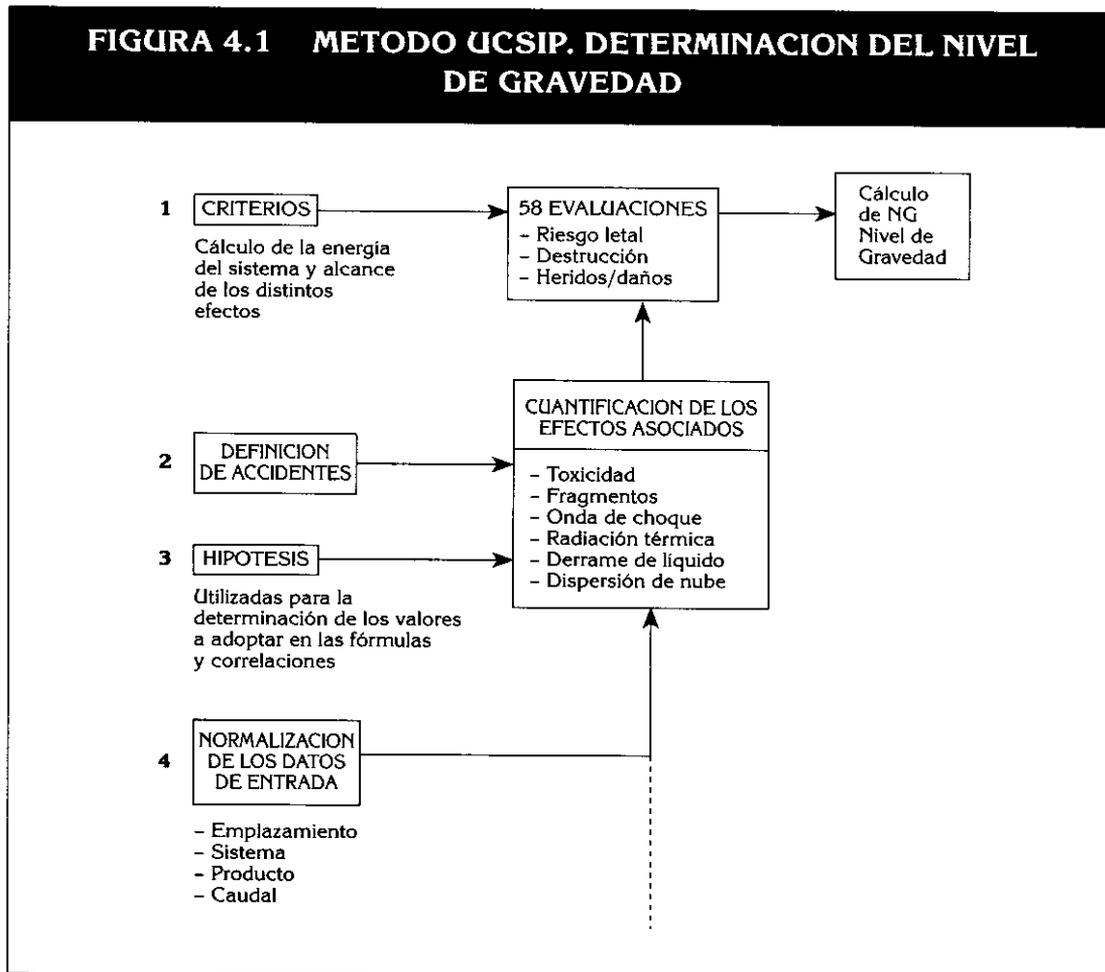
Esta fase de asignación del nivel de gravedad se articula en torno a cuatro puntos claves que se reseñan en la figura 4.1.

1. CRITERIOS. La asignación del nivel de gravedad de un sistema depende básicamente de:
 - la energía potencial del sistema
 - el alcance de los efectos asociados a un accidente.

Desde el punto de vista de la energía de un sistema el método adopta como patrón de referencia al equivalente energético de un sistema disipado en ondas de sobrepresión positiva resultante de una explosión no confinada (UVCE) (1). De ahí que no se consideran los sistemas con menos de 100 kg de hidrocarburos porque no existe, en la bibliografía especializada, casos históricos de accidentes graves registrados en estas condiciones. Sin embargo, se consideran dos excepciones:

(1) *Unconfined Vapour Cloud Explosion.*

4. Alcances de consecuencias accidentales



- El producto presenta cierta toxicidad.
- Para fragmentos, el nivel de energía letal adoptado es de 100 julios.

Desde el punto de vista del alcance de los efectos asociados a un accidente, el método considera tres tipos de daños:

- Riesgo letal.
- Posibilidad de rotura de componentes, equipos o sistemas como consecuencia del accidente calculado.
- Heridas y daños a los bienes.

Los umbrales que fija el método para cada uno de estos casos son los reseñados en el siguiente cuadro.

Consecuencia	Sobrepresión (bar)	Radiación térmica (kW/m ²)	Impacto J	Toxicidad
Riesgo letal	0,7	23,25	102	(CTL) (1)
Rotura de componentes equipos o sistemas	1,1	238	3,7.10 ⁻⁵	VLE (2)
Heridos o daños materiales	0,08	11,63		

El método establece 58 correlaciones o fórmulas para determinar distintos valores intermedios/finales del cálculo de consecuencias.

2. DEFINICIÓN DE ACCIDENTES. La ocurrencia de fenómenos físicos no deseados (causas), conlleva efectos físicos (consecuencias) que pueden ocurrir solos o en combinación. El método considera como causas básicas de accidentes los cuatro siguientes casos:

- 1) Rotura de un sistema que transfiera un líquido a presión (en fase líquida, gas o bifásico).

Engloba componentes como; bombas, compresores, válvulas, tuberías, etc.

- 2) Estallido de un equipo a presión (por sobrepresión o a la presión de servicio).

Engloba componentes como columnas de fraccionamiento, reactores, etc.

- 3) Pérdida de confinamiento de un tanque/depósito.

Engloba los de techo fijo, flotante, esferas, cilindros de GLP, etc.

- 4) Rotura de un equipo en rotación.

Incluye acoplamientos, compresores alternativos, etc.

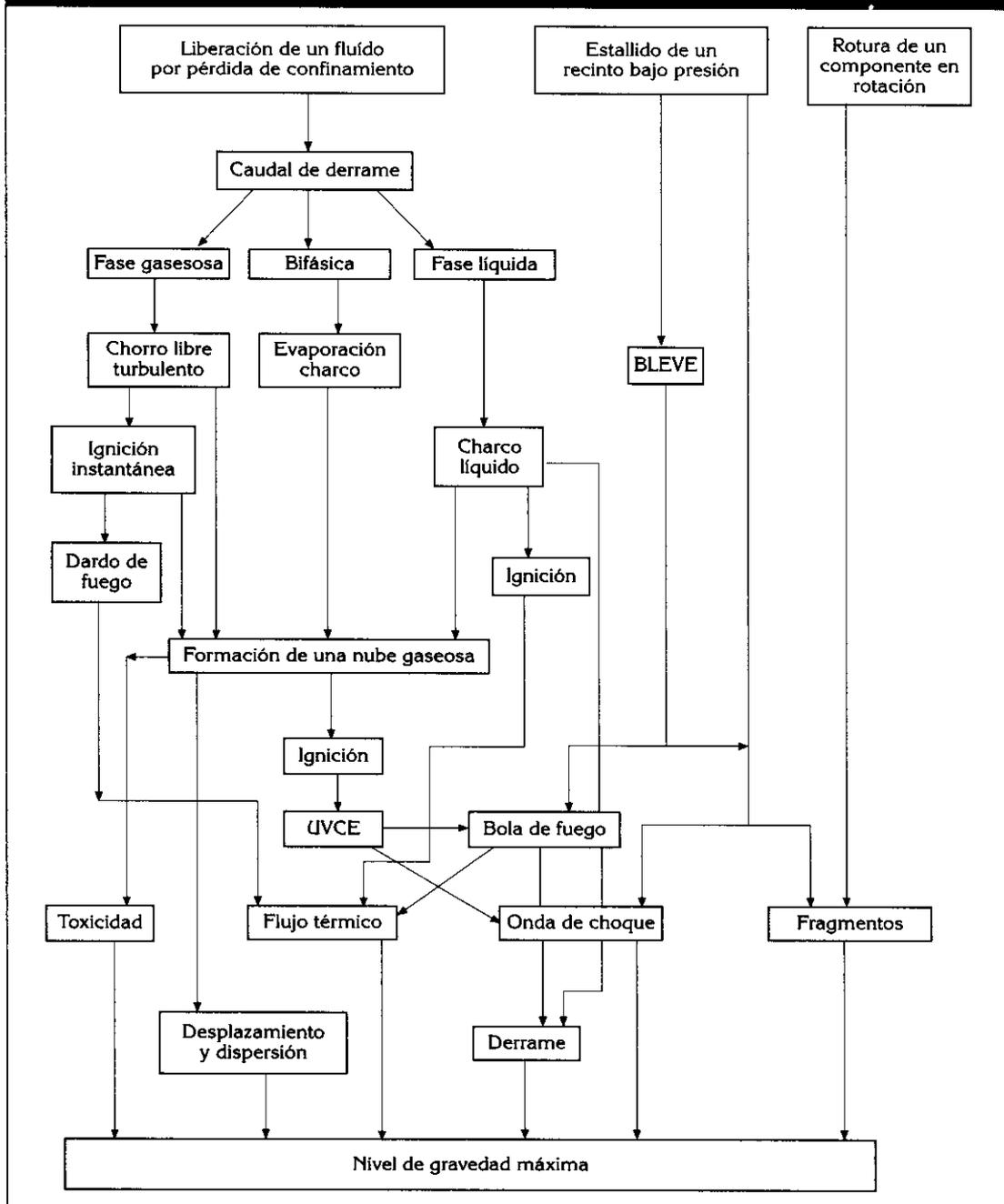
Estos sucesos y consecuencias son los representados en la figura 4.2.

(1) CTL: Concentración Tóxica Letal (mg m⁻³ mm).

(2) VLE: Valor Límite de Explosión (mg m⁻³).

4. Alcances de consecuencias accidentales

FIGURA 4.2 METODO UCSIP. DEFINICION DE LOS ACCIDENTES



En el caso de liberación de un fluido por pérdida de confinamiento (caso 3) los pasos sucesivos en el cálculo de consecuencias que conducen al accidente final a considerar son:

- Cálculo del caudal de derrame.
- Según el estado del fluido se consideran tres casos: fase gaseosa, bifásica o líquida.
 - a) En el caso de una fuga en fase gas se produce un chorro libre. Si el producto es inflamable se puede producir la ignición inmediata y el consiguiente dardo de fuego con la radiación térmica asociada que condicionará el nivel de gravedad.
Si no se produce una ignición inmediata se forma una nube de gas que según las características del producto liberado puede dar lugar a:
 - Efectos tóxicos.
 - Desplazamiento y dispersión de la nube.
 - Ignición retardada y no confinada (UVCE) con los efectos de bola de fuego y onda de choque asociada que condicionarían el nivel de gravedad.
 - b) En el caso de una fuga en fase bifásica el fenómeno a estudiar es la evaporación del charco y el estudio de la nube de gas generada sigue las mismas pautas que en el caso anterior.
 - c) En el caso de fuga en fase líquida el charco líquido puede incendiarse si el producto es inflamable con el consiguiente efecto de flujo térmico. El tratamiento del gas evaporado sería el citado anteriormente.

En el caso de un estallido de un recinto bajo presión (casos 1 y 2) el efecto de BLEVE puede conducir a: formación de una bola de fuego, ondas de choque y producción de fragmentos que condicionarán el factor de gravedad.

En el caso de rotura de componente en rotación (caso 4) el efecto considerado es el de producción de fragmentos.

Las consecuencias finales que trata el método son:

- a) Toxicidad,
- b) Generación de proyectiles,

4. Alcances de consecuencias accidentales

- c) Sobrepresión por onda de choque,
 - d) Radiación térmica,
 - e) Derrame de líquido,
 - f) Dispersión de una nube de gas.
3. SELECCIÓN DE HIPÓTESIS que puedan conducir de forma conservadora a la cuantificación de las consecuencias; a reducir el número de variables en las ecuaciones o correlaciones utilizadas; a establecer un procedimiento de cálculo fácilmente ejecutable con o sin medios informáticos.

Son las relativas al:

- Entorno del sistema estudiado.
 - Desarrollo de los fenómenos físicos que conllevan determinados efectos físicos.
 - A la cuantificación de los efectos físicos.
4. NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA relativos al emplazamiento, a los equipos, al producto y al caudal de fuga de partida.

El método considera 9 tipos de equipos (tanque, depósito, bombas centrífugas,...). Para cada uno de ellos el método tiene tipificado un procedimiento de cálculo del caudal de fuga.

4.2.1.2 *Ambito de aplicación*

Este método encuentra su aplicación cuando no es necesaria una cuantificación detallada del alcance de la consecuencia del accidente. No permite, por lo tanto, dimensionar las zonas de intervención y alerta, aunque puede permitir fijar la categoría de los accidentes.

4.2.1.3 *Recursos necesarios*

Es necesario disponer de la descripción completa del método y es preciso un cierto grado de experiencia en su aplicación.

4.2.1.4 *Soportes informáticos*

UCSIP publica el método descrito en un soporte informatizado.

4.2.1.5 *Ventajas/Inconvenientes*

Precisa una menor dedicación de tiempo que la cuantificación mediante modelos de cálculo internacionalmente reconocidos, aunque la diferencia de dedicación difícilmente justifica las simplificaciones que se realizan en el proceso de cálculo.

Proporciona resultados excesivamente conservadores y no permite calcular unas distancias de afectación.

4.2.1.6 *Ejemplos*

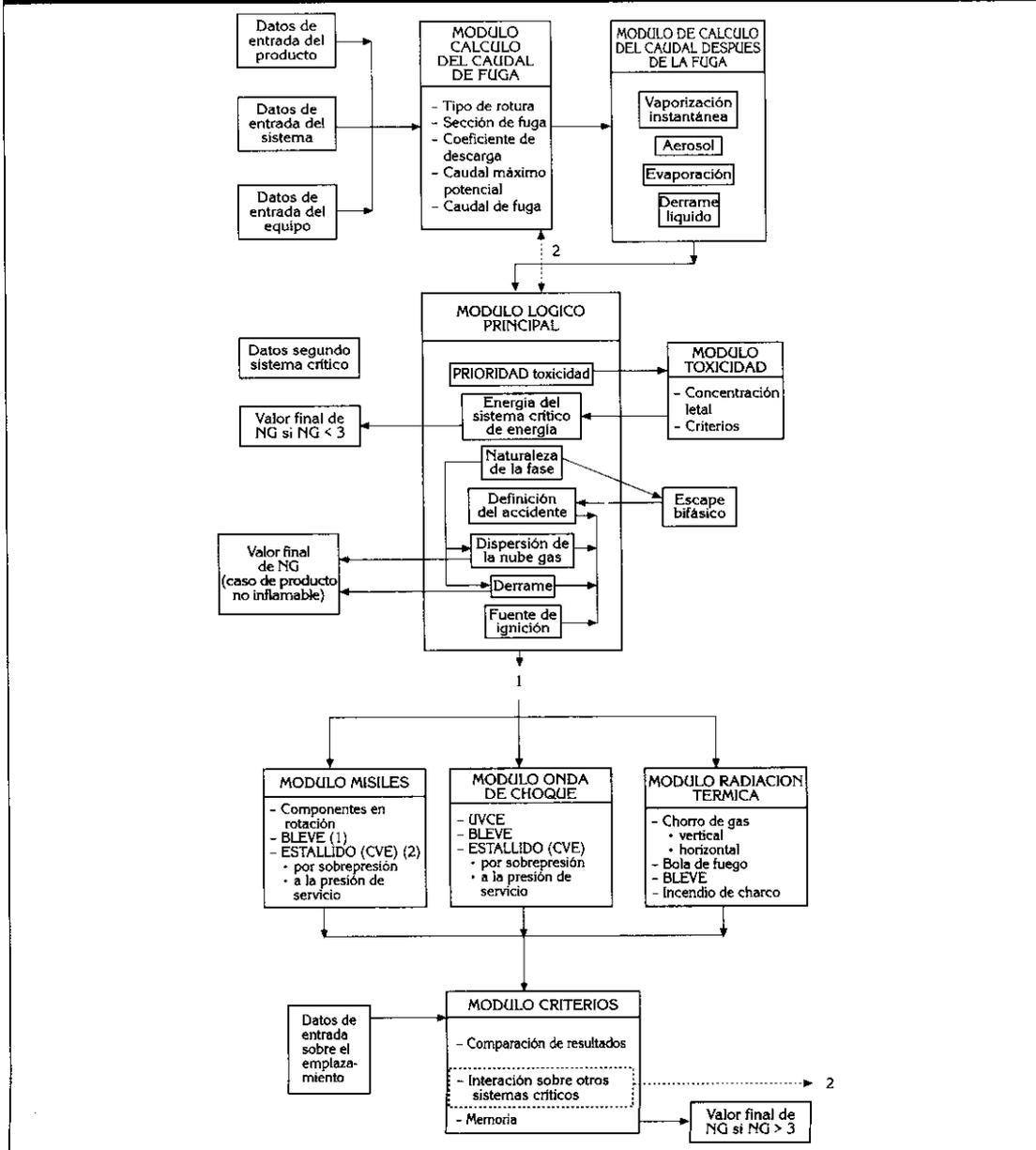
En la figura 4.3 se muestra, a modo de ejemplo, el diagrama lógico correspondiente al procedimiento de cálculo del método.

Este diagrama presenta seis módulos de cálculo:

- Módulo de cálculo del caudal de fuga. Este módulo recibe la información relativa al producto, sistema o equipo. Con esta información determina según el tipo y sección de la rotura el caudal de fuga.
- Módulo de cálculo del caudal después de la fuga. Este módulo según las características del producto determina: el caudal de gas que se evapora de forma instantánea por diferencia entre la temperatura de almacenamiento/proceso del producto y su punto de ebullición (*flash*); el arrastre de líquido que puede producirse en la evaporación instantánea (aerosol); el caudal de evaporación del charco formado y la cantidad de líquido residual en el charco.
- Módulo principal. Este módulo define el equipo o sistema, da prioridad al cálculo de la toxicidad, calcula la energía del sistema determina la dispersión de la nube e introduce los puntos de ignición. Por último, este módulo gobierna la ejecución de los restantes módulos.
- Los módulos de cálculo propiamente dichos son los correspondientes a toxicidad, escape bifásico, fragmentos, ondas de choque y flujo térmico. Calculan los correspondientes efectos.
- Por último, el módulo criterios compara los resultados obtenidos con la implantación (distancias del equipo al límite de la instalación u otro equipo). Se asigna el valor de NG y se procesa a continuación el equipo o sistema más crítico con respecto del estudiado (efecto dominó).

4. Alcances de consecuencias accidentales

FIGURA 4.3 METODO UCSIP. ESQUEMA LOGICO DE ASIGNACION DE NG



- (1) *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion.*
 (2) *Confined Vapour Explosion.*

4.2.2 Otros métodos

4.2.2.1 Descripción

Estos métodos recurren a una asignación directa de la severidad de las consecuencias por comparación con casos tipo ya resueltos, son métodos muy poco precisos y en el mejor de los casos sirven para fijar un orden de magnitud de los daños esperados.

Su aplicación conduce, por ejemplo, a una clasificación de las consecuencias de una fuga tóxica en las siguientes categorías:

- I. Baja (2): Las concentraciones esperadas de sustancia química en los alrededores de la instalación son muy bajas. Se puede esperar afectaciones sólo para exposiciones durante largos períodos de tiempo o cuando afecta a personas con condiciones de salud precarias.
- II. Media: Las concentraciones esperadas de sustancia química en los alrededores de la instalación son suficientes para causar heridas o muertes a menos que se tomen medidas correctivas efectivas de forma rápida. Se pueden esperar víctimas mortales sólo para exposiciones durante largos períodos de tiempo o cuando afecta a personas con condiciones de salud precarias.
- III. Alta: Las concentraciones esperadas de sustancia química en los alrededores de la instalación son suficientes para causar muertes o heridos graves para exposiciones breves. Se puede esperar un gran número de personas afectadas.

4.2.2.2 Ambito de aplicación

Se puede emplear en un estudio preliminar como método de selección del tipo de consecuencia a evaluar con mayor detalle.

(2) Extraída de *Guidance for the preparation of the Risk Management and Prevention, program. Nov. 1989.*



4. Alcances de consecuencias accidentales

4.2.2.3 Recursos necesarios

La aplicación de estos métodos es sumamente subjetiva y precisa una gran experiencia en su realización.

4.2.2.4 Soportes informáticos

Normalmente no se utilizan soportes informáticos en la aplicación de esta técnica.

4.2.2.5 Ventajas/Inconvenientes

Puede ser un método de clasificación para instalaciones con gran número de equipos.

Para conseguir resultados coherentes, es necesaria gran experiencia al aplicar los criterios de clasificación.

4.2.2.6 Ejemplos

Aplicada la clasificación a una serie de hipótesis accidentales con productos tóxicos, se podría agrupar:

Hipótesis	Gravedad de las consecuencias	Observación
1. Fuga de butadieno por rotura de los cierres de una bomba de transvase.	I. (Baja)	El escape es muy reducido; puede ser fácilmente controlado por parada de la bomba y el producto es poco tóxico (2/4, según clasificación NFPA).
2. Rotura de una tubería de 1,5" de amoníaco.	II. (Media)	Siempre y cuando la intervención pueda ser rápida, se puede considerar como de gravedad media.
3. Pérdida completa del inventario de un tanque de almacenamiento de fluoruro de hidrógeno.	III. (Alta)	Escape importante de un producto muy tóxico.

4.3 RESUMEN

En la tabla 4.1 se resumen las características de los métodos descritos en este capítulo.

TABLA 4.1 METODOS PARA LA EVALUACION CUALITATIVA DEL ALCANCE DE CONSECUENCIAS

Método	Ambito de aplicación	Recursos humanos/materiales	Soportes informáticos	Ventajas	Inconvenientes
UCSIP	En los casos en que no se requiera una cuantificación del alcance de consecuencias.	Buen conocimiento del método.	Se publica en soporte informático.	Precisa una menor dedicación que el uso de modelos matemáticos, aun que difícilmente se justifique con esta diferencia de tiempo su uso.	Resultados conservadores. No se dan distancias de afectación.
Clasificación cualitativa	Estudio preliminar.	Gran experiencia en su uso.	-	Útil para instalaciones con muchos equipos.	Subjetividad del analista si no tiene suficiente experiencia.