

APUNTE SOBRE CÁLCULO Y DETECCIÓN DE RIESGOS

CICLO LECTIVO 2015 –

CÁLCULO Y DETECCIÓN DE RIESGOS

Introducción

La industria y los accidentes mayores

La rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y la industria química en particular, su gran crecimiento y, consecuentemente, el incremento de inventarios de productos químicos en las instalaciones y en diversos medios de transporte, han provocado un aumento de la probabilidad de que ocurran grandes accidentes con un notable impacto sobre personas, medio ambiente y equipo.

Estos riesgos se han puesto de actualidad en las últimas décadas, por desgracia, a causa de algunos accidentes de graves consecuencias. Concretamente 1984 registró tres de los accidentes más graves de la historia: Sao Paulo (rotura de una conducción de gasolina, 800 muertos), Ciudad de México (explosión e incendio de un parque de almacenamiento de GLP, 450 muertos) y Bhopal (escape de gas con formación de una nube tóxica, 3.000 muertos). En 1989 la explosión de una gran nube de gas - probablemente la mayor de la historia - procedente de un escape, provocó la muerte de aproximadamente 1.000 personas en los Urales. Respecto al impacto ambiental, 1986 registró un grave episodio de contaminación en el Rin originado por el incendio de una industria química.

Recientemente se ha llevado a cabo un análisis histórico (VILC95) sobre un total de 5.325 accidentes ocurridos en la industria química y en el transporte de mercancías peligrosas (correspondientes a 6.168 registros del banco de datos MHIDAS), desde principios de siglo hasta julio de 1992.

La distribución en el tiempo de los 5.325 accidentes está representada en la figura 1.1.

A pesar de que el hecho de abarcar un período de tiempo tan amplio puede implicar la aparición de efectos difíciles de evaluar, como por ejemplo el crecimiento de la industria química a lo largo del tiempo, un análisis de este tipo resulta muy interesante pues proporciona una visión completa de la evolución de los diferentes aspectos del riesgo asociado a materiales peligrosos.

Puede observarse un incremento progresivo (cada vez más importante) en el tiempo: aproximadamente el 95% de los casos corresponden a los últimos 30 años. Ello debe atribuirse tanto a un mayor acceso a la información sobre accidentes, como al desarrollo de la actividad industrial en muchos países y el consiguiente incremento del transporte de productos peligrosos.

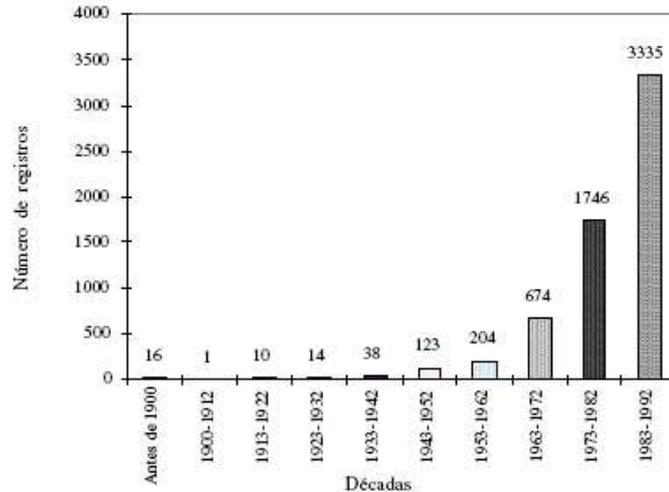


Fig. 1.1 Distribución de los accidentes en el tiempo

Con relación al tipo de accidente, en la tabla 1.1 puede verse el tratamiento estadístico. La base de datos utilizada clasifica los accidentes en cuatro tipos diferentes: escape, fuego, explosión y nube de gas.

La segunda parte de la tabla muestra la distribución de los accidentes donde estaban implicados al menos uno de estos cuatro tipos: como en un mismo suceso pueden darse dos de ellos, la suma de los porcentajes es superior a 100.

Hubo un escape en más del 50% de los casos; el incendio (44%) fue el más frecuente del resto de accidentes, seguido por la explosión (36%) y la nube de gas (12%).

Tabla 1.1 Tipos de accidentes

	Núm. de accidentes	% del total
Accidentes de tipo conocido	5.921	96,0
Accidentes de tipo desconocido	247	4,0
	Núm. de accidentes	% de tipo conocido
Escape	3.022	51,0
Incendio	2.603	44,0
Explosión	2.133	36,0
Nube de gas	719	12,1

Por lo que se refiere al tipo de actividad o instalación donde ha ocurrido el accidente, la información se ha resumido en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Origen de los accidentes

	Núm. de registros	% sobre el total
Origen general conocido	5.992	97,2
Origen general desconocido	176	2,8
	Núm. de registros	% de origen conocido
Transporte	2.341	39,1
Plantas de proceso	1.469	24,5
Plantas de almacenamiento	1.044	17,4
Carga/descarga	494	8,2
Doméstico/comercial	348	5,8
Almacenamiento de sólidos	225	3,8
Almacenamiento de residuos	71	1,2
	Núm. de registros	% sobre el tipo
Transporte		
Transporte por ferrocarril	622	26,5
Transporte por carretera	510	21,8
Contenedores móviles	371	15,8
Tuberías	360	15,4
Barcos	299	12,8
Barcazas	89	3,8
Otros orígenes	32	1,4
No definido	58	2,5
Plantas de proceso		
Recipientes de proceso	258	17,5
Tuberías de proceso	231	15,7
Reactores	205	14,0
Bombas/compresores	71	4,8
Cambiadores de calor	52	3,5
Contenedores móviles	41	2,8
Equipos contra incendios	32	2,2
Recipientes a presión atmosférica	29	2,0
Equipos de tratamiento de sólidos	17	1,2
Otros orígenes	42	2,9
No definido	491	33,3
Plantas de almacenamiento		
Recipientes a presión atmosférica	499	47,9
Contenedores móviles	177	16,9
Recipientes a presión	138	13,2
Tuberías	49	4,7
Almacenamiento de sólidos	23	2,2
Otros orígenes	40	3,8
No definido	118	11,3

El origen era conocido en 5.992 casos (97% de los registros del banco de datos utilizado). Puede observarse cómo la contribución más importante corresponde a los accidentes ocurridos en el transporte, con un 39% de los casos, seguido por las plantas de proceso, con un 24,5%, y las instalaciones de almacenamiento de líquido/gas (17,4%); en operaciones de carga y descarga (cisternas, etc.) encontramos un 8%. Éstas son las cuatro contribuciones más importantes.

Los otros apartados de la tabla muestran la distribución de accidentes en el transporte, en las plantas de proceso y en las plantas de almacenamiento. Un dato significativo es que el número de accidentes en el transporte por tren (26,5%) es más elevado que en el transporte por carretera (21,8%). Por lo que se refiere a los accidentes ocurridos en plantas de proceso, las contribuciones más importantes corresponden a recipientes de proceso (17,5%), tuberías (15,7%) y reactores (14%).

Finalmente, en plantas de almacenamiento, el 48% de los casos ocurrieron en depósitos a presión atmosférica, el 17% en contenedores móviles y el 13% en depósitos a presión.

Finalmente, la figura 1.2 muestra el número de víctimas como consecuencia de los accidentes de cada categoría arbitraria (0 fallecidos, 1-10 fallecidos, etc.): el valor más alto, más de 1.000, corresponde al accidente ocurrido en Bhopal (1984).

Los valores entre paréntesis indican el porcentaje de accidentes en los cuales esta información es conocida. Sólo el 55% de todos los registros del banco de datos indicaban el número de fallecimientos causados por el accidente; el resto no daba ninguna explicación. En el 59% de los registros en que se daban detalles, no hubo víctimas mortales; en los que sí las hubo, la mayor parte corresponden a la categoría 1-10 muertos (1.173 registros, 35% del total y 84% de los registros que implican fallecimientos). En muy pocos casos hubo más de 100 muertos (26 registros, 0,8% del total y 2% de los registros que implican fallecimientos).

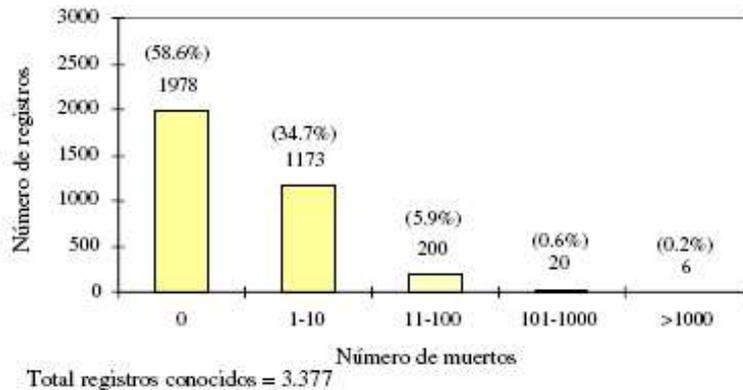


Fig. 1.2 Clasificación de los accidentes según el número de muertos

Informaciones de este tipo han puesto de manifiesto la necesidad de mejorar la seguridad o, dicho en otros términos, de reducir el riesgo de los denominados accidentes mayores. Esta necesidad perentoria ha provocado diversos cambios en la legislación, el más importante de los cuales es la llamada Directriz Seveso (Directiva 82/501/CEE), sobre prevención de accidentes mayores en determinadas actividades industriales, de aplicación en los países de la Comunidad Económica Europea.

Esta Directiva se ha implantado en el Estado Español mediante el Real Decreto 886/1988 (BOE del 5 de agosto de 1988).

Éste es, sin duda, el esfuerzo legislativo más importante realizado en la mayoría de los países de la Comunidad Europea para afrontar los riesgos mayores, y ha significado un avance muy importante tanto en la metodología como en la filosofía con que se trata el problema del riesgo tecnológico.

La Directiva Seveso no incluye ningún valor concreto para el riesgo tolerable, sino que establece un marco legal para facilitar a la administración el control del riesgo originado por las instalaciones industriales; contempla la utilización de un conjunto de técnicas de evaluación agrupadas en torno al llamado "análisis del riesgo", y llega incluso a considerar en determinados casos la aplicación de la evaluación probabilística (estimación de la frecuencia probable del accidente).

En conjunto, es un buen instrumento que, bien utilizado, representa un importante paso adelante en la obligada tarea de controlar el riesgo.

RIESGOS LABORALES

Si bien el presente trabajo estará orientado hacia los Riesgos del tipo Industrial, para establecer en base al estudio a ellos las condiciones de Protección adecuadas, es importante llevar a cabo un repaso general sobre los Riesgos Laborales a fin de relacionar ambos tipos y establecer las diferencias en cuanto a sus mecanismos de estudio y control.

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Riesgo: Probabilidad de ocurrencia de un evento adverso.

Factor de Riesgo: Es todo elemento cuya presencia o modificación aumenta la probabilidad de producir un daño o lesión en quien está expuesto a él.

Fuente del riesgo: Condición presente en puestos y ambientes de trabajo o acción de las personas que generan el riesgo.

Panorama de Factores de Riesgo: Llamado también Inventario de Condiciones de Trabajo, es un documento en el que se consigna y mantiene información sobre ubicación y valoración de los factores de riesgo presentes en las labores.

Consecuencias: Resultado más probable (lesiones en las personas, daños a los equipos, al proceso o a la propiedad) como resultado de la exposición a un factor de riesgo determinado.

Probabilidad: Posibilidad de que los acontecimientos de la cadena se completen en el tiempo, originándose las consecuencias no queridas ni deseadas.

Exposición: Tiempo o frecuencia con que las personas o la estructura entran en contacto con el factor de riesgo.

Número de expuestos: Número de personas relacionadas directamente con el riesgo.

Tiempo de exposición: Medida del tiempo o de la frecuencia de exposición a un riesgo determinado.

Grado de Peligrosidad: Indicador de la gravedad de un riesgo reconocido, calculado con base en sus consecuencias ante la probabilidad de ocurrencia y en función del tiempo o la frecuencia de exposición al mismo.

Medidas de control actual: Acciones implementadas por la empresa con el fin de minimizar la ocurrencia de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales.

Medidas de control recomendadas: Medidas de prevención, control y/o de seguimiento recomendadas para minimizar los riesgos, tanto en la fuente generadora como en el medio transmisor y en los trabajadores.

CLASIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE RIESGO LABORALES

Los factores de riesgo se clasifican de acuerdo con las condiciones de trabajo a que hacen referencia.

CONDICIONES DE HIGIENE AMBIENTAL

a) Factores de Riesgo Físico: Son todos aquellos factores ambientales de naturaleza física que pueden provocar efectos adversos a la salud según sea la intensidad o el tiempo de exposición. Se clasifican en:

- **Energía mecánica:** Ruido, vibraciones, presión barométrica
- **Energía térmica:** Calor, frío
- **Energía electromagnética**
- **Radiaciones ionizantes:** Rayos X, rayos gama, rayos beta, rayos alfa y neutrones
- **Radiaciones no ionizantes:** Radiaciones ultravioleta, radiación visible, radiación infrarroja, microondas y radiofrecuencias

b) Factores de Riesgo Químico: Toda sustancia orgánica e inorgánica, natural o sintética que durante la fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso, pueda incorporarse al aire ambiente y ser inhalada, entrar en contacto con la piel o ser ingerida, con efectos irritantes, corrosivos, asfixiantes o tóxicos y en cantidades o tiempos de exposición que tengan probabilidades de lesionar la salud de las personas.

Se clasifican en:

- **Aerosoles:**

Sólidos: Polvos orgánicos, polvos inorgánicos, humo metálico, humo no metálico, fibras
Líquidos: Nieblas, rocíos.

- **Gases y vapores.**

- **Líquidos.**

c) Factores de Riesgo Biológico: Todos aquellos seres vivos ya sean de origen animal o vegetal y todas aquellas sustancias derivadas de los mismos, que pueden ser susceptibles de provocar efectos negativos en la salud de los trabajadores en la forma de procesos infecciosos, tóxicos o alérgicos.

Se clasifican en:

- **Animales:** Vertebrados, invertebrados, derivados
- **Vegetales:** Musgos, helechos, semillas, derivados
- **Fungales:** Hongos
- **Protistas:** Amebas, plasmodium
- **Mónera:** Bacterias
- **Virus**

CONDICIONES PSICO-LABORALES

a) Factores de Riesgo Psicolaboral: Se refiere a aquellos aspectos intrínsecos y organizativos del trabajo y a las interrelaciones humanas, que al interactuar con factores humanos endógenos (edad, patrimonio genético, antecedentes psicológicos) y exógenos (vida familiar, cultura, etc.), tienen la capacidad potencial de producir cambios en el comportamiento (agresividad, ansiedad, insatisfacción) o trastornos físicos o psicosomáticos (fatiga, dolor de cabeza, espasmos musculares, alteraciones en ciclos de sueño, propensión a la úlcera gástrica, la hipertensión, la cardiopatía, envejecimiento acelerado). Su fuente depende de:

- **Tipos de organización y métodos de trabajo**
- **Contenido de la tarea**
- **Organización del tiempo de trabajo**
- **Relaciones humanas**
- **Gestión**

CONDICIONES ERGONÓMICAS

a) Factores de Riesgo por Carga Física: Se refiere a todos los aspectos de la organización del trabajo, de la estación o puesto de trabajo y su diseño, que pueden alterar la relación del individuo con el objeto del trabajo produciendo problemas en la salud, en la secuencia de uso o la producción.

Se clasifican en:

- **Carga estática:** Posturas de pie, sentado, cuclillas, rodillas, otras
- **Carga dinámica**
- **Esfuerzos:** Por desplazamientos (con carga o sin carga), al dejar cargas, al levantar cargas, visuales, otros grupos musculares
- **Movimientos:** Cuello, tronco, extremidades superiores, extremidades inferiores

CONDICIONES DE SEGURIDAD

a) Factores de Riesgo Mecánico: Objetos, máquinas, equipos, herramientas, que por sus condiciones de funcionamiento, diseño o forma, tamaño, ubicación y disposición, tienen la capacidad potencial de entrar en contacto con las personas o materiales, provocando lesiones en los primeros o daños en los segundos.

b) Factores de Riesgo Eléctrico: Se refiere a los sistemas eléctricos de las máquinas y los equipos, instalaciones o materiales de estos, que al entrar en contacto con las personas pueden provocar lesiones o daños a la propiedad. Se clasifican en:

- **Alta tensión**
- **Baja tensión**
- **Electricidad estática**

c) Factores de Riesgo Locativo: Condiciones de la zona geográfica, las instalaciones o áreas de trabajo, que bajo circunstancias no adecuadas pueden ocasionar accidentes de trabajo o pérdidas para la empresa. Se incluyen las deficientes condiciones de orden y aseo, la falta de dotación, señalización o ubicación adecuada de extintores, la carencia de

señalización de vías de evacuación, estado de vías de tránsito, techos, puertas, paredes, etc.

d) Factores de Riesgo Físico-Químico: Todos aquellos objetos, sustancias químicas, materiales combustibles y fuentes de calor que bajo circunstancias de inflamabilidad o combustibilidad, pueden desencadenar incendios y explosiones con consecuencias como lesiones personales, muertes, daños materiales y pérdidas.

e) Factores de Riesgo Público: Son aquellas circunstancias de origen social y externas a la empresa, a las que se puede ver enfrentado el trabajador por razón de su oficio, tales como delincuencia, extorsión, secuestro, robo, asonada, condiciones de tránsito, etcétera.

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

- **Recorrido a instalaciones e inspección directa**
- **Entrevistas con trabajadores**
- **Auto reporte de condiciones de trabajo**

VALORACIÓN DE FACTORES DE RIESGO

Se realiza mediante una valoración cuali-cuantitativa, utilizando una escala para los riesgos que generan accidentes de trabajo y otra para los que generan enfermedades profesionales:

ESCALA DE VALORACIÓN PARA FACTORES DE RIESGO QUE GENERAN ACCIDENTES DE TRABAJO

VALOR	CONSECUENCIAS
10	Muerte o daños superiores a 5 nóminas mensuales
6	Lesiones incapacitantes permanentes y/o daños entre 1 y 5 nóminas mensuales
4	Lesiones con incapacidades no permanentes y/o daños entre el 10 y 100% de la nómina mensual
1	Lesiones con heridas leves, contusiones, golpes y/o daños menores del 10% de la nómina mensual
VALOR	PROBABILIDAD
10	Es el resultado más probable y esperado si la situación de riesgo tiene lugar.
7	Es completamente posible, nada extraño. Tiene una probabilidad de actualización del 50%.
4	Sería una coincidencia rara. Tiene una probabilidad de actualización del 20%.
1	Nunca ha sucedido en muchos años de exposición al riesgo, pero es concebible. Probabilidad del 5%.
VALOR	EXPOSICIÓN
10	La situación de riesgo ocurre continuamente o muchas veces al día.
6	Frecuentemente o una vez al día.
2	Ocasionalmente o una vez por semana.
1	Remotamente posible

Estas valoraciones permiten jerarquizar los riesgos y establecer su Grado de Peligrosidad (GP), indicador de la gravedad ante la exposición a estos, calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Grado de peligrosidad (GP)} = \text{Consecuencias (C)} \times \text{Exposición (E)} \times \text{Probabilidad (P)}$$

Una vez establecido el grado de peligrosidad, el valor obtenido se ubica dentro de la siguiente escala, obteniéndose la interpretación (alto, medio o bajo):

1	300	600	1000			
[BAJO		MEDIO		ALTO]

ESCALA DE VALORACIÓN PARA FACTORES DE RIESGO QUE GENERAN ENFERMEDADES PROFESIONALES

a) ILUMINACIÓN

- ALTO Ausencia de luz natural o deficiencia de luz artificial, con sombras evidentes y dificultad para leer
- MEDIO Percepción de algunas sombras o reflejos al ejecutar una actividad (por ej: escribir, lectura en monitores de computador)
- BAJO Ausencia de sombras

b) RUIDO

ALTO No escuchar una conversación en tono normal a una distancia entre 40 a 50 cm.

MEDIO Escuchar la conversación en tono normal a una distancia de 2 mt.

BAJO No hay dificultad para escuchar una conversación en tono normal a más de 2 mt.de distancia.

c) RADIACIONES IONIZANTES

- ALTO Exposición frecuente (una vez por turno o jornada o más).
- MEDIO Exposición ocasional y/o vecindad a fuentes.
- BAJO Rara vez o casi nunca sucede la exposición.

d) RADIACIONES NO IONIZANTES

- ALTO Seis horas o más de exposición por turno o jornada.
- MEDIO Entre 2 y 6 horas de exposición por turno o jornada.
- BAJO Menos de 2 horas de exposición por jornada o turno.

e) TEMPERATURAS EXTREMAS

- ALTO Percepción subjetiva de calor o frío, luego de permanecer 5 minutos en el sitio que se valora.
- MEDIO Percepción de algún disconfort con la temperatura ambiente, luego de permanecer 15 minutos en sitio que se valora.
- BAJO Sensación de confort térmico.

f) VIBRACIONES

- ALTO Percepción sensible de vibraciones en el puesto de trabajo.
- MEDIO Percepción moderada de vibraciones en el puesto de trabajo.
- BAJO Existencia de vibraciones aunque no son percibidas.

g) POLVOS

- ALTO Evidencia de material particulado depositado sobre una superficie previamente limpia, al cabo de 15 minutos.
- MEDIO Percepción subjetiva de emisión de polvo sin depósito sobre superficies, pero sí evidenciable en luces, ventanas, rayos solares, etc.
- BAJO Presencia de fuentes de emisión de polvo, sin la percepción anterior.

h) GASES Y VAPORES DETECTABLES ORGANOLÉPTICAMENTE

- ALTO Percepción de olor a más de 3 metros del foco emisor.
- MEDIO Percepción de olor entre 1 y 3 metros del foco emisor.
- BAJO Percepción de olor a menos de 1 metro del foco.

GASES Y VAPORES NO DETECTABLES ORGANOLÉPTICAMENTE

Cuando en el proceso que se valora exista un contaminante no detectable, se considera en grado medio en atención a sus posibles consecuencias.

a) LÍQUIDOS

- ALTO Manipulación frecuente de productos químicos líquidos (varias veces en la jornada o turno).
- MEDIO Manipulación una vez por jornada o turno.
- BAJO Rara vez u ocasionalmente se manipulan líquidos.

b) VIRUS

- ALTO Trabajos en zona endémica de fiebre amarilla, dengue o hepatitis, manipulación de muestras o material contaminado, manejo de pacientes infectados o exposición a virus altamente patógenos, con casos de trabajadores en el último año.
- MEDIO Igual al anterior, sin casos en el último año.
- BAJO Exposición a virus no patógenos o levemente patógenos, sin casos de trabajadores.

c) BACTERIAS

- ALTO Consumo o abastecimiento de agua sin tratamiento físico-químico, manipulación de material contaminado y/o casos de trabajadores en el último año.
- MEDIO Tratamiento físico-químico del agua sin pruebas en el último semestre, manipulación de material contaminado y/o sin casos de trabajadores en el último año.
- BAJO Tratamiento físico-químico del agua con análisis bacteriológico periódico. No casos de trabajadores anteriormente.

d) HONGOS

- ALTO Ambiente húmedo, manipulación de material contaminado y/o trabajadores con antecedentes de micosis en el último año.
- MEDIO Igual al anterior, sin antecedentes de micosis en los trabajadores en el último año.
- BAJO Ambiente seco y manipulación de muestras o material contaminado, sin casos previos de micosis en los trabajadores.

e) SOBRECARGA Y ESFUERZOS

- ALTO Manejo de cargas mayores a 25 Kg. y/o un consumo necesario de más de 901 kcal por jornada
- MEDIO Manejo de cargas entre 15 y 25 Kg. y/o consumo necesario entre 601 y 900 kcal por jornada
- BAJO Manejo de cargas menores a 15 Kg. y/o consumo necesario de menos de 600 kcal por jornada

f) POSTURA HABITUAL

- ALTO De pie con una inclinación superior a los 15 grados.
- MEDIO Siempre sentado (toda la jornada o turno) o de pie con inclinación menor de 15 grados.
- BAJO De pie o sentado indistintamente.

g) DISEÑO DEL PUESTO

- ALTO Puesto de trabajo que obliga al trabajador a permanecer siempre de pie.
- MEDIO Puesto de trabajo sentado alternando con posición de pie, pero con mal diseño del asiento.
- BAJO Sentado y buen diseño del asiento.

i) MONOTONÍA

- ALTO Ocho horas de trabajo repetitivo, solo o en cadena.
- MEDIO Ocho horas de trabajo repetitivo y en grupo.
- BAJO Con poco trabajo repetitivo.

j) SOBRETIEMPO

- ALTO Más de 12 horas por semana y durante 4 semanas o más.
- MEDIO De 4 a 12 horas por semana y durante 4 semanas o más.
- BAJO Menos de 4 horas semanales.

k) CARGA DE TRABAJO

- ALTO Más del 120% del trabajo habitual. Trabajo contra el reloj. Toma de decisiones bajo responsabilidad individual. Turno de relevo 3x8.
- MEDIO Del 100% al 120% del trabajo habitual. Turno de relevo 2x8.
- BAJO Menos del 100% del trabajo habitual. Jornada partida con horario flexible. Toma de decisiones bajo responsabilidad grupal.

l) ATENCIÓN AL PÚBLICO

- ALTO Más de un conflicto en media hora de observación del evaluador.
- MEDIO Máximo un conflicto en media hora de observación del evaluador.
- BAJO Ausencia de conflicto en media hora de observación del evaluador.

Finalmente se establece el Grado de Repercusión (GR) de cada uno de los riesgos identificados, indicador que refleja la incidencia de un riesgo con relación a la población expuesta.

Permite visualizar claramente cuál riesgo debe ser intervenido prioritariamente y resulta de multiplicar el valor del grado de peligrosidad por un factor de ponderación, que se establece con base en los grupos de usuarios expuestos a los riesgos que posean frecuencias relativas proporcionales a los mismos.

El Grado de Repercusión se calcula con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{G.R = G.P \times F.P (Factor de Ponderación)}$$

Los factores de ponderación se establecen con base en el porcentaje de expuestos del número total de trabajadores, tal como lo muestra la siguiente tabla:

PONDERACIÓN GRADO DE REPERCUSIÓN

FACTOR DE PONDERACIÓN	% DE TRABAJADORES EXPUESTOS
1	1 – 20%
2	21 – 40%
3	41 – 60%
4	61 – 80%
5	81 – 100%

Una vez calculado el grado de repercusión, el valor obtenido se ubica dentro de la siguiente escala, obteniéndose la interpretación (alto, medio o bajo):

1	1500	3500	5000			
[BAJO]	MEDIO]	ALTO	[

El resultado final de la valoración de riesgos debe ser un listado en orden de importancia según los grados de peligrosidad y repercusión, requiriendo de acuerdo con ellos la aplicación de medidas de control a corto, mediano y largo plazos.

RIESGOS INDUSTRIALES

RIESGO: DEFINICIÓN Y TIPOS

Si bien anteriormente se hizo referencia a la definición de "riesgo", cabe mencionar que se han propuesto diversas definiciones del riesgo: "situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento", o bien "probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial" (entendiendo por peligro una situación física que puede provocar daños a la vida, a los equipos o al medio), o aún, "consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra".

Un tratamiento riguroso del riesgo requiere una definición más precisa que permita su cuantificación. Una definición que cumple estos requisitos y que es utilizada por muchos profesionales es la basada en el producto de la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables:

$$\mathbf{Riesgo = frecuencia \times magnitud consecuencias}$$

Así, si un accidente tiene una frecuencia estimada de una vez cada 50 años y sus consecuencias se estiman en un centenar de muertos, el riesgo es de 2 muertes año⁻¹. O, si el accidente con la misma frecuencia produce unas pérdidas evaluadas en 300 millones de dólares, el riesgo es de 6 millones de dólares por año.

Esta forma de definir el riesgo presenta realmente dificultades e inconvenientes. En primer lugar las unidades: la magnitud de las consecuencias de un accidente no se mide únicamente en fallecimientos o en dinero; existe también la posibilidad de que se produzcan heridos o secuelas a largo plazo en la población, de difícil o imposible estimación (por ejemplo los casos de Seveso y Bhopal), o de contaminación de áreas más o menos extensas (Seveso o el Rhin).

En segundo lugar, no resulta fácil calcular los dos parámetros que intervienen en la definición, la frecuencia y la magnitud de las consecuencias. Como se verá más adelante, existen a pesar de todo, metodologías que permiten estudiar estos parámetros, no de forma exacta pero sí con una precisión razonable para poder estimar el riesgo.

Es interesante matizar aquí la diferencia entre *riesgo* y *peligro*.

Puede definirse el peligro como:

Peligro = aquello que puede producir un accidente o un daño.

El riesgo, sin embargo, estaría asociado a la probabilidad de que un peligro se convierta realmente en un accidente con unas consecuencias determinadas. Si bien en la terminología anglosajona estos dos términos están diferenciados, en castellano se suelen utilizar de forma indistinta, tal y como se verá más adelante.

Debido a la gran variedad de riesgos, se han propuesto diversas clasificaciones; desde un punto de vista general, se pueden clasificar en las tres categorías siguientes:

- **Riesgos de categoría A:** son los inevitables y aceptados, sin compensación (por ejemplo morir fulminado por un rayo).
- **Riesgos de categoría B:** evitables, en principio, pero que deben considerarse inevitables si uno quiere integrarse plenamente en la sociedad moderna (por ejemplo: morir en un accidente aéreo o de automóvil).
- **Riesgos de categoría C:** normalmente evitables, voluntarios y con compensación (por ejemplo: practicar un deporte peligroso).

Como referencia, y para eventuales comparaciones, la tabla 1.3 presenta una estimación del valor de algunos riesgos (mortalidad) asociados a la vida ordinaria (datos correspondientes a Gran Bretaña y a Estados Unidos).

Debe tenerse en cuenta que estos datos estadísticos, que a menudo aparecen en la bibliografía, pueden variar de una fuente a otra, y que (como todas las estadísticas) deben interpretarse con buen criterio. Si han sido elaborados con seriedad, sin embargo, el orden de magnitud suele ser el mismo.

Debe resaltarse que en la misma tabla hay causas de muerte de características totalmente diferentes: algunas, como por ejemplo la caída de meteoritos o la acción de los rayos, afectan prácticamente por un igual a toda la población de un país, mientras que otras (como viajar en avión o en motocicleta) sólo afectan a un sector determinado; por otra parte, en la tabla hay hechos que causan la muerte repentina junto a hechos que en realidad lo que hacen es reducir la esperanza de vida, y también hechos involuntarios y otros provocados voluntariamente: suicidarse no es en realidad un riesgo sino un acto voluntario.

Tabla 1.3 Mortalidad anual asociada a diversos sucesos y actividades

actividad/suceso	mortalidad por año y por persona	mortalidad por persona
Caída de meteoritos	$6,0 \times 10^{-11}$	1 de 17.000 millones
Explosiones de recipientes a presión	$5,0 \times 10^{-8}$	1 de 20 millones
Viajar en avión	$1,0 \times 10^{-7}$	1 de 10 millones
Fulminados por un rayo	$1,0 \times 10^{-7}$	1 de 10 millones
Mordedura de serpiente venenosa	$2,0 \times 10^{-7}$	1 de 5 millones
Viajar en tren	$5,0 \times 10^{-6}$	1 de 2 millones
Rotura de presas	$1,0 \times 10^{-6}$	1 de 1 millón
Tornado (Midwest), terremoto (California)	$2,0 \times 10^{-6}$	1 de 500.000
Ahogados	$4,0 \times 10^{-5}$	1 de 25.000
Atropello por automóvil	$5,0 \times 10^{-5}$	1 de 20.000
Abuso del alcohol	$7,5 \times 10^{-3}$	1 de 13.300
Suicidio	$1,0 \times 10^{-4}$	1 de 10.000
Viajar en automóvil	$1,7 \times 10^{-4}$	1 de 5.900
Viajar en motocicleta	$1,0 \times 10^{-3}$	1 de 1.000
Fumar (más de 20 cigarrillos/día)	$5,0 \times 10^{-3}$	1 de 200

Desde el punto de vista más concreto de las actividades industriales, los riesgos pueden clasificarse en otras tres categorías:

- **Riesgos convencionales:** relacionados con la actividad y el equipo existentes en cualquier sector (electrocución, caídas).
- **Riesgos específicos:** asociados a la utilización o manipulación de productos que, por su naturaleza, pueden ocasionar daños (productos tóxicos, radioactivos).
- **Riesgos mayores:** relacionados con accidentes y situaciones excepcionales. Sus consecuencias pueden presentar una especial gravedad ya que la rápida expulsión de productos peligrosos o de energía podría afectar a áreas considerables (escape de gases, explosiones).

De estos tres tipos de riesgo, los dos primeros corresponden al tratamiento clásico de la seguridad e higiene en el trabajo, y por su forma de actuar son en general relativamente fáciles de prever. Por el contrario, las características especiales de los riesgos mayores los convierten probablemente en la contingencia más temible. Actuando con una severidad a veces extrema, estos accidentes pueden tener una característica muy importante: la de ultrapasar los límites de la instalación e incidir sobre la población externa y sobre el medio ambiente.

Son estas características de los riesgos mayores las que han contribuido esencialmente a conferir por ejemplo a la industria química, una imagen de peligrosidad y han desarrollado un cierto sentimiento de rechazo en la sociedad. También se les debe atribuir el esfuerzo realizado actualmente para la prevención de estos riesgos.

Parámetros de medición del riesgo

Se han propuesto diversos parámetros para cuantificar, de forma breve y sintética, el riesgo de una actividad determinada. Uno de los más utilizados es la denominada *tasa de accidentes mortales*, TAM (o FAR, Fatal Accident Rate, en la literatura anglosajona). La TAM se define como el número de accidentes mortales después de 108 (horas/persona) de una determinada actividad.

Esta cantidad equivale, aproximadamente, al número de horas trabajadas por un grupo de 1.000 personas después de una vida laboral, e incluye sólo los accidentes con consecuencias inmediatas y no las muertes por enfermedad. El valor de la TAM para la industria química en diversos países se muestra en la tabla 1.4; estos valores se deben en un 50%, aproximadamente, a accidentes convencionales, y en un 50% a accidentes mayores.

Tabla 1.4 Valores de la FAR (TAM) en la industria química

<i>País</i>	<i>FAR</i>
Alemania (Occidental)	5,0
Francia	8,5
Gran Bretaña	4,0
USA	5,0

Un parámetro alternativo es la frecuencia de los accidentes mortales, expresada en muertes por persona y año. Si bien estas unidades, tomadas de forma estricta, no tienen mucho sentido, debe tenerse en cuenta que se trata de un parámetro estadístico. Tanto la TAM como la frecuencia de accidentes mortales ganan significado a medida que crece la amplitud de la muestra a la que son aplicados.

La relación entre TAM y frecuencia es sencilla. Por ejemplo si la TAM para un trabajador de un determinado sector es aproximadamente de 8, y este trabajador está expuesto durante unas 2.000 horas/año, la frecuencia será:

$$8 \cdot 10^{-8} \cdot 2000 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ muertes persona}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

Respecto a la industria química, puede observarse que el valor más bajo es el de Gran Bretaña, 4; esto implica una frecuencia de aproximadamente $1 \cdot 10^{-4}$ muertos por persona y año. Dicho de otro modo, de cada 10.000 operarios que trabajan en la industria química (referidos evidentemente al grupo de riesgo más alto; esta cantidad no incluye, por ejemplo, determinados oficinistas alejados de la planta), muere uno cada año.

Para comparar este riesgo con otros de la vida diaria, pueden tomarse los siguientes datos: si una persona trabaja toda su vida laboral en una industria química de 1.000 operarios, morirán durante este tiempo 4 compañeros suyos por accidente laboral, unos 20 por otros accidentes (por ejemplo de automóvil) y unos 370 por enfermedad. En la tabla siguiente puede verse la comparación con valores de la TAM correspondientes a otras actividades industriales (datos de Gran Bretaña).

Tabla 1.5 Valor de la FAR (TAM) según el tipo de actividad

<i>Actividad</i>	<i>FAR</i>
Industria confección	0,15
Industria automóvil	1,30
Industria de la madera	3,00
Industria química	4,00
Industria mecánica	7,00
Agricultura	10,00
Minería	12,00
Industria pesquera	35,00
Construcción	64,00

Indudablemente estos dos parámetros (dos números, en definitiva) contienen muy poca información. Resultan, sin embargo, de utilidad para determinados estudios, como sería el

comparar el riesgo de una serie de actividades. Si se quiere conocer el riesgo de una situación o actividad concretas de forma más precisa, se debe realizar un *análisis del riesgo*: mediante modelos físico/matemáticos y modelos de vulnerabilidad se prevén cuáles serían las consecuencias del accidente, y a continuación se estima (con técnicas apropiadas, por ejemplo la del árbol de fallos) la frecuencia con que probablemente se produciría el mismo.

En los estudios del riesgo en personas, cuando se habla de riesgo tolerable, es usual hacer referencia al riesgo a que está sometido un determinado individuo y, también, al riesgo colectivo, o sea, aquel que si se produce afectará a un grupo de personas. El concepto de riesgo colectivo se ha aplicado asimismo a ecosistemas.

Suele entenderse por riesgo individual la probabilidad de que una persona sufra unas consecuencias determinadas como resultado de su exposición, en un determinado lugar, a uno o varios peligros. Hay dos posibilidades: referirse al individuo sometido al máximo riesgo, o bien tomar la media del riesgo individual.

En ambos casos, el riesgo individual varía notablemente según la posición en que se encuentre la persona, las características del individuo, etc.; por ejemplo, el riesgo originado por la proximidad de una planta química será en principio mayor para una persona que viva a 100 m de distancia que para una persona que viva a 500 m. El riesgo para un individuo puede expresarse de la siguiente manera:

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i f_i$$

donde x es el número de muertos para un determinado tipo de accidente potencial, f_i es la frecuencia de este accidente, n es el número de accidentes potenciales, y N es el número total de individuos sometidos al riesgo.

El riesgo colectivo puede definirse como la probabilidad por año de que un grupo de personas sea víctima de un determinado accidente al mismo tiempo. Para ecosistemas, el riesgo colectivo es la probabilidad por año de que un ecosistema sufra unas determinadas consecuencias como resultado de su exposición a un agente.

Tolerabilidad del riesgo

Los sentimientos de una persona o de un colectivo de personas enfrentadas a un determinado riesgo dependen de muchas circunstancias, y, de hecho, este tema es más propio de psicólogos y sociólogos que de técnicos; por esta razón este aspecto se tratará aquí de forma muy general.

Entre los factores que afectan la actitud de un individuo que se encuentra sometido a un riesgo concreto, hay dos que juegan un papel fundamental:

- El conocimiento/desconocimiento de las características del peligro en cuestión
- El hecho de que el riesgo sea sufrido voluntariamente o no.

Muchos de los riesgos tecnológicos no son adecuadamente conocidos por la gran mayoría de la población; así, el peligro que puede conllevar la radioactividad, una industria química, un vertedero de residuos industriales o un oleoducto es a menudo mal interpretado y a veces magnificado por la ignorancia o la mala información.

Por otro lado, la mayoría de estos riesgos pueden considerarse impuestos a la población, que no ha escogido voluntariamente (la elección se ha hecho sin conocimiento o bien forzada por las circunstancias) vivir o trabajar cerca de una determinada instalación. Estos dos factores permiten clasificar los riesgos (de manera un tanto esquemática) en cuatro categorías, según la percepción social:

- Los voluntarios y conocidos
- Los voluntarios y desconocidos
- Los conocidos e involuntarios
- Los desconocidos e involuntarios (Fig. 1.3).

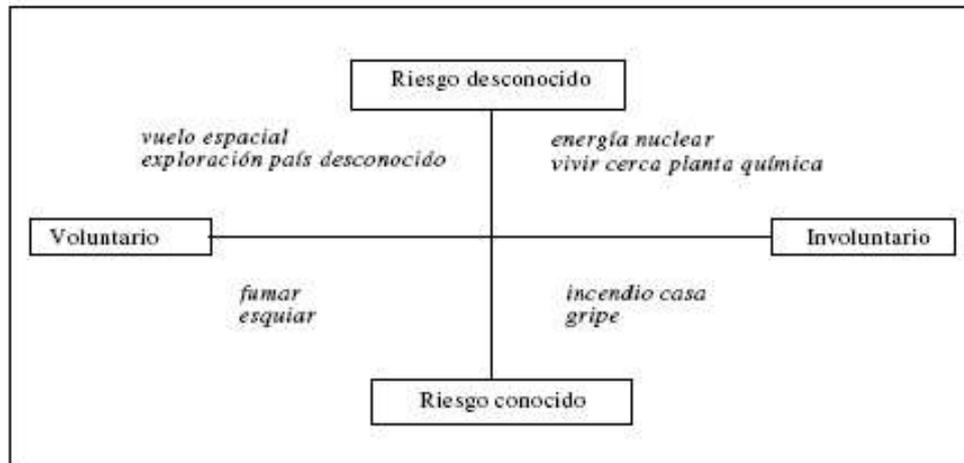


Fig. 1.3 Factores que afectan a la percepción del riesgo

Los riesgos pertenecientes a estas cuatro categorías son muy distintos entre sí y, por lo tanto, compararlos no tiene ningún sentido. Desgraciadamente muchos de los riesgos tecnológicos se encuentran situados en el peor cuadrante de la figura 1.3, es decir, se corren involuntariamente y son desconocidos o deficientemente conocidos. Entre ellos, cabe citar los riesgos originados por la proximidad de centrales nucleares y de industrias químicas, probablemente los más representativos en un país.

Esto dificulta evidentemente la tolerabilidad por parte de la sociedad y hace aún más necesaria una buena gestión del riesgo en todos sus aspectos (reducción, información, medidas de emergencia, etc.).

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la sociedad se atemoriza más por los accidentes que representan un impacto social (la muerte simultánea de un grupo de personas) que no por los que golpean individuo a individuo y afectan de forma directa solamente a un grupo (la familia) mucho más pequeño. Y esto ocurre aunque el riesgo de este accidente individual sea relativamente mayor que el que afecta al grupo. Es decir, pese a que estadísticamente se pueda demostrar que este riesgo individual provoca, una a una, al cabo de cierto tiempo, más víctimas que el otro, ello no suele modificar el sentimiento colectivo.

Es interesante por otro lado observar que en los últimos años ha aumentado la presencia en los medios informativos de referencias a catástrofes o a grandes accidentes relacionados con los riesgos tecnológicos. Y es que, realmente, ha habido un aumento del número de accidentes (motivado, entre otras razones, por el aumento del número de instalaciones y su tamaño). Esto ha contribuido a sensibilizar a la población y ha facilitado en algunos casos el crecimiento de alarma y el miedo y, en definitiva, el rechazo.

El rechazo o la aceptación de una determinada actividad están supeditados a la imagen que ésta ha adquirido a los ojos de la sociedad. En el caso de las centrales nucleares, por ejemplo, su imagen ha sido fuertemente afectada por el miedo al accidente. En el caso de la industria química, intervienen dos factores: la polución y el riesgo.

Sin embargo, por lo que respecta al primero, hay un cierto efecto de dilución motivado por la problemática generalizada de la contaminación, por la dispersión de sus efectos sobre amplios sectores de la sociedad, y por la sensación (a menudo falsa) de que antes de que estos efectos lleguen a ser realmente graves la situación estará controlada; si bien contribuye a dar una mala imagen de la industria química, sus efectos son en general menos agudos que los del miedo al riesgo de un accidente.

Criterios de tolerabilidad

Es obvio que el *riesgo cero* no existe y que debemos, pues, asumir unos determinados riesgos. En realidad, cualquier individuo es consciente de este hecho y acepta periódicamente, si no constantemente, un cierto número de riesgos a cambio de determinadas compensaciones. Incluso se aceptan riesgos con una tasa de mortalidad relativamente alta (por ejemplo, fumar, ejercer determinados oficios o practicar ciertos deportes) sin preocuparse demasiado.

Así pues, en muchos casos el riesgo se acepta voluntariamente; es decir, el individuo piensa que, de alguna forma, lo controla, de manera que cuando quiera lo podrá eliminar; por otra parte, se trata generalmente de riesgos bien conocidos o, por lo menos, con los que se está familiarizado.

La situación se complica, como se ha dicho antes, cuando el riesgo no es voluntario y cuando, además, es desconocido. No obstante, implícitamente los miembros de una sociedad industrializada son conscientes de las ventajas que representa la industria química, la generación de energía, etc.; ésto presupone que, paralelamente, están dispuestos a tolerar un cierto riesgo adicional a cambio de disfrutar de determinadas ventajas de la vida moderna.

El problema surge cuando el riesgo es realmente demasiado elevado o cuando un determinado sector de la sociedad considera que la cuota de riesgo que le corresponde es demasiado alta. Y aquí cabe contemplar dos aspectos. En primer lugar, que es prácticamente imposible que el riesgo de una determinada instalación (que en principio beneficia a un amplio sector de la sociedad) se reparta por un igual entre todos los individuos, por razones evidentes de proximidad geográfica, etc.

En segundo lugar, que, desdichadamente, en un determinado número de casos esta percepción de la sociedad está correctamente fundamentada y el riesgo es, ciertamente, demasiado elevado.

Es evidente, pues, que el control del riesgo y su mantenimiento dentro de unos límites "tolerables" tiene que ser a la fuerza uno de los objetivos tanto de la industria como del gobierno de cualquier país, si bien hay que tener en cuenta que no se puede aspirar a tener determinadas instalaciones sin aceptar un margen de riesgo, y que finalmente siempre quedan algunos factores de difícil o imposible control.

Si bien es difícil y complejo, se han realizado intentos para establecer valores para el riesgo tolerable. Éste es un terreno delicado, en que la unidad de medida (la vida humana) origina la intervención simultánea de factores no sólo de orden práctico sino también de orden ético y social. Por ello prácticamente ningún estado ha fijado oficialmente unos valores para el riesgo "tolerable", y no parece que la tendencia futura vaya en esa línea. En unos pocos países se han establecido criterios oficiales. Por ejemplo, en Holanda, y a título experimental, se han propuesto los valores mostrados en la figura 1.4.

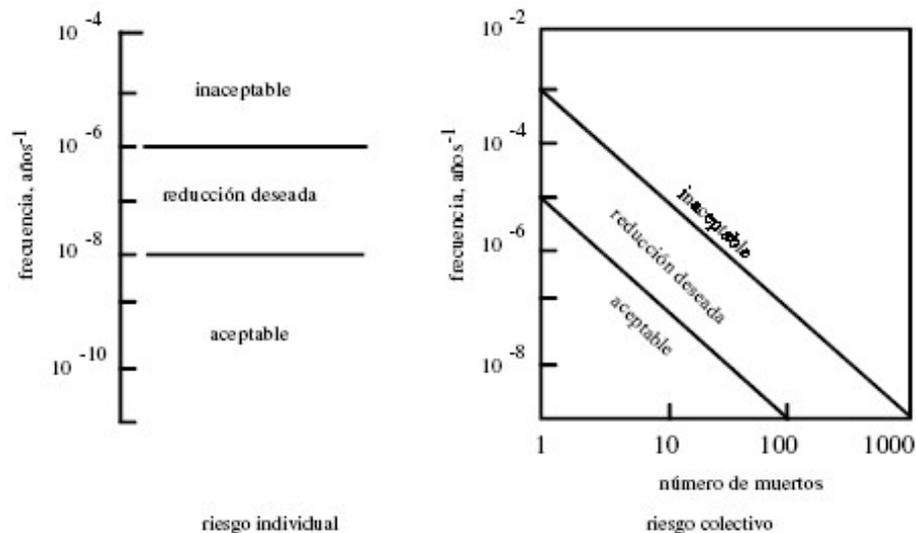


Fig. 1.4 Límites de riesgo para accidentes mayores en Holanda

Para accidentes mayores y situaciones nuevas (fábricas de nueva construcción), el máximo valor permisible para el riesgo individual es en Holanda de 10^{-6} muertos persona⁻¹ año⁻¹ por actividad (por ejemplo, vivir cerca de una fábrica); puesto que una misma persona puede verse afectada por diversas actividades, se ha establecido otro límite para actividades combinadas: 10^{-5} muertos persona⁻¹ año⁻¹.

Para el riesgo colectivo, se especifica que un accidente con 10 muertos debería ocurrir como máximo una vez cada cien mil años; además, a medida que aumenta el número probable de víctimas disminuye correspondientemente la frecuencia: un impacto n veces superior a 10 muertos debería corresponder a una probabilidad de acaecimiento de n al cuadrado veces más pequeña.

Respecto al riesgo tolerable, se considera que es el 1% del riesgo máximo permisible; así, para el riesgo individual es de 10^{-8} año⁻¹ por actividad y de 10^{-7} año⁻¹ para actividades combinadas, y para un accidente que produjese 10 muertos es de 10^{-7} año⁻¹. Para situaciones preexistentes, se supone que deben emprenderse acciones correctivas si el riesgo individual es superior a 10^{-5} año⁻¹ (10 veces mayor que el máximo nivel de riesgo permisible).

Los valores relativos a instalaciones industriales son también aplicables en principio al transporte. Referente al riesgo originado por sustancias mutagénicas, carcinógenas, etc., el riesgo individual por sustancia es de 10^{-6} año⁻¹, y para todas las sustancias combinadas, de 10^{-5} año⁻¹ (riesgo despreciable: 1%).

El riesgo individual máximo permisible para todas las radiaciones se establece en 10^{-5} muertos persona⁻¹ año⁻¹.

Además de Holanda, unos pocos países han establecido también criterios oficiales; los mismos se han resumido en las tablas 1.6 y 1.7. Los valores propuestos suelen dividir los riesgos en tres apartados, mediante los criterios de "riesgo no tolerable" y "riesgo despreciable". La zona intermedia corresponde a valores en los que es deseable la reducción del riesgo. En Gran Bretaña, los riesgos en esta zona se consideran tolerables únicamente cuando se han hecho tan bajos como sea razonablemente practicable" (principio ALARP).

Tabla 1.6 Criterios oficiales para el riesgo individual

Administración	Riesgo no tolerable (por año)	Riesgo despreciable (por año)
VROM, Holanda (plantas nuevas)	10^{-6}	10^{-8}
VROM, Holanda (plantas existentes)	10^{-5}	10^{-8}
Environmental Protection Authority, Western Australia (plantas nuevas)	10^{-5}	10^{-6}
Health & Safety Executive, U.K. (centrales nucleares)	10^{-4}	10^{-6}
Health & Safety Executive, U.K. (nuevas residencias cerca de plantas existentes)	10^{-5}	10^{-6}
Gobierno de Hong Kong (plantas nuevas)	10^{-5}	---

Tabla 1.7 Criterios oficiales para el riesgo colectivo

Administración	Pendiente de la línea FN	No tolerable, ordenada a $N=1$	Despreciable; ordenada a $N=1$	Límite para N
VROM, Holanda (plantas nuevas)	-2	10^{-3}	10^{-5}	---
Gobierno de Hong Kong (plantas nuevas)	-1	10^{-3}	---	1000

En el resto de países no se han establecido valores oficiales. Existen sin embargo diversos criterios, propuestos por diferentes autores, que pueden encontrarse en la literatura especializada. Muchos siguen la tendencia de establecer el máximo riesgo de muerte a que puede ser expuesto un individuo.

Uno de los más aceptados actualmente es el siguiente: el riesgo originado por la presencia de una instalación debe ser lo suficientemente bajo como para no incrementar significativamente el riesgo preexistente de categoría A. Ha sido propuesto el valor de 10^{-7} muertes por persona y año (que corresponde a una TAM de 0.001): éste es el riesgo de muerte por mordedura de serpiente venenosa o por la acción de un rayo (estos datos varían ligeramente, en función del tipo de sociedad, de los hábitos, etc.; no obstante, en los países europeos los valores son, en general, similares).²

También se ha propuesto (aunque cuenta con menor aceptación) el valor de 10^{-6} muertes persona⁻¹ año⁻¹. A título meramente anecdótico, la tabla 1.8 muestra distintas actividades con un riesgo individual de 10^{-6} (esta información es una extrapolación de datos estadísticos, y como tal, poco significativa).

Tabla 1.8 Actividades con riesgo individual de 10^{-6} muertos persona⁻¹ año⁻¹

Fumar 1,5 cigarrillos
Trabajar 1 h en una mina de carbón
Vivir 2 días en Nueva York
Volar 1500 km
6 min de piragüismo en aguas turbulentas

En Gran Bretaña, el *Health and Safety Executive* [HASE88] ha propuesto los siguientes valores, más altos:

- El riesgo individual de muerte para una persona de la población es inaceptable si es mayor que $1 \cdot 10^{-5}$ por año, y despreciable si es menor que $1 \cdot 10^{-6}$ por año.
- Para el riesgo colectivo, un accidente en una instalación nuclear que ocasione 100 muertos con una frecuencia de $5 \cdot 10^{-6}$ por año estaría en el límite de la tolerabilidad.

Se han sugerido también otros criterios, basados en distintos razonamientos, a veces muy criticados.

Por ejemplo, hay quien ha propuesto aumentar el valor del riesgo tolerable con el fin de tener en cuenta que gracias a la industria y a la generación de energía, la media de la esperanza de vida en los países industrializados está creciendo a razón de aproximadamente 0,05 años año⁻¹; esto implicaría que en los países donde la esperanza de vida está aumentando rápidamente, podría tolerarse un nivel de riesgo más alto³.

Otros tratamientos se han basado en criterios de tipo económico, es decir, en establecer cuál es la cantidad máxima de dinero que sería razonable que la sociedad se gastara en evitar una muerte.

Esto se ha hecho según una estimación de la producción o servicio futuros del individuo, o según una estimación del valor que el individuo, consciente o inconscientemente, da a su propia vida. Hay diferentes formas de estimar este valor: por ejemplo, hay quien se ha entretenido a hacerlo considerando la probabilidad de morir atropellado al cruzar una calle en una gran ciudad (10⁻⁸) y la media del tiempo que se invertiría en ir a buscar el paso de peatones, con semáforo, más cercano.

Estos criterios son sin duda anecdóticos, algunos francamente criticables, y en general no tienen ninguna trascendencia.

Todos estos valores corresponden, por supuesto, al riesgo a que está sometida la población externa, o sea la que no trabaja en una determinada instalación sino que vive cerca de ella. En el caso de los trabajadores se considera que el nivel de riesgo tolerable puede ser más alto: han escogido voluntariamente (por lo menos hasta cierto punto) trabajar ahí, están expuestos menos tiempo y, por otro lado, reciben una compensación directa que el resto de la población no tiene.

Para la población interna se ha sugerido como riesgo tolerable el correspondiente al menor valor existente de la TAM. Para la industria química, el riesgo tolerable actual sería el correspondiente a una TAM = 4 (valor correspondiente a Gran Bretaña).

Con esto se pretende lo siguiente: si todos realizan un esfuerzo para alcanzar este valor, en algún momento algún colectivo lo sobrepasará y llegará, por ejemplo, a 3,9; a partir de este momento, éste será el nuevo riesgo tolerable.

Así, aplicando este criterio, se irá incrementando paulatinamente la seguridad del sector.

Evolución de la esperanza de vida de la población catalana, por edades:

	1900	1930	1960	1983
al nacer	36,7	53,8	70,9	77,1
a los 60 años	10,0	13,6	17,7	20,9

[PUJA82]

RIESGOS MAYORES Y CATÁSTROFES

¿Cuáles son estos riesgos? Los que más preocupan a la población son los denominados riesgos mayores. Como más comunes podemos citar las explosiones, los incendios, las nubes tóxicas y la dispersión de productos radioactivos.

La tabla 1.9 presenta una lista de los principales accidentes con sustancias peligrosas ocurridos entre 1974 y 1988; comprende los accidentes con al menos 100 muertos, o 400 heridos, o 35.000 evacuados o 70.000 personas sin agua potable (información procedente de los bancos de datos MHIDAS, FACTS, SEI y OCDE).

Tabla 1.9 Principales accidentes con sustancias peligrosas (1974-1988)

Lugar	Año	n° muertos	n° heridos	n° evacuados	Substancia
Yokkaichi, Japón	1974	0	521	0	cloro
Cuernavaca, Méjico	1977	2	500	2.000	amoníaco
Iri, Corea del Sur	1977	57	1.300	0	explosivos (T)
Els Alfacs, España	1978	216	200	0	propileno (TC)
Xilatopec, Méjico	1978	100	200	0	butano (TC)
Three Mile Isl., USA	1979	0	0	200.000	reactor nuclear
Mississauga, Canadá	1979	0	200	220.000	cloro y propano (TT)
Novosibirsk, URSS	1979	300	?	?	productos químicos
Somerville, USA	1980	0	418	23.000	tricloruro de fósforo
Danaciobasi, Turquía	1980	107	0	0	butano (U)
San Juan, Brasil	1981	0	2.000	0	cloro
Montanas, Méjico	1981	28	1.000	5.000	cloro (TT)
Melbourne, Australia	1982	0	1.000	0	butadieno
Tacoa, Venezuela	1982	145	1.000	40.000	hidrocarburos
Nilo, Egipto	1983	317	0	0	GLP (T)
Cubatão, Brasil	1984	508	?	0	gasolina (P)
S. Juan Ixhuatepec, Méjico	1984	503	7.000	60.000	GLP
Bhopal, India	1984	2.800	50.000	200.000	isocianato de metilo
Rumania	1984	100	100	?	productos químicos
Miamisburg, USA	1986	0	140	40.000	ácido fosfórico
Chernobil, URSS	1986	32	299	135.000	reactor nuclear
Alejandría, Egipto	1987	6	460	?	instal. militares
Shangsi, China	1987	0	1.500	30.000	abonos (agua)
Piper Alpha, Mar del Norte	1988	167	?	0	petróleo y gas
Tours, Francia	1988	0	3	200.000	prod. químicos (agua)
Guadalupe, Méjico	1988	20	?	200.000	petróleo
Islamabad, Pakistán	1988	>100	>3.000	?	explosivos
Chihuahua, Méjico	1988	0	7	150.000	petróleo
Arzamas, URSS	1988	73	720	90.000	explosivos (TT)
Sverdlovsk, URSS	1988	4	500	0	explosivos (TT)
Sibenik, Yugoslavia	1988	0	0	60.000	abonos

T: accidentes de transporte; TC: accidentes en carretera; TT: accidentes en tren;
P: accidentes en oleoductos;
U: accidentes en utilización; Agua: accidentes en distribución de agua potable

Accidentes como los de Seveso (cuyas consecuencias, probablemente, han sido a menudo exageradas) Els Alfacs (Los Alfaques), Ciudad de México, Bhopal (el peor accidente ocurrido jamás en la industria química) o la gran explosión de gas natural ocurrida en los Urales, son unos buenos exponentes.

Prácticamente en todos estos casos se da la presencia de un elemento desconocido por la gran mayoría de la población (la formación y evolución de una nube "que mata", la explosión e incendio de depósitos combustibles con la formación de esferas de fuego de dimensiones insospechadas), con consecuencias a veces muy graves (más de 200 muertos en Els Alfacs, entre 2.500 y 3.000 en Bhopal, 1.000 en Los Urales) y, a menudo, con una cifra importante de personas evacuadas.

Con un origen diferente, pero con algunas características semejantes a las de los denominados riesgos mayores, se encuentran los riesgos de catástrofes naturales (huracanes, terremotos, etc.).

Es interesante establecer una comparación entre ambos. La figura 1.5 permite comparar el riesgo total provocado por el hombre (grandes accidentes) con el riesgo total debido a acontecimientos naturales; en abscisas se ha representado la magnitud (M) del accidente (número de víctimas), y en ordenadas, la frecuencia de los sucesos (por año) con una magnitud igual o superior a M . Puede observarse como, si bien para bajas magnitudes la

frecuencia es similar en ambas categorías, a medida que aumenta el número de muertes la frecuencia disminuye más rápidamente (en general) en el caso de los accidentes causados por el hombre.

EL ANÁLISIS DE RIESGO

La evaluación de los diversos riesgos asociados a una determinada instalación industrial o, incluso, al transporte de mercancías peligrosas, se lleva a cabo, como ya se ha dicho anteriormente, mediante el análisis de riesgos, orientado a la determinación (con una aproximación razonable) de los aspectos siguientes:

- Accidentes que pueden ocurrir.
- Frecuencia de estos accidentes.
- Magnitud de sus consecuencias.

Su aplicación a un proyecto, a una operación o a unas instalaciones determinadas se ha representado de forma simplificada en la figura 1.6.

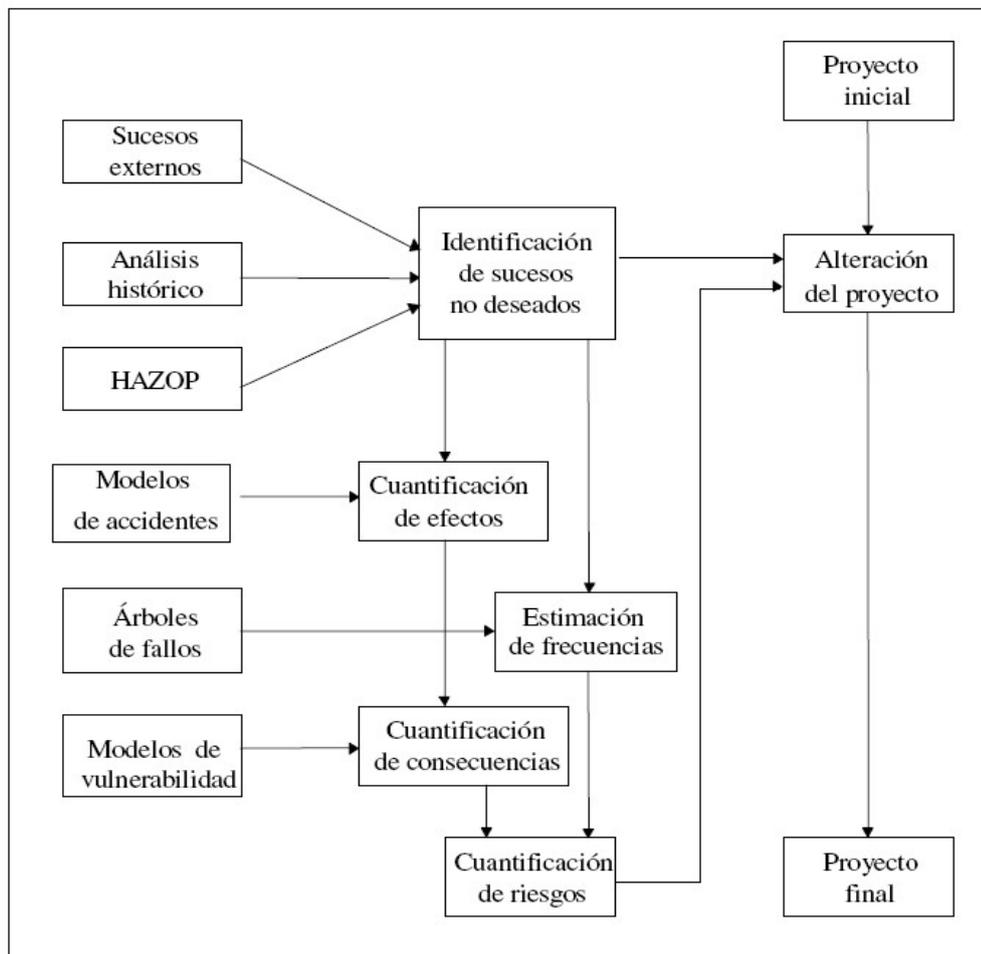


Figura 1.6 Análisis de riesgo

El primer paso es el estudio de los denominados *acontecimientos externos*, es decir, de los peligros que pueden venir de fuera del sistema analizado (por ejemplo, una inundación, una nube tóxica procedente de una fábrica vecina, o un vehículo que se sale de la carretera y, entrando en el recinto de la planta, choca contra un depósito).

Este estudio no supone ningún procedimiento especial en sí mismo, se trata simplemente de analizar, con buen criterio, todos los peligros posibles.

Referente a los propios peligros del sistema, la primera forma de analizarlos es el análisis histórico; consiste en el estudio de los accidentes ocurridos previamente en sistemas que presentaban alguna similitud con el que se está analizando. El análisis histórico, llevado a cabo de forma muy rápida y simple mediante la consulta de un banco de datos informatizado, puede dar de forma muy directa algunos puntos débiles del sistema, o indicar los peligros presumiblemente más esperados.

No es, sin embargo, un método que permita explorar sistemáticamente los peligros de una determinada instalación. Por esta razón debe ser complementado con otro procedimiento que implique una exploración exhaustiva de todos los orígenes posibles de accidentes. Es el llamado HAZOP (de HAZard and OPerability analysis) o *análisis de riesgo y operabilidad*.

Hay otros métodos que permiten realizar análisis similares, pero el HAZOP, con sus diversas variantes, es el más utilizado.

Una vez identificados los peligros, deben cuantificarse todas sus consecuencias posteriores. Para calcular sus efectos (es decir, radiación térmica en función del tiempo y la distancia, onda de sobrepresión, distribución de concentraciones en la atmósfera, etc.) se utilizan modelos matemáticos de los accidentes (capítulos 4, 5, 6 y 7). Aquí hay que tener en cuenta que lo que se realizan son cálculos aproximados; la palabra *estimación* resulta, pues, más apropiada que *cálculo*.

Conocidos ya los valores aproximados de los efectos, debe establecerse cuáles serán las consecuencias cuando éstos incidan en personas, en bienes o en el entorno; debe estimarse, pues, cuál será el número de muertos y de heridos, cuál será la destrucción provocada en edificios y equipos, y cuál será el impacto sobre el entorno cuando un accidente determinado se produzca en un lugar determinado.

Esto se suele realizar mediante los denominados modelos de vulnerabilidad, que relacionan efectos y consecuencias.

Si el análisis se da por finalizado aquí, se habrá hecho simplemente un tratamiento de tipo determinístico: establecimiento de los peores accidentes que pueden ocurrir y estimación de sus consecuencias. Para estimar de forma completa el riesgo, según la definición cuantitativa dada al inicio de este capítulo, debe hacerse un análisis más completo realizando, además, un tratamiento de tipo probabilístico.

Para llevar a cabo esto, que en definitiva equivale a estimar la frecuencia con que probablemente se producirá el accidente (si llega a ocurrir), el instrumento más utilizado es el análisis cuantitativo de los denominados *árboles de fallos*.

El árbol de fallos es un esquema de las secuencias o concatenaciones de sucesos que deben producirse para que tenga lugar un "suceso no deseado" o accidente. Mediante este árbol es posible "descender" desde el accidente hipotético hasta acontecimientos mucho más simples (avería de una válvula, por ejemplo), que comúnmente suceden en cualquier instalación industrial. En estos incidentes "primarios" es posible, pues, conocer la frecuencia del fallo (o la probabilidad de fallo en un momento dado).

Esto permite, mediante la combinación lógica de frecuencias y/o probabilidades, estimar la frecuencia con que presumiblemente sucederá el accidente. De este modo se llega a obtener un valor para el riesgo de un accidente determinado. Si este valor es demasiado alto, se debe modificar el proyecto o la instalación (o el método de trabajo) hasta conseguir un riesgo considerado tolerable.

Un método simplificado para la estimación del riesgo

Un análisis exhaustivo del riesgo es sin duda el mejor sistema para establecer cuál es el riesgo en una determinada situación y si el mismo es o no tolerable. Sin embargo, este método presenta el inconveniente de ser relativamente complejo y caro, y de requerir bastante tiempo de personal especializado. Por esto se han propuesto otros métodos, mucho más sencillos, para hacer estimaciones no tan precisas, que puedan ser aptas para comparar situaciones o para poner de manifiesto la conveniencia de emprender determinadas acciones o adoptar otro tipo de medidas más acordes.

A continuación se expone brevemente el sistema basado en la determinación del *número de riesgo* HRN (*Hazard Rating Number*). Este método simplificado está basado en los cuatro factores siguientes, a los cuales se atribuye un valor de la gama indicada en cada caso:

1. Posibilidad de exposición al peligro (valor comprendido entre 0= imposible y 15= seguro).
2. Frecuencia de la exposición al peligro (de 0,1 = no frecuente a 5 = constante).
3. Número de personas sometidas al riesgo (desde 1 = entre 1 y 12 personas, a 12 = 50 o más personas).
4. Máxima pérdida probable (de 0,1 = arañazos o cardenales a 15 = muerte).

El producto de estos cuatro factores da un valor del HRN; las categorías de riesgo correspondientes pueden verse en la tabla 1.10, así como los planes de acción adecuados.

Tabla 1.10 Estimación del riesgo y niveles de acción que deben emprenderse

<i>Riesgo</i>	<i>HRN</i>	<i>Plan de acción para la gestión</i>
Riesgo "tolerable"	0-1	Aceptar el riesgo/considerar posibles acciones
Riesgo muy bajo	1-5	Actuar en 1 año
Riesgo bajo	5-10	Actuar en 3 meses
Riesgo importante	10-50	Actuar en 1 mes
Riesgo alto	50-100	Actuar en 1 semana
Riesgo muy alto	100-500	Actuar en 1 día
Riesgo extremo	500-1.000	Actuar inmediatamente
Riesgo intolerable	>1.000	Parar la actividad/eliminar el peligro

Riesgo, fiabilidad y coste

La frecuencia con que tendrá lugar un accidente está directamente relacionada con la probabilidad de que, en un momento dado, todos los componentes del sistema en cuestión estén en disposición de cumplir correctamente con la función para la cual se han previsto. La frecuencia de un accidente está, pues, estrechamente relacionada con la *disponibilidad* del sistema (definida como la relación entre el tiempo durante el cual el sistema está en condiciones de operación correcta y el tiempo total).

El estudio de fiabilidad de una instalación tiene, pues, una doble incidencia sobre el coste: por una parte, aumenta la seguridad del sistema y reduce o elimina el coste (generalmente muy elevado) de los accidentes; por otra, permite aumentar la disponibilidad del sistema, se eliminan las paradas y, como consecuencia, se incrementa la productividad (Fig. 1.8).

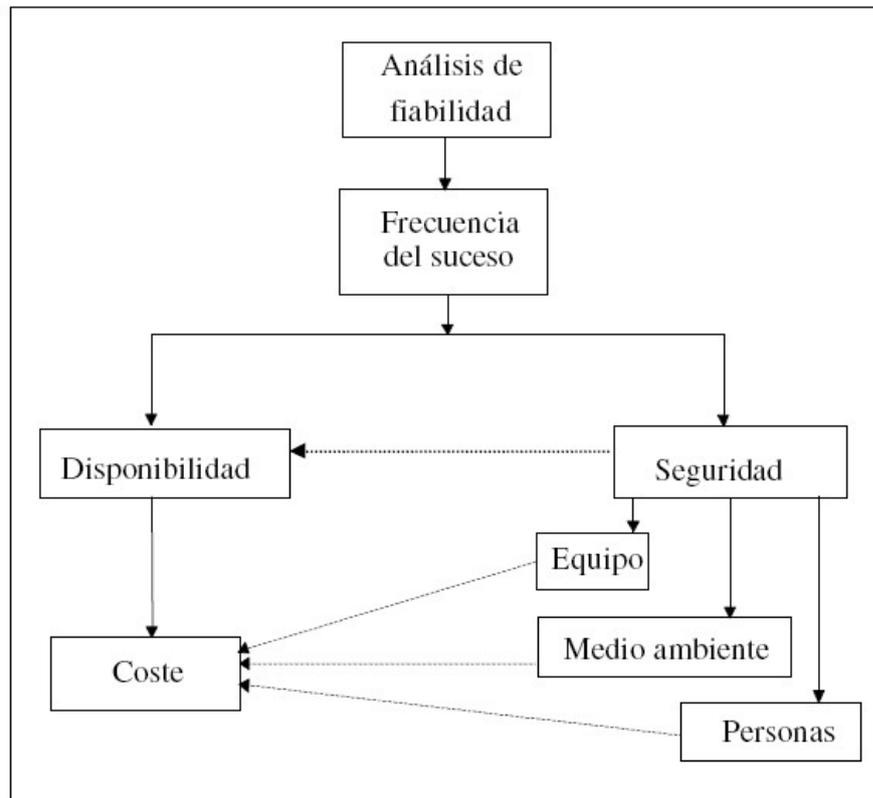


Fig 1.8 Relación entre análisis de fiabilidad, seguridad y coste

Es verdad que, paralelamente, el análisis de riesgo implica asimismo un coste añadido: en primer lugar el coste del equipo humano que realiza el estudio, que variará en función de su extensión; en segundo lugar, hay que tener en cuenta que el análisis de riesgo origina casi siempre un coste adicional para el proyecto o la instalación, debido a las modificaciones y al aumento de instrumentación, elementos redundantes, etc.

No obstante, las mejoras debidas al incremento de la productividad y a la reducción del número y la magnitud de los accidentes (de un coste económico muy elevado, además del coste social) son, generalmente, muy superiores. Esto supone que incluso desde el punto de vista puramente económico, el análisis de riesgos sea una metodología aconsejable para muchas instalaciones.

IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

Conceptos previos

El primer requisito para una evaluación y una gestión correctas del riesgo industrial es la identificación de los distintos accidentes que razonablemente pueden producirse en una determinada instalación.

Las técnicas de identificación de peligros no se limitan sólo a la individualización de los accidentes mayores, sino también a la posibilidad de que se produzcan otros incidentes relacionados con el funcionamiento del proceso.

Las técnicas de identificación de peligros dan respuesta a las preguntas *¿qué puede funcionar mal?* y *¿por qué razón?* La respuesta a otras cuestiones como *¿con qué frecuencia?* y *¿qué efectos tiene?* se resuelven con otras técnicas probabilísticas y determinísticas del análisis del riesgo.

En la industria química, los accidentes suelen ser el resultado de unas condiciones de proceso inadecuadas para las diversas características físicas y químicas de los materiales y de las sustancias.

Estas condiciones, excepto en el caso de fallos de diseño, suelen ser desviaciones de las condiciones normales de funcionamiento y se presentan como problemas no siempre evidentes desde la experiencia operativa.

Antiguamente, el método más utilizado para responder a la pregunta *¿qué es lo que puede funcionar mal?* consistía en construir, poner en marcha y mirar lo que sucedía.

En la actualidad esta metodología resulta del todo inadecuada, sobre todo a causa de la rápida evolución tecnológica y el aumento paralelo de la magnitud de los accidentes.

Para la identificación del peligro potencial de los procesos industriales, la tendencia de las últimas décadas ha sido desarrollar técnicas o métodos de análisis cada vez más racionales y sistemáticos.

El proceso racional de identificación se realiza en dos fases bien diferenciadas: la primera para detectar posibles accidentes, y la segunda para la caracterización de sus causas, o sea, los sucesos o cadenas de sucesos que provocan el incidente no deseado.

La primera fase es relativamente sencilla, pero debe realizarse con mucha atención ya que define el desenlace de la segunda.

- **Métodos cualitativos:** auditoría de seguridad (*Safety review*), análisis histórico de accidentes, análisis preliminar de peligros (*Preliminar Hazard Analysis, PHA*), listados de control (*Check lists*), ¿qué pasa si...? (*What if...?*), análisis de peligro y operabilidad (*HAZard and OPerability analysis, HAZOP*) y análisis de modos de fallo y efectos (*Failure Modes and Effect Analysis, FMEA*).
- **Métodos semicuantitativos:** índice Dow, índice Mond, índice SHI y MHI (*Substance Hazard Index i Material Hazard Index*), árboles de fallos (*Fault Tree, FT*) y árboles de sucesos (*Event Tree, ET*)¹.

Todas las técnicas de análisis mencionadas se caracterizan porque se desarrollan en tres etapas: preparación, realización del estudio propiamente dicho y documentación.

La preparación es una actividad muy similar en todas las técnicas de análisis e implica actividades tan diversas como la recogida de información, la definición del objetivo y su alcance, la selección del personal implicado (en general, este tipo de estudios es realizado por equipos multidisciplinares), la programación, etc.

El conocimiento de las propiedades de las sustancias y su manipulación dentro del proceso es un aspecto importante para el correcto desarrollo del análisis posterior. De la misma manera, una definición ajustada del objetivo y del alcance del estudio permitirá llevarlo a cabo eficientemente.

La realización del estudio varía mucho según las diversas técnicas de análisis y responde al seguimiento de su propio protocolo. La documentación no sólo hace referencia a los resultados conseguidos, sino también al propio desarrollo del estudio.

Estas técnicas son aplicadas a distintas etapas de la vida de los procesos industriales: diseño, construcción, puesta en marcha y funcionamiento de una operación normal, modificaciones del proceso y desmantelamiento o abandono de las instalaciones. La

identificación de los accidentes potenciales en las primeras etapas de diseño mejora la eficacia de las medidas reductoras del riesgo, y al mismo tiempo disminuye los costes de su implementación.

No se debe dejar de lado que la gestión del riesgo se realiza de forma continuada a lo largo de la vida de la instalación; por lo tanto, la identificación siempre está presente. En las distintas etapas del proyecto, el nivel de detalle e inclusive los objetivos de la identificación varían.

- 1 Se han incluido los árboles de fallos y los árboles de sucesos puesto que se utilizan para la identificación de cadenas de circunstancias que conducen a un acontecimiento no deseado.
- 2 Este último punto tiene una importancia especial en la clausura de centrales nucleares.

Las técnicas de análisis tienen características distintas, lo cual las hace apropiadas para ser aplicadas a diferentes etapas de la vida de una instalación o para proporcionar un nivel de detalle del estudio diferente.

La elección de una u otra técnica se debe efectuar a partir del conocimiento de las ventajas y desventajas de cada una, y de una correcta estimación de la duración del estudio (concepto siempre ligado a aspectos económicos). Una estimación inadecuada de cualquiera de los aspectos (complejidad del proceso, etapa del proyecto, nivel de detalle que se quiere conseguir y recursos necesarios) suele desbaratar el estudio o simplemente producir resultados inadecuados a los objetivos planteados. La figura 2.1 muestra las técnicas de análisis que son utilizadas normalmente en las diferentes etapas de la vida de las instalaciones de proceso.

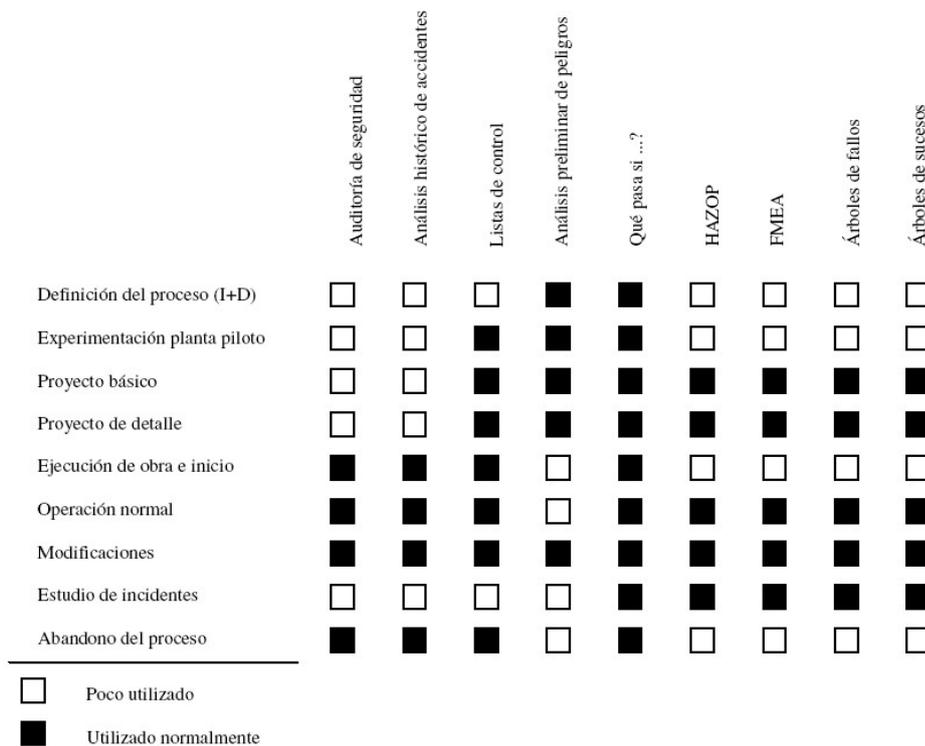


Fig. 2.1 Utilización de las técnicas identificativas del riesgo

Los tres tipos de resultados que estos estudios pueden proporcionar son: un listado de situaciones peligrosas, la valoración de estas situaciones y una serie de medidas dirigidas a la reducción del riesgo asociado.

No todas las técnicas tienen que propiciar estos tres tipos de resultados; de hecho, muchas de ellas simplemente deben identificar el problema, mientras que otras tienen que priorizar y proponer medidas correctoras. Las auditorías de seguridad, el análisis histórico de accidentes, los listados de control, el análisis preliminar del peligro y los índices *Dow*, *Mond*, *SHI* y *MHI* proporcionan una primera idea general del peligro de la instalación a estudiar. Los análisis *¿qué pasa si...?*, *HAZOP* y *FMEA* permiten una visión más detallada del peligro intrínseco y de operación de la instalación.

Los árboles de fallos y de sucesos dan un elevado nivel de detalle en situaciones de extrema gravedad. El seguimiento adecuado de los estudios incrementa su efectividad y proporciona una mejora en la seguridad y fiabilidad de la instalación industrial. Otra mejora no evidente es la disminución de los costes de operación añadidos por la indisponibilidad y los accidentes de la planta.

Éstos son difícilmente cuantificables ya que no son fijos, ni aparecen en la cuenta de resultados, ni forman parte del precio final del producto. El seguimiento del estudio incluye temas tan diversos como la documentación del análisis, la comunicación del riesgo, y la priorización y control de las medidas propuestas para la reducción del riesgo.

Hay cinco limitaciones inherentes a todas las técnicas de identificación que aquí se presentan:

- **La exhaustividad del estudio:** no hay posibilidad de verificar que todas las posibles desviaciones y fallos del sistema hayan sido identificados. Tampoco puede verificarse que todas las causas y efectos de los accidentes potenciales hayan sido considerados. Y, finalmente, tampoco puede asegurarse que la valoración de los incidentes y sucesos identificados sea la más conveniente.
- **La reproducibilidad de los resultados:** el mismo estudio llevado a cabo en idénticas condiciones por diferentes especialistas da resultados distintos. La carga subjetiva de los estudios hace que éstos sean difícilmente reproducibles.
- **Lo inextricable de las conclusiones:** la cantidad de documentación generada por el estudio y la falta de detalles importantes que sólo se materializan en la comunicación verbal de las sesiones de trabajo, hacen los análisis relativamente difíciles de interpretar.
- **La importancia de la experiencia:** todas las técnicas que se presentan, desde las listas de control hasta el análisis *HAZOP*, están basadas en mayor o menor grado en la experiencia adquirida y en la creatividad del analista.
- **El nivel de confianza generado por el estudio:** la subjetividad introducida en la valoración de los sucesos identificados puede generar cierto escepticismo respecto a los resultados del estudio.

Pese a las limitaciones aparentes de las técnicas de análisis que aquí se presentan, debe señalarse su versatilidad y su amplia utilización. En realidad, la experiencia demuestra que en una gestión del riesgo adecuada, basada siempre en una identificación correcta, el número de accidentes tiende a disminuir paralelamente a la disminución de la magnitud de sus consecuencias.

Descripción de las técnicas de análisis

El objetivo de este apartado es mostrar una recopilación significativa de las técnicas de análisis más utilizadas en la industria química para la detección de los riesgos potenciales.

En primer lugar, se presenta una metodología muy sencilla para identificar el peligro intrínseco de las sustancias implicadas en el proceso estudiado; éste sería el primer paso de cualquier estudio de identificación.

El análisis histórico de accidentes ha sido escogido como técnica representativa de las que ofrecen una primera aproximación y una visión general del riesgo de una instalación. Se ha hecho especial referencia al análisis HAZOP por ser éste, posiblemente, el método más reconocido y utilizado en la industria química, y porque es el que presenta más variantes metodológicas en la práctica. Para finalizar, también se presentan los árboles de fallos como método más representativo de las técnicas que estudian con detalle posibles accidentes ya identificados.

Identificación del peligro asociado a las sustancias

El primer paso para una identificación correcta del peligro potencial de una instalación industrial es la identificación y caracterización de las sustancias involucradas en el proceso. Los datos de interés para los análisis posteriores son básicamente las propiedades de las sustancias presentadas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Datos de uso común para la identificación del peligro de las sustancias

<p>Etiquetado:</p> <ul style="list-style-type: none"> - etiquetado de peligro (F+, F, T+, T, O, C, Xi, Xn, N) - frases R y S <p>Toxicidad:</p> <ul style="list-style-type: none"> - aguda por inhalación, ingestión o contacto - crónica por inhalación, ingestión y contacto <p>Límites de exposición:</p> <ul style="list-style-type: none"> - TLV - IPVS <p>Propiedades físicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - punto de congelación - coeficiente de expansión - punto de ebullición - solubilidad - presión de vapor - densidad - corrosión - capacidad calorífica 	<p>Propiedades químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - reacción principal y reacciones secundarias - cinética de reacción - contaminantes - reacciones de descomposición - estabilidad <p>Inflamabilidad y explosividad:</p> <ul style="list-style-type: none"> - límite inferior de inflamabilidad - límite superior de inflamabilidad - límite inferior de explosividad - límite superior de explosividad - temperatura de autoignición - temperatura de inflamación - energía mínima de ignición <p>Biodegradabilidad</p> <p>Otras</p>
---	--

Hay una numerosa bibliografía donde se puede encontrar la mayoría de las propiedades expuestas en la tabla anterior.

El interés de estos datos radica principalmente en el efecto que las condiciones de operación producen sobre las sustancias involucradas en el proceso (por ejemplo, el agua en condiciones normales no presenta peligro de explosión; en cambio, en una caldera donde las condiciones de temperatura y presión son muy superiores al punto de ebullición a presión atmosférica, puede producir un accidente mayor del tipo BLEVE). El conocimiento de las posibles condiciones de operaciones normales y anómalas permite considerar y eliminar diferentes sustancias como susceptibles de provocar un accidente mayor.

Para identificar estas relaciones entre sustancias y condiciones de proceso se puede utilizar el sentido común, la experiencia y técnicas más sistemáticas como son las matrices de interacción.

Las matrices de interacción consisten simplemente en matrices, normalmente con dos entradas, donde se relacionan y evalúan los efectos que las condiciones normales y

anómalas de funcionamiento producen sobre las sustancias involucradas en el proceso (Fig. 2.2).

Los resultados de estas matrices permiten orientar el posterior estudio de la instalación y evitan desatender aspectos que pueden ser relevantes (ver el ejemplo de análisis HAZOP en el apartado 2.2.3 f).

	Substancia 1	Substancia 2	Substancia n	Comentarios
Substancia 1					
Substancia 2					
....					
Substancia 3					
Presión de trabajo del equipo 1					
Presión máxima del equipo 1					
....					

Fig. 2.2 Matriz de interacción

ANÁLISIS HISTÓRICO DE ACCIDENTES

a) Descripción y objetivos

El análisis histórico de accidentes es una técnica identificativa orientada a la búsqueda de información de accidentes industriales ocurridos en el pasado. Esta técnica de análisis es esencialmente cualitativa pero también permite extraer resultados numéricos o cuantitativos si el número de accidentes es suficientemente significativo y permite un análisis estadístico.

La técnica se basa en una recopilación de accidentes con productos químicos en forma de banco de datos donde se encuentra almacenada la información relativa a los mismos. La recogida sistemática de información relativa a diferentes accidentes ocurridos en el pasado en plantas químicas y actividades afines ha permitido, en algunos casos, la acumulación de datos concretos sobre una determinada situación, equipo u operación: carga o descarga de cisternas, transporte de mercancías peligrosas, procesos de fabricación de un producto determinado, parques de almacenamiento, vertido de líquidos inflamables, escape de un gas tóxico, etc.

En bastantes casos, el número de accidentes registrados es suficientemente elevado como para permitir una deducción de información significativa. En estas condiciones es posible observar una determinada "pauta" presente en el origen de un determinado porcentaje de incidentes (por ejemplo, en la operación de carga y descarga de fluidos o por la acumulación de un líquido inflamable derramado cerca de un depósito que también lo contiene). En otras ocasiones es posible simplemente identificar un cierto número de

situaciones, operaciones o errores que han favorecido el inicio de un accidente en un tipo de instalación determinado.

En todos estos casos, el conocimiento de la información adecuada permite, de alguna manera, el establecimiento de "puntos débiles" en el sistema cuya seguridad quiere estudiarse.

Por otro lado, los accidentes ocurridos en el pasado constituyen un conjunto de "datos experimentales", obtenidos a menudo a un precio muy elevado, relativos a un campo en el que resulta casi imposible la experimentación a escala real: explosiones de todo tipo, confinadas y no confinadas, de polvo, de gas, BLEVE, incendios, formación de nubes tóxicas, etc. El conocimiento exacto de las condiciones en que se ha producido un accidente determinado (masa involucrada, dimensiones de la nube, condiciones atmosféricas, etc.) y sus consecuencias (radiación y/o impacto a diversas cotas y distancias, daños a personas y construcciones, etc.) permite contrastar y validar los modelos teóricos de predicción de efectos de este tipo de accidentes.

Sin esta información, estos modelos únicamente se pueden contrastar, en el mejor de los casos, con la experimentación a pequeña escala, actualmente desarrollada en pocos centros de investigación.

Evidentemente, esta experiencia real sólo puede utilizarse en aquellos casos en los que se dispone de una información completa sobre el accidente: causas iniciales, secuencia posterior, condiciones ambientales, etc. Por ello la investigación de cualquier accidente y el posterior almacenamiento de la información en un archivo adecuado es tan importante.

Debe decirse que la palabra *accidente* comprende no sólo los accidentes ocurridos sino también los *casi-accidentes*, es decir, aquellas situaciones que, de no haberse controlado a tiempo, fácilmente hubieran podido terminar en un auténtico accidente.

Actualmente se recoge información, tanto por lo que se refiere a accidentes como a fiabilidad de componentes, en actividades muy diversas:

- Centrales nucleares
- Transporte y aviación
- Transporte de mercancías peligrosas
- Industria química y afines
- Plataformas petrolíferas
- Construcción
- Tratamiento médico, etc.

Los entes interesados en la recogida de datos son también diversos:

- Administración
- Propietarios y técnicos de plantas
- Procedimientos judiciales
- Compañías aseguradoras
- Servicios de intervención en emergencias
- Investigadores.

Evidentemente, los intereses y los objetivos de la recogida de datos y el estudio de estos datos pueden ser distintos en cada caso.

b) Recogida de información

La recogida de información de un accidente debe constituir una verdadera investigación. El estudio detallado del accidente puede enfocarse, a grandes líneas, de dos formas distintas:

- Evaluación de la magnitud de las consecuencias: daños a personas, bienes o medio ambiente.
- Establecimiento de la situación que existía con anterioridad al accidente y de la secuencia de sucesos que lo provocaron.

El conjunto de estas dos vías de investigación permite elaborar el historial del accidente. La información contenida en este historial resulta de gran utilidad para:

- Detectar medidas técnicas u organizativas para reducir la probabilidad de que se repitan los accidentes.
- Elaborar medidas de protección, internas y externas, que reduzcan las consecuencias probables del eventual accidente.
- Contrastar los modelos de evaluación de efectos y consecuencias.

Esta información, para ser realmente útil, debe cumplir las condiciones siguientes:

- Ser registrada sistemáticamente en un archivo.
- Contener la referencia de las fuentes originales.
- Ser asequible desde distintas entradas.
- Admitir un tratamiento estadístico de datos.

Todas estas condiciones justifican la necesidad de establecer bancos de datos. La forma como se debe recoger y archivar la información se comenta en el siguiente apartado.

c) Bancos de datos de accidentes

La estructura de un banco de datos de este tipo depende esencialmente de dos factores:

- el tipo de usuario previsto
- las fuentes de información.

El tipo de usuario determina la necesidad de profundizar en la secuencia del accidente o en sus consecuencias, o bien en los dos aspectos simultáneamente.

Las fuentes de información pueden abarcar también preferentemente uno de estos dos aspectos; en todo caso, debe tenerse en cuenta que la información suele ser fragmentaria e incompleta, por lo cual el sistema de captación y archivo empleado no puede consentir rehusarla. Las fuentes de información más usuales son:

- **Informes redactados en la misma industria.** Suelen ser detallados y completos, y permiten incluir incidentes o *casi-accidentes*. Su utilización suele estar restringida a una industria o grupo de industrias.
- **Información pública.** Suele corresponder a los accidentes de cierta importancia que aparecen publicados en la prensa. El tratamiento periodístico que se da a este tipo de información acostumbra a revestirse de dramatismo; también presenta los inconvenientes inherentes a una publicación muy rápida (errores, inexactitudes). A pesar de esto, su carácter de aparición inmediata hace que pueda ser un complemento útil en cualquier investigación posterior.

- **Sumarios judiciales.** Tienen la ventaja de incluir al mismo tiempo causas y efectos. Están disponibles pero con cierto retraso, que en algunos casos puede ser considerable.
- **Investigaciones de la administración.** Pueden ser muy rápidas y completas, pero en muchos casos son secretas o de difusión restringida.
- **Archivos de empresas aseguradoras.** Pueden contener información bastante completa, pero su utilización es restringida.

La recogida de información debe efectuarse de forma sistemática, teniendo especificado con claridad qué datos deben registrarse y con qué nivel de detalle. De forma general, debe comprender los siguientes aspectos:

- Identificación de la actividad.
- Tipo de actividad (transporte, proceso, carga, etc.).
- Tipo de industria (petroquímica, farmacéutica, etc.).
- Tipo de proceso (producción de acrilonitrilo, etc.).
- Principales sustancias implicadas.
- Tipo de accidente: incendio, explosión, nube tóxica, escape de producto, etc.
- Identificación del accidente: fecha y hora, causa o suceso inicial, secuencia, sistemas implicados en la secuencia, etc.
- Identificación de las consecuencias sobre la población interna y externa, sobre la planta y sobre el medio ambiente.
- Medidas adoptadas para evitar nuevos accidentes.

Esta información se recoge en unos formularios. La elaboración de estos formularios no es tarea fácil, ya que deben ser claros y a su vez suficientemente detallados como para admitir cualquier tipo de información disponible.

Es interesante tener en consideración, ya desde el primer momento, la futura introducción de la información en un sistema informatizado.

Es muy importante tener en cuenta, cuando se utiliza la información contenida en un banco de datos sobre accidentes, o especialmente cuando se introduce dicha información, que cualquier razonamiento o cálculo basado en información o datos dudosos conduce irremediabilmente a resultados dudosos.

Es interesante advertir la conveniencia de que este trabajo sea llevado a cabo por personal especializado.

El procedimiento general de tratamiento de la información suele ser el siguiente:

- Recogida de datos.
- Elaboración de una ficha de síntesis para cada accidente (selección eventual de la información "válida" entre toda la recogida procedente de distintas fuentes, o de la misma fuente en ocasiones diversas y sucesivas).
- Selección de los parámetros que se someterán a tratamiento informático.
- Introducción en la memoria del ordenador.

Entre los bancos de datos actuales más importantes, destacan los siguientes:

MHIDAS	con más de 7.000 accidentes de todo el mundo, comercializado en formato CD ROM [MHID93]
FACTS	con los 15.000 accidentes más graves de los últimos 60 años, disponible en disquetes
SONATA	con un número inferior de accidentes, es menos detallado que el MHIDAS, pero más que el FACTS en aspectos descriptivos
MARS	con accidentes ocurridos en países de la comunidad europea y con información muy detallada procedente de las empresas implicadas

Evidentemente, el inconveniente de esta metodología es la necesidad de tener acceso a bases de datos cuando la mayoría de las empresas no las posee; debe tenerse en cuenta, sin embargo, que algunas de las bases de datos mencionadas están comercializadas, es decir, que es posible adquirir la información deseada pagando previamente la licencia correspondiente para su utilización.

d) Metodología de análisis

El método de análisis empleado no está excesivamente estructurado. El acceso a las bases de datos suele realizarse mediante palabras clave.

La concurrencia de diferentes palabras clave permite acotar la información y llegar a la identificación de los accidentes que pueden ser interesantes para el estudio.

Después de una evaluación de la información, ésta se ordena y, si los datos lo permiten, se procesa estadísticamente para obtener resultados numéricos que faciliten su interpretación.

e) Advertencias y limitaciones

Las principales limitaciones del análisis histórico de accidentes son:

- La instalación objeto de estudio no es exactamente igual a las que ya han sufrido accidentes.
- El número de accidentes que han ocurrido en el pasado y de los cuales se tiene información es limitado, y estos accidentes no son representativos de todos los que pueden ocurrir.
- La información de los accidentes suele ser incompleta y, en muchas ocasiones, inexacta o de uso restringido.
- No da información sobre todos los accidentes posibles sino únicamente sobre los que han sucedido y se han documentado hasta la fecha.
- El acceso a los bancos de datos implica un cierto coste.

Todas estas limitaciones hacen del análisis histórico de accidentes una técnica de identificación muy interesante, pero que debe ser complementada con otros estudios de índole más sistemática (análisis HAZOP, árboles de fallos, etc.).

f) Resultados y aplicabilidad

El resultado principal de los análisis históricos de accidentes es una lista de accidentes que efectivamente han sucedido, por lo que el riesgo identificado es indudablemente real y

permite el establecimiento de puntos débiles y operaciones críticas en instalaciones similares.

Los resultados permiten dar una idea general del riesgo potencial de la instalación y verificar los modelos de predicción de efectos y consecuencias de accidentes con datos reales.

El análisis histórico de accidentes es de aplicación limitada para instalaciones con procesos innovadores de los cuales no existe una experiencia previa.

g) Ejemplo de análisis histórico

El ejemplo que se presenta es el resultado de un análisis histórico sobre accidentes ocurridos en el almacenamiento de gas licuado de petróleo. El análisis se basó en 80 casos. La distribución porcentual de los accidentes fue la que se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Distribución porcentual de accidentes

	<i>Núm. accidentes (%)</i>
Llamarada	34
Escape dispersado sin incendio	19
BLEVE	17
Explosión de nube de vapor no confinada	15
Explosión confinada de vapor	15

Considerando que los accidentes (o incidentes) sin consecuencias evidentes son a menudo ocultados y no declarados, el porcentaje correspondiente a los "escapes dispersados sin incendio" es probablemente poco fiable. Parece más realista, pues, prescindir de ellos.

En este caso, la nueva distribución sería la de la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Distribución porcentual modificada de accidentes

	<i>Núm. accidentes (%)</i>
Llamarada	41
BLEVE	21
Explosión de nube de vapor no confinada	19
Explosión confinada de vapor	19

Del estudio de estos accidentes se extrae la información simplificada siguiente:

Causas originarias:

- rotura de mangueras
- derrame por rebosamiento
- congelación en posición abierta de válvulas de purga
- rotura de conexiones de pequeño diámetro
- choque de vehículos en maniobra
- mantenimiento defectuoso

- causas naturales.

Puntos de ignición:

- automóviles
- motores y cuadros eléctricos
- llamas libres (hornos, etc.).

Daños:

- proyección de fragmentos hasta 1.200 m
- rotura de vidrios hasta 11 km.
- bolas de fuego de hasta 350 m de diámetro.

Otras informaciones de interés:

- los depósitos sometidos a fuego directo han experimentado BLEVE hasta en 1 min tan sólo desde el inicio de la emergencia.

Conclusiones:

- evitar conexiones flexibles
- prever situaciones de derrame e instalar alarmas de alto nivel
- instalar doble válvula (una, controlada a distancia) en las conducciones de purga
- limitar y controlar las conexiones de pequeño diámetro (poco resistentes)
- reglamentar el tránsito interior de vehículos
- eliminar puntos de ignición, prever distancias de separación, prever el control de derrames y la dispersión de vapor, etc.

ANÁLISIS DE PELIGROS Y OPERABILIDAD (HAZOP)

a) Descripción y objetivo

El análisis de peligros y operabilidad (*HAZard and OPERability Analysis, HAZOP*), conocido también como análisis de riesgo y operabilidad o análisis funcional de operabilidad (AFO) o análisis operativo (AO), en un método que fue diseñado en Inglaterra en la década de los sesenta por Imperial Chemical Industries (ICI) para aplicarlo al diseño de plantas de fabricación de pesticidas.

La definición dada por la Chemical Industry Association en su guía es:

"La aplicación de un examen crítico, formal y sistemático a un proceso o proyecto de ingeniería de nueva instalación, para evaluar el riesgo potencial de la operación o funcionamiento incorrecto de los componentes individuales de los equipos, y los consiguientes efectos sobre la instalación como conjunto."

El análisis HAZOP es una técnica **deductiva** para la identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico.

El análisis pretende, mediante un protocolo relativamente sencillo, estimular la creatividad de un equipo de expertos con diferente formación para encontrar los posibles problemas operativos.

La técnica se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema. La

identificación de estas desviaciones se realiza mediante una metodología rigurosa y sistemática. El fallo del sistema puede provocar desde una parada sin importancia del proceso hasta un accidente mayor de graves consecuencias.

b) Metodología del análisis

El paso previo para el desarrollo del análisis es la definición del objetivo y el alcance del estudio, de los límites físicos de la instalación o el proceso que se quiera estudiar y de la información requerida.

Además debe estudiarse el sistema o proceso ya definido para conocer la información disponible, prepararla y organizar el equipo de estudio, y planear la secuencia de estudio y las sesiones de trabajo.

Después del estudio previo se puede comenzar el análisis propiamente dicho (ver la figura 2.3 adaptada de la bibliografía). El primer paso es la selección de los elementos críticos que deben estudiarse (depósitos, reactores, separadores, etc.).

A continuación, sobre cada *nodo de estudio*, que corresponde a cada línea de fluido de cada elemento seleccionado, y de forma secuencial y repetitiva, se aplican las *palabras guía* (*no, más, menos, otro, parte de*, etc.) a cada una de las condiciones de operación del proceso, las sustancias y las variables que intervienen (flujo, presión, temperatura, nivel, tiempos, etc.). Operando de esta manera se generan las desviaciones significativas de las condiciones normales de operación y se realiza un repaso exhaustivo de los posibles funcionamientos anómalos.

Las principales *palabras guía* propuestas originalmente por ICI y los parámetros de proceso a los que se aplican se muestran en la tabla 2.4. Un caso particular es el estudio de procesos discontinuos y manuales operativos, donde se toman las operaciones propiamente (carga, descarga, etc.) como parámetro sobre las cuales aplicar las palabras guía.

El estudio de las desviaciones conduce a la identificación de sus posibles causas y consecuencias y, por lo tanto, del riesgo potencial y de los problemas derivados de un funcionamiento incorrecto; paralelamente, se buscan los medios protectores del sistema.

Toda la información del análisis es documentada ordenadamente en forma de tabla (Fig. 2.4), hecho que permite la evaluación cualitativa de las medidas de control y seguridad. A partir de esta información es relativamente sencillo implementar nuevas medidas para la mejora de la seguridad y fiabilidad del sistema.

La metodología inicialmente desarrollada por ICI propone la aplicación de las *palabras guía* a todas las líneas de flujo de todos los equipos principales que conformen la instalación. Actualmente, las desviaciones se generan en un número de equipos seleccionados según diferentes criterios.

Hay numerosas variaciones del protocolo de análisis que pretenden mejorar la baja efectividad del método *clásico*, donde hasta el 90% de las cuestiones planteadas pueden resultar irrelevantes para la mejora de la seguridad del proceso.

3 Análisis de peligros y operabilidad es una traducción estricta del inglés, pero la expresión más extendida es análisis de riesgo y operabilidad. La utilización indistinta de los vocablos peligro y riesgo es común en el castellano.

Tabla 2.4 Resumen de palabras guía y variables de proceso utilizadas en los análisis HAZOP

<i>Palabra guía</i>	<i>Significado</i>	<i>Parámetro de proceso</i>	<i>Ejemplos de desviación</i>
NO	Negación de la intención del diseño	Temperatura Presión Nivel Reacción Composición Caudal Velocidad Tiempo Viscosidad Mezcla Voltaje Adición Separación pH	“No” + “Caudal” = Falta de caudal
MENOS	Disminución cuantitativa		“Menos” + “Nivel” = Bajo nivel
MÁS	Aumento cuantitativo		“Más” + “Presión” = Presión excesiva
OTRO	Sustitución parcial o total		“Otra” + “Composición” = Presencia de impurezas
INVERSA	Función opuesta a la intención de diseño		“Inverso” + “Caudal” = Flujo inverso

En general, las modificaciones al protocolo de análisis mantienen la utilización de las *palabras guía* para generar las desviaciones. Estas modificaciones se efectúan sobre dos aspectos:

- Modificación del protocolo de análisis para la generación de desviaciones, mediante la introducción de criterios para la selección de nódulos críticos de estudio, utilización de listados de control, etc.
- Modificación de las cabeceras de las tablas de documentación del análisis, añadiendo columnas, índices numéricos, etc.

SOCIEDAD: LOCALIDAD: INSTALACIÓN:				FECHA: Revisión: Plano núm.	
PALABRA GUÍA	VARIABLE	DESVIACIÓN	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS POSIBLES	MEDIDAS CORRECTORAS

Fig. 2.4 Modelo orientativo de tabla HAZOP

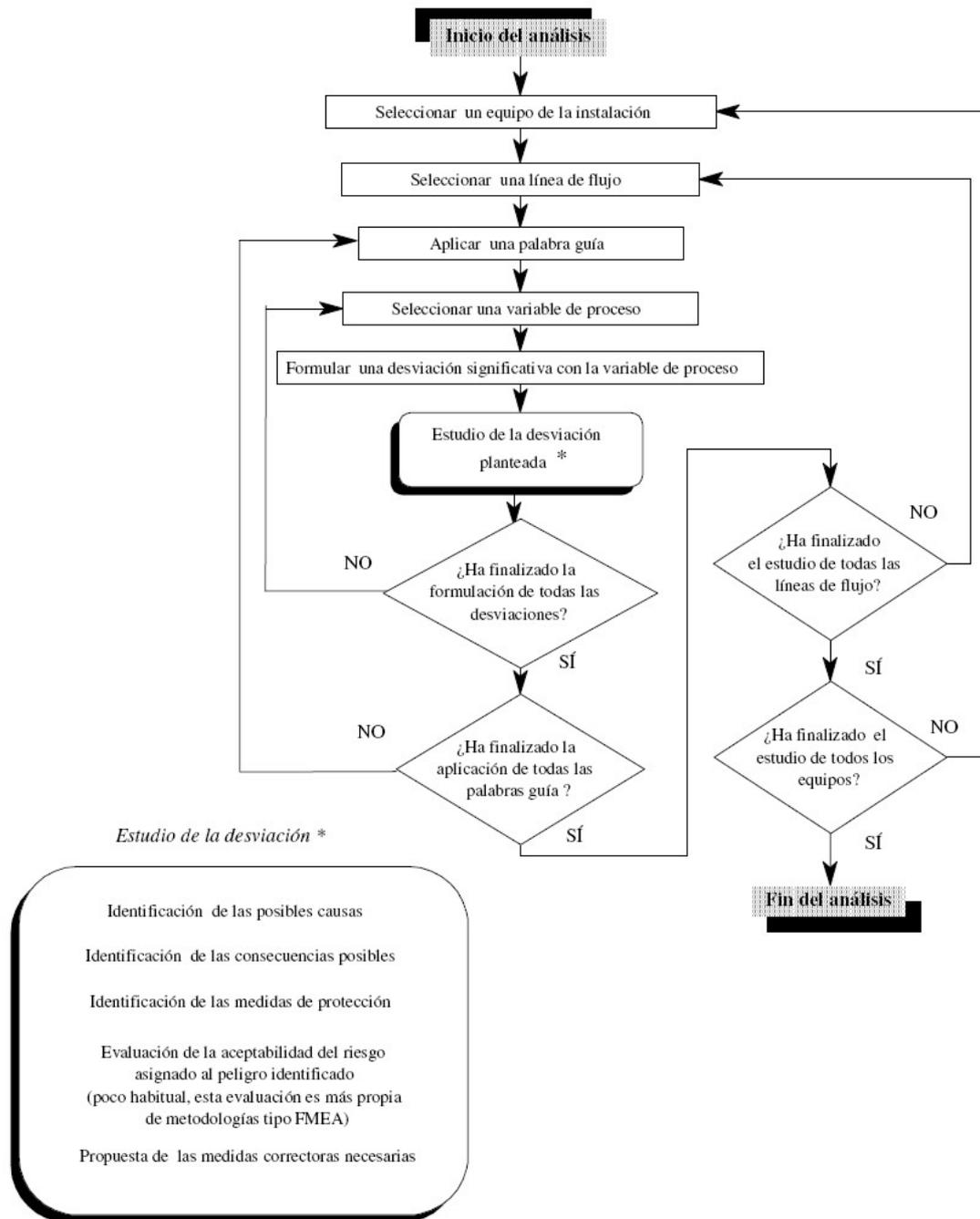


Fig. 2.3 Diagrama lógico de ejecución del análisis HAZOP

c) Organización del estudio

Los análisis HAZOP son, en general, estudios multidisciplinarios. La ejecución del estudio HAZOP requiere un conocimiento detallado del sistema que se quiere auditar y del protocolo de análisis.

Esta característica condiciona que el trabajo se realice en equipo, donde debe haber representantes de las distintas áreas de conocimiento implicadas en el proceso. Los miembros de los equipos de trabajo son de dos tipos: los técnicos y los analistas de riesgo.

Los técnicos implicados en el estudio soportan el apartado técnico. Los componentes deben ser especialistas en las áreas de conocimiento implicadas en el estudio; es aconsejable que sean verdaderos expertos. Las áreas de conocimiento implicadas en cada estudio pueden variar substancialmente en función del objeto del mismo (refinerías, plantas químicas, centrales eléctricas, centrales nucleares, parques de almacenamiento de combustible, etc.) y del objetivo del estudio que se quiere desarrollar: diseño de nuevas instalaciones, revisión de instalaciones en funcionamiento, modificaciones, etc.

Es recomendable que el número de especialistas que elaboran el estudio sea entre tres y seis; grupos menores pueden presentar una falta de conocimiento en determinados campos y grupos mayores suelen tener problemas organizativos.

Los analistas de riesgo deben dar soporte logístico al estudio, es decir, dirigir, moderar y documentar el análisis. Los analistas deben ser especialistas en aplicar la metodología HAZOP. Como tareas previas al desarrollo del HAZOP, tienen que definir el objetivo y el alcance del estudio, seleccionar el equipo técnico y formarlo en el método de análisis.

Además, los analistas deben tener la formación necesaria para entender y controlar la discusión de forma satisfactoria. El estudio se realiza en diversas sesiones de trabajo, de una duración no superior a dos o tres horas, donde la carga de trabajo tiene que ser racional para motivar y estimular la creatividad y la imaginación (*brainstorming*) del equipo de estudio y garantizar así la utilidad de los resultados obtenidos.

d) Requisitos y limitaciones

El método de análisis HAZOP presupone tres hipótesis:

- La instalación está bien diseñada, en relación con la experiencia, el conocimiento de los procesos implicados y la aplicación de las normas y códigos pertinentes.
- Los materiales de construcción han sido los adecuados y la construcción y el ensamblaje se han hecho correctamente.
- Los análisis son una "fotografía instantánea" donde se mezclan sucesos de efecto inmediato con sucesos de elevada inercia temporal.

Los análisis HAZOP requieren, para ser desarrollados, que por lo menos el diseño del proceso sea completo en las partes más esenciales y que, en instalaciones en funcionamiento, la información esté actualizada. El grado de detalle de la información disponible condiciona el grado de detalle y la corrección del análisis.

La tabla 2.5 muestra de forma orientativa la información que puede ser necesaria para la realización del análisis.

e) Resultados y aplicabilidad

El resultado principal de los análisis HAZOP es un conjunto de situaciones peligrosas y problemas operativos y una serie de medidas orientadas a la reducción del riesgo existente o a la mitigación de las consecuencias de los problemas operativos. Estas medidas se dan en forma de cambios físicos en las instalaciones, modificaciones de protocolos de operación o recomendaciones de estudios posteriores para evaluar con más detalle los problemas identificados o la conveniencia de las modificaciones propuestas.

El análisis HAZOP es un instrumento de estudio muy indicado para procesos en fase de diseño y construcción, donde la documentación está totalmente actualizada y las recomendaciones del análisis no suponen modificaciones costosas ni paros en la planta. Por otro lado, a causa de la laboriosidad del método y del grado de detalle que el estudio

proporciona, el análisis HAZOP sólo es indicado para instalaciones específicas y no como método general de análisis.

Tabla 2.5 Información mínima requerida para la realización de los análisis HAZOP

<i>Materia</i>	<i>Información requerida</i>
Ingeniería del proceso	Estudios previos realizados Emplazamiento de la instalación Diagramas P&I (incluyendo la descripción detallada de la instrumentación) Descripción de la operativa de bloqueo de la instalación (automática y manual) Disponibilidad de los servicios Química del proceso (si es necesario) Inventario de productos (si es necesario)
Substancias	Peligrosidad: características físicoquímicas (inflamabilidad, explosividad, estabilidad, reactividad, etc.) Toxicidad: dosis de exposición, efectos sobre la salud, etc.
Equipamiento	Características: materiales de construcción (normas de diseño, etc.), condiciones de trabajo y límites de operación (temperatura y presión máximas, etc.)

f) Ejemplo de aplicación del análisis HAZOP

f.1) Descripción de la instalación que se quiere estudiar

Se trata de un sistema de calentamiento en una refinería consistente en un circuito cerrado de aceite térmico que tiene la función de calentar otros fluidos y equipos (estabilización – *reforming*- de la gasolina, destilación primaria, etc.). El aceite térmico utilizado es producido en la destilación primaria (*topping*) del crudo y tiene una temperatura de inflamabilidad de 175 °C.

La temperatura máxima alcanzada por el aceite durante el proceso es de 330 °C a la salida del horno F1. El aceite térmico puede degradarse si no es sustituido al cabo de un determinado tiempo o bien si se sobrecalienta considerablemente. El calor residual de los humos se utiliza para producir vapor de media presión que alimenta a otros equipos. El combustible utilizado en el horno es el gas excedente de la refinería.

El control de la llama del quemador del horno se efectúa mediante la temperatura de salida del aceite térmico que regula la válvula TCV1. El esquema simplificado de la instalación y los detalles del equipo e instrumentación se muestran en la figura 2.5.

f.2) Descripción de las protecciones del horno F1

Las protecciones del horno provocan el corte de combustible del horno mediante la válvula TCV1 por las causas siguientes:

- alta temperatura en la salida de humos, actuador TSH
- baja presión en la línea de gas de refinería, actuador PSL2.

f.3) Consideraciones previas al análisis

Se estudia el sistema en condiciones normales de operación, y esto requiere plantear las hipótesis siguientes:

- Se considera que la bomba P1A impulsa el aceite a través del horno; la bomba P1B es de reserva y sólo entra en funcionamiento cuando se produce una caída de presión en la línea de impulsión del aceite (PSL).
- El horno trabaja a tiro *natural*, es decir, el humo sale libremente pese a la disminución de su temperatura sin que exista ningún equipo de aspiración; de la misma manera, la entrada de aire en la cámara de combustión es *natural*, no hay ningún equipo de impulsión.
- El calor residual de los humos que se utiliza para vaporizar el agua es insignificante, no alterando el funcionamiento del sistema.

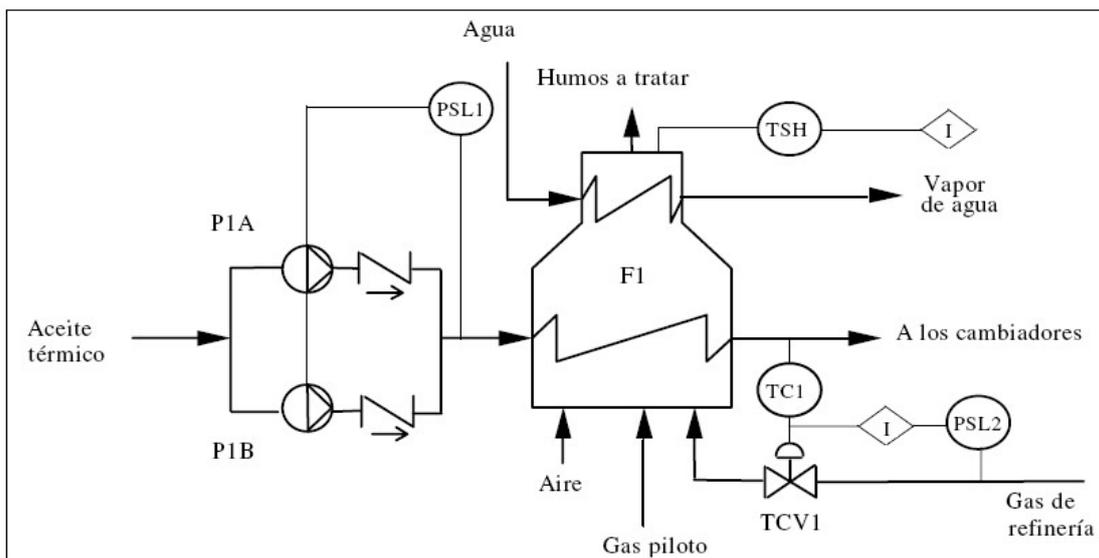


Fig. 2.5 Esquema de la instalación que se quiere analizar

f.4) Estudio preliminar

La tabla 2.6 muestra, mediante la matriz de interacción, el estudio preliminar para determinar la peligrosidad de las sustancias en las posibles condiciones de proceso (normales de operación y anómalas).

Tabla 2.6 Matriz de interacción

	Aceite	Gas	Aire	Agua	Comentarios
Aceite térmico		-	-	-	
Gas de refinería	-		x	-	Atmósfera explosiva
Aire	x	-		-	Atmósfera explosiva
Agua/vapor	-	-	-		
Temperatura de trabajo en el horno F1	x	x	-	-	Aceite líquido inflamable, gas inflamable
Exceso de temperatura en el horno F1	x	x	-	-	Atmósfera explosiva y hollín en tubos, gas inflamable

Mediante la matriz de interacción se han identificado las situaciones peligrosas siguientes:

- La presencia de gas en la aspiración del aire del horno puede producir la formación de una atmósfera explosiva.
- La presencia de aire en el aceite térmico puede favorecer la formación de una atmósfera explosiva, especialmente si está recalentado.
- La temperatura normal de calentamiento del aceite está por encima de su punto de inflamación, y un exceso de temperatura provoca la descomposición del aceite.

f.5) Análisis HAZOP

La tabla siguiente muestra el resultado del análisis HAZOP realizado sobre la instalación de calentamiento del aceite térmico.

Tabla 2.7-a Tabla del análisis HAZOP

SOCIEDAD: --			Revisión: 0		
INSTALACIÓN: Calentamiento de aceite			Plano núm. Figura 1		
PALABRA GUÍA	VARIABLE	DESVIACIÓN	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS POSIBLES	COMENTARIOS Y MEDIDAS CORRECToras
No	Caudal	Falta de caudal de aceite en el horno F1	1. No funcionamiento del sistema de bombeo (P1A, P1B y PSL1) 2. Falta de aceite por problemas externos a la instalación	Aumento significativo de la temperatura de los tubos de F1 con peligro de formar hollín en el interior de los tubos Igual que para 1 y posibilidad de quemar las bombas que trabajarían en vacío	Instalar una alarma con actuador para bajo caudal de aceite (FSL) que bloquee la entrada de combustible en el quemador Instalar un sistema de bloqueo de las bombas por falta de aceite desde la refinería, o taponamiento de los tubos

Tabla 2.7-b Tabla del análisis HAZOP

PALABRA GUÍA		VARIABLE	DESVIACIÓN	CAUSAS POSIBLES	CONSECUENCIAS POSIBLES	COMENTARIOS Y MEDIDAS CORRECTORAS
SOCIEDAD: --			INSTALACIÓN: Calentamiento de aceite térmico		Revisión: 0	Figura 1
Parte de	Composición	Aceite parcialmente degradado	3. Falta de sustitución del aceite	Formación de mezclas explosivas aguas abajo del horno F1 si existe la posibilidad de entrada de aire (ej. a través del depósito pulmón) Mala transmisión de calor aguas abajo de la instalación	Instalar un sistema de control de aceite en la entrada del horno (densímetros, etc.)	
Más	Temperatura	Exceso de temperatura del aceite	4. Exceso de combustible en el horno por válvula TCV1 abierta en fallo, o por fallo del bucle de control TC1 5. Menor caudal de aceite por cavitación de la bomba P1A	Degradación del aceite e igual que para 1 y 3 Igual que para 1	Por la alta temperatura de los humos, la actuación del sistema de bloqueo no protege del fallo del bucle de control (TC1 y TCV1) ya que actúa sobre los mismos elementos. Es recomendable instalar una válvula para cortar el combustible independientemente del bucle de control, y también un sistema de bloqueo para temperaturas elevadas (TSH) en los tubos a la salida del aceite	
No	Caudal	Falta de combustible en el quemador de F1	6. Falta de gas de refinera por problemas externos a los límites de la instalación 7. Fallo en el cierre de la válvula del bucle de control TC1, o fallo del bucle de control TC1, o actuación incorrecta del bloqueo TSH o PLS2	Cierre del quemador y parada de la instalación Igual que para 6	Valorar la posibilidad de que la instalación funcione con un combustible auxiliar (ej. propano, fuel-oil, etc.)	
Más	Caudal	Exceso de combustible en el quemador de F1	8. Válvula TCV1 averiada en posición abierta, o fallo del bucle de control TC1	Igual que para 1 y para 5	La misma consideración que en 5	
Otro	Composición	Modificación de la composición del gas de refinera	9. Cambio de los parámetros del gas que determinan la forma de la llama	Cambio de la forma de la llama de manera que llega a los tubos del cambiador, cosa que puede provocar sobrecalentamientos puntuales con peligro de formar hollín en el interior de los tubos	Controlar la composición del gas de refinera en la entrada del horno (densímetros, etc.)	

El diagrama de flujo de la instalación presentado en la figura 2.5, con la aplicación de las recomendaciones de la tabla 2.5 quedaría modificado de la manera siguiente (Fig. 2.6):

- Se añade un actuador para bajo caudal de aceite (FSL) que bloquea la entrada de combustible en el horno (I) y protege los tubos interiores de aceite del posible aumento de temperatura. Al mismo tiempo, por su posición (ubicado en la aspiración de las bombas) protege a éstas de trabajar al vacío y las bloquea en caso de falta de aceite desde la refinera o por taponamiento de las tuberías. El actuador FSL no interfiere, pues, en la función del actuador (PSL1) que por baja presión en la impulsión de las bombas activa la bomba de reserva.

- Se separa totalmente el sistema de regulación del horno del sistema protector para que éste pueda bloquear la instalación en caso de fallo del primero. Las modificaciones de la instrumentación del horno son las siguientes:
 - Se añade una válvula de corte en la línea de combustible independiente de la válvula de control y de esta forma se permite el bloqueo de los quemadores independientemente del bucle de control que lo protege de cualquier fallo de éste último;
 - Se desconecta totalmente el sistema de control del sistema de bloqueo (la línea de transmisión de señal de TC1 a I desaparece);
 - Se añade un actuador para alta temperatura (TSH) a la salida de producto independiente del TC1 ya existente, que protege al horno de un exceso de combustible y de una falta significativa de aceite, y que bloquea la llegada del combustible a los quemadores.

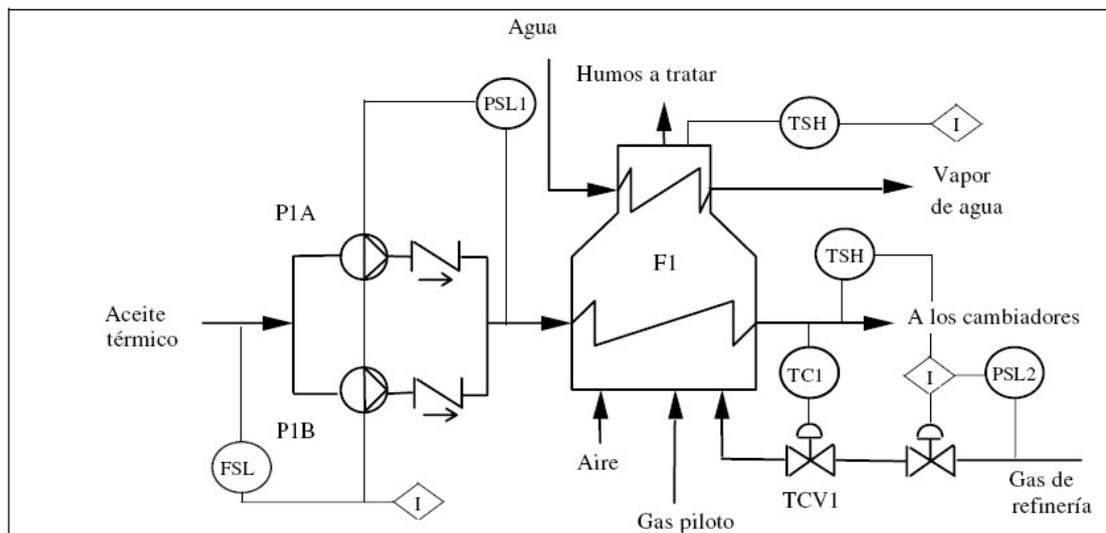


Figura 2.6 Esquema de la instalación con las medidas correctoras implementadas

Estas modificaciones introducidas en el sistema de control y protección de la instalación mejoran su seguridad. La mejora no se da únicamente por la redundancia de señales de bloqueo de los quemadores del horno, sino que mayoritariamente, como ya se ha comentado, es el resultado de la separación de los dos sistemas.

Así pues, el sistema protector puede proteger la instalación de cualquier fallo que se produzca en cualquiera de los elementos que integran el bucle de control (falta de señalización en los indicadores, falta de señal en los transmisores, fallo en la apertura de las válvulas, etc.).

ÁRBOLES DE FALLOS

a) Descripción y objetivo

La elaboración de árboles de fallos (*Fault Tree (FT)*) es una técnica de análisis creada por Bell Telephone Laboratories al inicio de la década de los sesenta, para mejorar la fiabilidad del sistema de control del lanzamiento de cohetes. Posteriormente, su utilización se extendió a otros campos de la industria y, en especial, fue muy empleada en la industria nuclear.

La utilización de árboles de fallos es una técnica deductiva que se aplica a un sistema técnico o proceso para la identificación de los sucesos y las cadenas de sucesos que pueden conducir a un incidente no deseado, en general un accidente o un fallo global de un sistema.

Esta técnica permite asimismo la cuantificación de la probabilidad o frecuencia con que puede producirse un suceso, es decir, permite el cálculo de la no fiabilidad o no disponibilidad del sistema.

La ventaja principal de esta técnica es su representación gráfica, que facilita la comprensión de la causalidad; de hecho, un árbol de fallos como tal es un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos parciales que conducen al fallo del sistema.

La relación lógica entre los sucesos es representada por los operadores lógicos Y, O, INH (el operador condicional) utilizados en álgebra booleana.

b) Definiciones

Accidente o fallo del sistema (denominado también suceso no deseado o *top event*): son situaciones excepcionales objeto de estudio mediante la elaboración y análisis de árboles de fallos. Estos accidentes se analizan mediante las demás técnicas identificativas comentadas en este capítulo.

Los fallos que se dan en sistemas técnicos pueden ser básicamente de dos tipos :

- Fallos primarios: aquellos atribuibles a defectos de los componentes y no a la interacción con el exterior (por ejemplo, una soldadura mal hecha, etc.).
- Fallos secundarios: aquellos atribuibles a la interacción del exterior con los componentes (por ejemplo, la rotura de un motor eléctrico por giro inverso al conectar las fases al revés, etc.). Estos siempre son el resultado de condiciones anómalas de funcionamiento y tienen una causa bien definida.

La distinción de los conceptos (sucesos iniciadores, protecciones del sistema e intervención operativa) ayudan en la elaboración y comprensión del árbol:

- Los sucesos iniciadores, también denominados sucesos o fallos primarios, son los responsables primeros de una variación no deseada en el proceso.
- Las protecciones del sistema son aquellas que permiten frenar la propagación de esta desviación de las condiciones normales de operación y se representan mediante las puertas lógicas INH.
- La intervención operativa es la última intervención del operador para evitar que se produzca el suceso no deseado.

Los conjuntos mínimos de corte o conjuntos minimales (*minimal cut sets*) son los diferentes conjuntos de fallos críticos que al producirse provocan la anomalía global del sistema. El conocimiento de estos conjuntos de fallos primarios permite detectar los puntos débiles de la instalación analizada con la metodología del árbol de fallos.

La figura 2.7 muestra la simbología de los sucesos y las puertas u operadores lógicos utilizados en los árboles de fallos, y la figura 2.8 muestra gráficamente la estructura de los árboles de fallos.

c) Metodología de elaboración y de análisis

c.1) Elaboración

El primer paso para la elaboración de un árbol de fallos es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados y evaluados.

Este estudio suele realizarse con otras técnicas de identificación, como las que se han presentado a lo largo del capítulo: análisis histórico de accidentes, análisis HAZOP, etc. Una vez determinados los accidentes que se quieren desarrollar, deben establecerse los límites de la instalación: límites físicos, nivel de detalle de la resolución, condiciones iniciales de funcionamiento y otros supuestos.

Seguidamente, y de manera secuencial, es necesario identificar los fallos de los elementos y las relaciones lógicas que conducen al accidente. La identificación de los sucesos y las cadenas de sucesos se hace partiendo de la eventualidad no deseada y deduciendo la combinación lógica de incidentes que lo pueden desencadenar de forma recurrente. El primer paso es la determinación de los sucesos más inmediatos necesarios y suficientes para que se produzca el fallo del sistema.

Con esta forma de operar, para cada nuevo hecho planteado, se generan los árboles de fallos. El proceso finaliza cuando todos los fallos identificados son primarios y no es posible determinar sus causas.

c.2) Análisis

Los árboles de fallos contienen la información de cómo la concatenación de diferentes fallos conduce al fallo global del sistema. Desgraciadamente, esta información no resulta muy evidente en árboles de fallos de tamaño considerable y debe, pues, resolverse el modelo lógico que representa el árbol.

Esta resolución se denomina análisis del árbol y consiste principalmente en encontrar la combinación de fallos primarios que pueden producir el accidente estudiado. El proceso de resolución implica la aplicación del álgebra de Boole y permite, pues, el análisis cualitativo y cuantitativo. Esta información permite implementar y priorizar medidas para la mejora de la seguridad y la fiabilidad del sistema.

El análisis cualitativo posibilita conocer los conjuntos mínimos de corte. Cada uno de los conjuntos mínimos representa una manera distinta de llegar al suceso no deseado. Los métodos cualitativos de análisis de árboles de fallos son básicamente:

- Métodos analíticos, en los cuales el árbol se transforma en una función lógica mediante el álgebra de Boole (ver el apartado 2.2.4 g).
- Cálculo matricial, en el que el árbol se transforma en una matriz, que se manipula con reglas derivadas del álgebra de Boole (ver el apartado 2.2.4 g).
- Métodos numéricos (método de Monte Carlo), sólo utilizados en programas de ordenador.
- Métodos de reconocimiento de estructuras, utilizados en programas de ordenador, en los cuales se comparan los árboles con estructuras existentes en bases de datos.

El análisis cuantitativo permite calcular básicamente la frecuencia de acontecimiento de un accidente y la indisponibilidad del sistema. Para poder efectuar el análisis cuantitativo se precisa conocer el tiempo de funcionamiento de la instalación y las tasas de fallos, el tiempo de reparación, la indisponibilidad, y el tiempo de comprobación para cada componente.

Actualmente, la resolución de los árboles de fallos se hace habitualmente mediante programas de ordenador. Hay una variada oferta de programas comerciales para la resolución de árboles de fallos; entre los más extendidos en Europa destacan el SALP-PC y el ISPRA-FTA, elaborados por el Joint Research Centre de la Comisión Europea, y el PSAPACK, elaborado por la International Atomic Energy Agency.

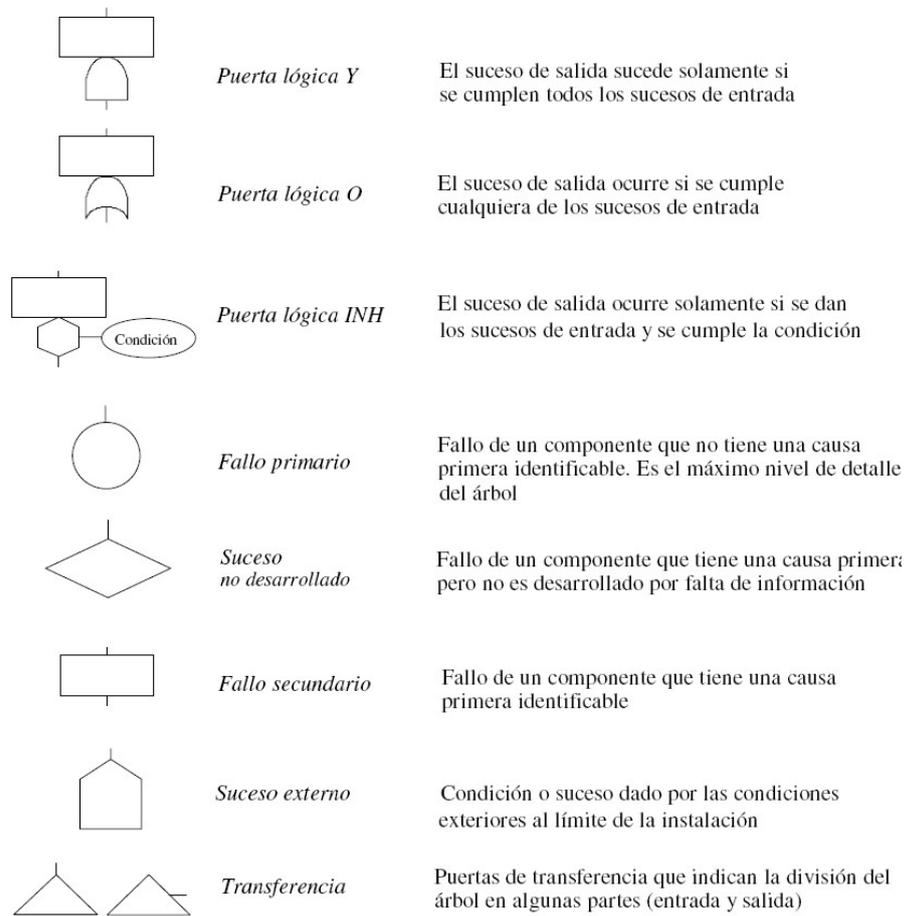


Fig. 2.7 Simbología utilizada en los árboles de fallos

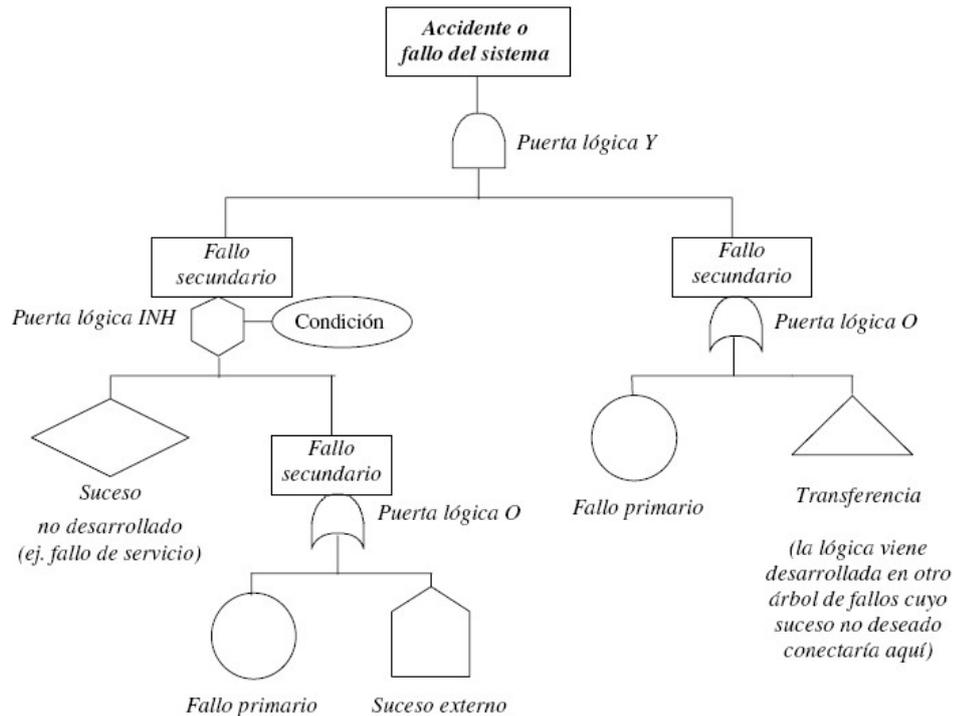


Fig. 2.8 Estructura de un árbol de fallos

d) Requisitos y limitaciones

La elaboración de árboles de fallos requiere una elevada formación técnica, junto con un conocimiento detallado del sistema o proceso y de sus modos de fallo.

Además, se requiere que por lo menos la información sobre el proceso sea completa en las partes más esenciales. El nivel de detalle de la información disponible condiciona el nivel de detalle del análisis; el desarrollo progresivo del árbol requiere aún más nivel de detalle.

La limitación principal de la metodología es que únicamente se pueden representar fallos "totales", es decir, los componentes no pueden funcionar a medias, sino que siempre se considera el fallo completo del elemento involucrado en la cadena de sucesos que conduce al accidente. Tal como sucedía en los análisis HAZOP (apartado anterior), los árboles de fallos vuelven a ser "fotografías instantáneas" donde se mezclan acontecimientos de efectos inmediatos y otros de elevada inercia temporal.

e) Resultados y aplicabilidad

El interés de los árboles de fallos para la identificación de riesgos reside en la capacidad de identificar la combinación de fallos críticos del sistema que produce el accidente, es decir, los conjuntos mínimos de corte. Esto permite priorizar las medidas correctivas para evitar el desarrollo del accidente.

Normalmente, los árboles de fallos se utilizan para estudiar situaciones particulares que requieren de un estudio más detallado y que otras técnicas de identificación han señalado como críticas.

Otra utilidad de los árboles de fallos es la comparación de modificaciones en el diseño de la instrumentación de control y en las medidas de seguridad de instalaciones concretas.

f) Ejemplo de aplicación

f.1) Descripción de la instalación que se quiere estudiar

El tanque de almacenamiento de amina D453 se carga desde un camión cisterna con la bomba de engranajes P457, mediante una manguera flexible y un conjunto de conducciones fijas. El tanque D453 tiene un serpentín de calentamiento con vapor a baja presión para mantener el producto en condiciones de ser utilizado.

Adicionalmente, el tanque D453 requiere un sistema de pulmonación y absorción de gases a causa de la toxicidad de la amina. El sistema de pulmonación funciona con nitrógeno. La absorción del posible efluente gaseoso o líquido se realiza en el tanque absorbedor D455, donde hay una disolución de ácido sulfúrico en agua. El sistema dispone de la instrumentación necesaria para el funcionamiento (Fig. 2.9).

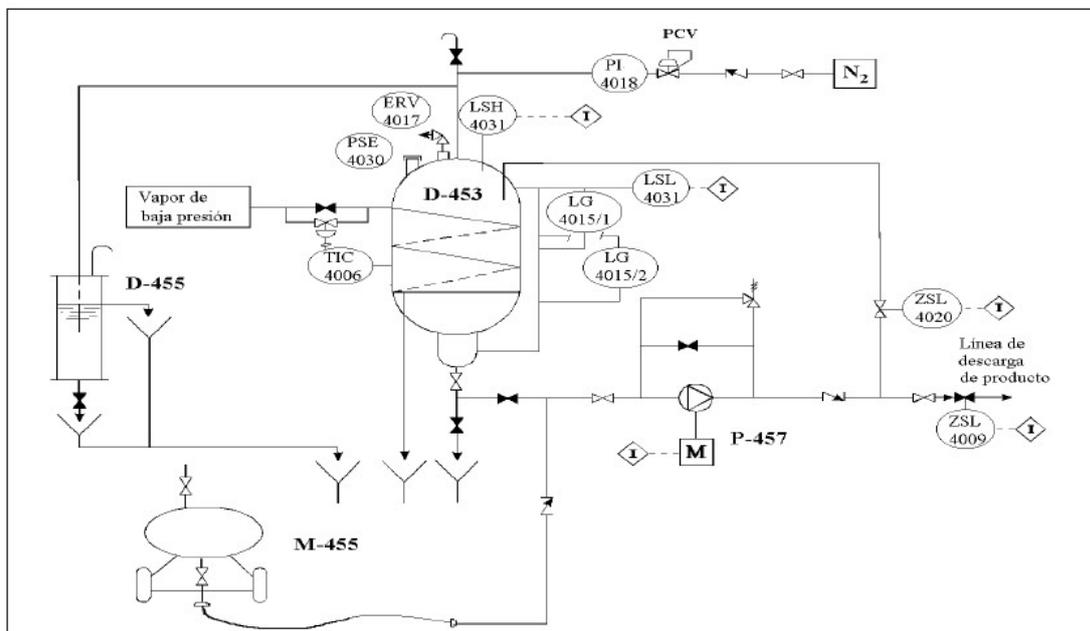


Fig. 2.9 Diagrama de flujo simplificado de la instalación

La bomba P457 es utilizada para la carga, el vaciado y la transferencia de amina del tanque D453 al tanque de mezcla de la unidad de producción (fuera de los límites de la instalación). El sistema de bombeo está constituido por un conjunto de conducciones y válvulas accionadas manualmente.

f.2) Descripción del análisis realizado

Se han efectuado las valoraciones cualitativa y cuantitativa, mediante un árbol de fallos, del suceso más significativo que puede tener lugar en la instalación: *la rotura catastrófica del tanque y el vertido del producto durante la carga del tanque.*

Como hipótesis, y para realizar la valoración cuantitativa, se ha supuesto que en el proceso normal de carga de amina al tanque siempre se consigue el nivel máximo de llenado (probabilidad=1).

Todos los datos de frecuencia e indisponibilidad de los acontecimientos primarios se han extraído de la referencia [LEES86] (esta base de datos no aporta información directa de fiabilidad de componentes) (véase la tabla 2.8).

Tabla 2.8 Datos de fiabilidad de los componentes del árbol

Nombre	Descripción	Frecuencia de fallo (h ⁻¹)	Tiempo de reparación (años)	Indisponibilidad (años)	Intervalo de prueba
E11	Rotura de la autoreguladora PCV del nitrógeno	$9,14 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$		
E10	Falta de señalización del PI4018	$5,92 \cdot 10^{-5}$	1,00		
E2	Falta de señalización del LG4015/2	$4,66 \cdot 10^{-4}$	1,00		
E3	Falta de señalización del LI4031	$4,66 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$		
E4	Falta de intervención manual sobre señalización			$4,00 \cdot 10^{-2}$	
E5	Falta de intervención manual sobre alarma			$3,00 \cdot 10^{-2}$	
E6	Falta de señalización del LAH4031	$6,51 \cdot 10^{-4}$	1,00		
E7	Falta de intervención del bloqueo LSH4031	$2,51 \cdot 10^{-5}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$		
E1	Alto nivel en el tanque D453			1,00	
E8	Falta de señalización del LG4015/1	$4,66 \cdot 10^{-4}$	1,00		
E9	Falta de señalización del PI4018	$2,06 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-4}$		

f.3) Resultados y conclusiones

El árbol de fallos obtenido en el estudio se muestra gráficamente en la figura 2.10. Los resultados del análisis del árbol de fallos se han recogido en forma de sumario en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Resumen de los resultados

<i>Frecuencia de suceso del accidente: $4,33 \cdot 10^{-8}$ veces al año</i>		
<i>Tiempo de estudio (funcionamiento de la instalación por carga): 2 h</i>		
<i>Error de truncamiento de los cálculos: 10^{-15}</i>		
<i>Relación de los conjuntos mínimos</i>		
<i>Núm. de orden</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Relación de componentes</i>
3	$4,33 \cdot 10^{-8}$	E11 E10 E4
3	$1,00 \cdot 10^{-13}$	E11 E10 E9

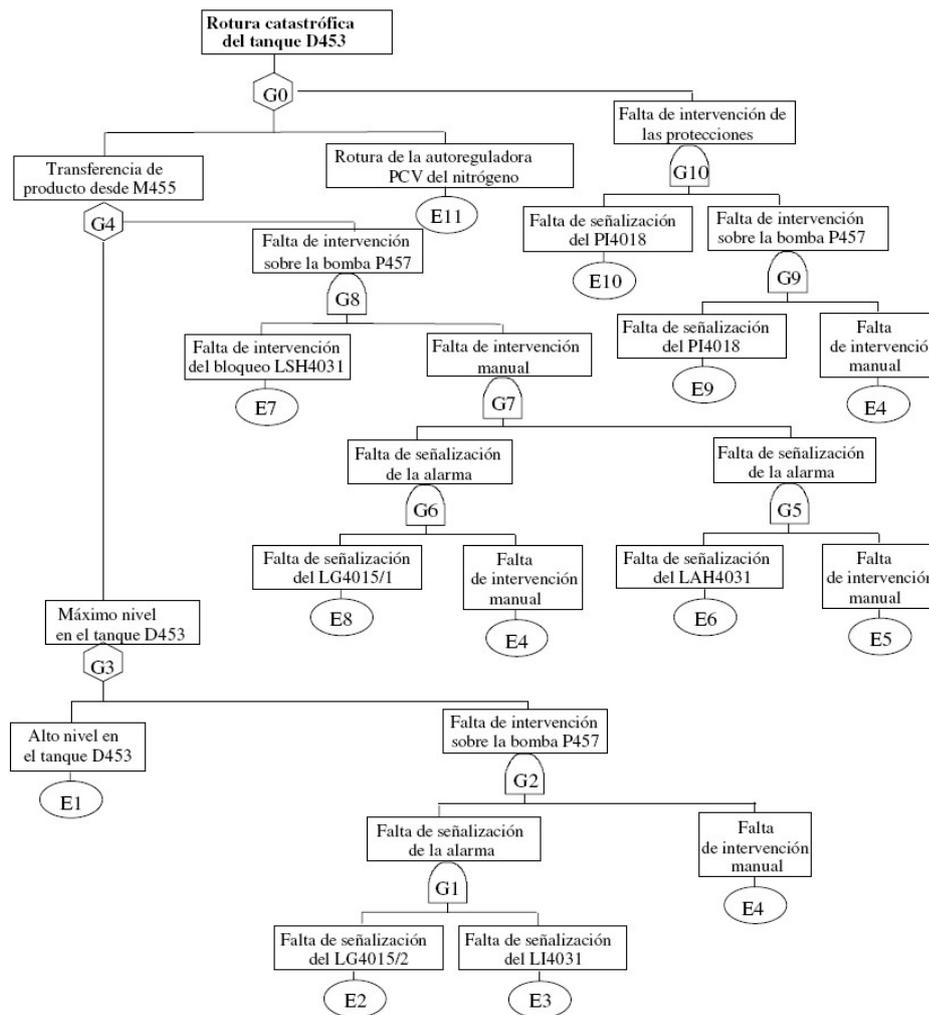


Fig. 2.10 Representación gráfica del árbol de fallos obtenido

Del estudio han surgido dos recomendaciones principales:

- Analizar el transitorio de sobrepresión que se podría generar al romperse o fallar la válvula autoreguladora de presión PCV4004 de la pulmonación (E11), y sus efectos sobre la cubierta del tanque (previsiblemente lo rompe).
- Extremar la atención del operador en la maniobra de carga, ya que de él depende en última instancia la intervención (bloqueo de la bomba) para evitar la rotura del depósito por sobrellenado (E4).

g) Ejemplo de análisis cualitativo

Encontrar para el árbol de fallos representado en la figura 2.11, los conjuntos mínimos de corte de manera analítica y matricial.

g.1) Resolución analítica

La resolución analítica del árbol de fallos consiste en transformar el árbol en su expresión lógica y simplificarlo mediante el álgebra de Boole. La equivalencia de las puertas lógicas en el álgebra de Boole es:

- una puerta O es equivalente a la unión de conjuntos; signo "+"
- una puerta Y o INH es equivalente a la intersección de conjuntos; signo "."

Las propiedades de álgebra de Boole para la resolución del árbol son:

- propiedad conmutativa:

$$x \cdot y = y \cdot x$$

$$x + y = y + x$$

- propiedad asociativa:

$$x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$$

$$x + (y + z) = (x + y) + z$$

- propiedad distributiva:

$$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$$

$$x + y \cdot z = (x + y) \cdot (x + z)$$

Las propiedades y leyes del álgebra de Boole para la simplificación del árbol son:

- propiedad de la idempotencia:

$$x \cdot x = x$$

- ley de la absorción:

$$x + x \cdot y = x$$

Árbol de fallos que se debe resolver analíticamente:

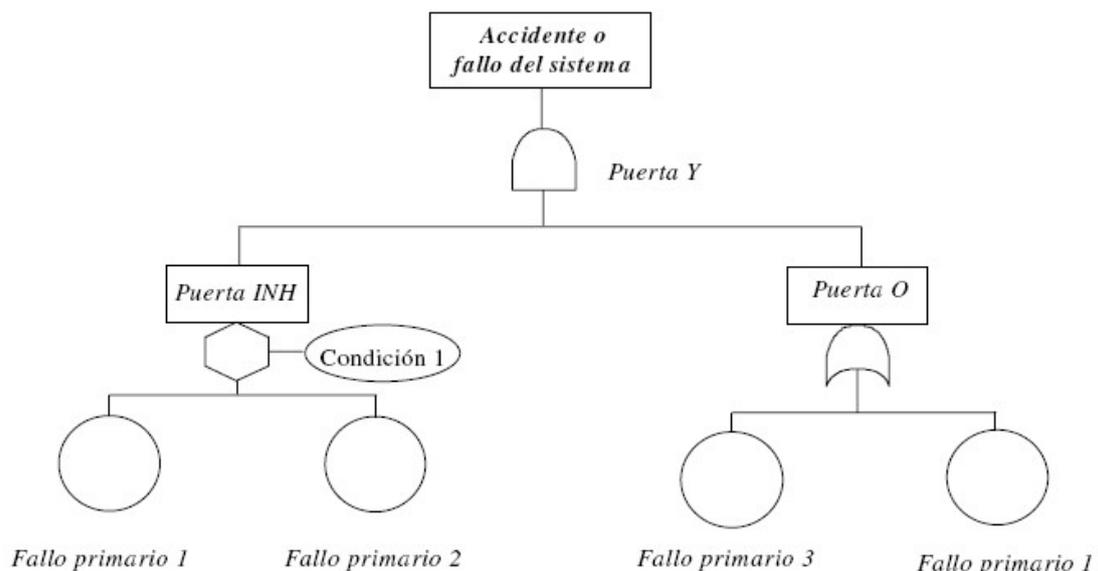


Fig. 2.11 Ejemplo genérico de árbol de fallos

Ecuación del árbol:

$$Y = INH \cdot O \quad (\text{ec.1})$$

$$INH = FP1 \cdot FP2 \cdot C1 \quad (\text{ec.2})$$

$$O = FP3 + FP1 \quad (\text{ec.3})$$

Se sustituyen las ecuaciones (ec. 2) y (ec. 3) en la (ec. 1):

$$Y = (FP1 \cdot FP2 \cdot C1) \cdot (FP3 + FP1)$$

Se desarrolla la expresión obtenida del árbol aplicando la propiedad distributiva del álgebra de Boole ($x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$):

$$Y = FP1 \cdot FP2 \cdot C1 \cdot FP3 + FP1 \cdot FP2 \cdot C1 \cdot FP1$$

Se simplifica la expresión con la propiedad de la idempotencia ($x \cdot x = x$):

$$Y = FP1 \cdot FP2 \cdot C1 \cdot FP3 + FP1 \cdot FP2 \cdot C1 \cdot FP1$$

Se simplifica la expresión con la ley de la absorción ($x + x \cdot y = x$):

$$Y = FP1 \cdot FP2 \cdot C1 \cdot FP3 + FP1 \cdot FP2 \cdot C1$$

El resultado final es el conjunto mínimo de corte encontrado analíticamente: $Y =$

$$FP1 \cdot FP2 \cdot C1.$$

g.2) Resolución matricial

Para resolver el árbol anterior matricialmente hay que transformarlo en una matriz aplicando las reglas derivadas del álgebra de Boole: se construye la matriz sustituyendo las puertas lógicas por sus descendientes en forma de filas (puertas O) o en forma de columnas (puertas Y e INH), y se reduce la matriz con las propiedades de la idempotencia y la ley de la absorción. Cada fila representa un conjunto mínimo de corte:

Y	IN H	O	FP1	FP2	C1	O	FP1	FP2	C1	FP3	FP1	FP2	C1	FP3	FP1	FP2	C1	FP3
							FP1	FP2	C1	FP1	FP1	FP2	C1	FP4	FP1	FP2	C1	

Propiedad de la idempotencia ↑ Ley de la absorción ↑

El resultado final es el mismo conjunto mínimo de corte que el encontrado analíticamente:

$$Y = FP1 \cdot FP2 \cdot C1.$$

Métodos semi-cualitativos: índices de riesgo

Bajo este calificativo se agrupan un conjunto de métodos específicamente diseñados para evaluar el riesgo asociado a instalaciones químicas, tanto de proceso como de almacenamiento. Una parte importante del índice está orientada a identificar y valorar mediante factores, las condiciones que pueden determinar el que se produzca una liberación

importante de energía en un corto período de tiempo. En la mayoría de los casos este factor energético viene definido por dos parámetros:

- Un *factor de material*, proporcional a la peligrosidad intrínseca del producto. Es un factor multiplicador que afecta en proporción lineal al valor del índice: si se duplica, el índice dobla su valor.
- Un *factor de cantidad* de energía, proporcional al producto: (cantidad de sustancia, kg) x (calor de combustión, kJ/kg)

En determinadas circunstancias, aunque bastante restringidas por los métodos, puede utilizarse el calor de descomposición. Este factor suele integrarse en el esquema general de cálculo como un elemento más del sumatorio de factores de riesgo. El valor que adopta sigue una evolución creciente y asintótica, de manera que, cuando la energía puesta en juego es de gran magnitud, el factor es poco sensible a la cantidad de producto.

Las condiciones que pueden determinar la liberación de la energía son identificadas y valoradas como factores, atendiendo a diferentes situaciones: posibilidad de reacción química, posibilidad de derrame, posibilidad de atmósfera inflamable, operación a una temperatura que supere la de destello o ebullición de la sustancia, etc. La valoración se puede realizar de dos modos:

- De manera *discreta*, todo o nada, dependiendo de que las circunstancias que se analizan estén presentes. Ejemplos: ¿hay reacción química del tipo ...?, ¿la carga y descarga de productos inflamables implica la conexión y desconexión de líneas de transferencia?, ¿hay corrosión?, etc. Algunas de estas valoraciones pueden estar determinadas por una escala de clases. Por ejemplo, un nivel de corrosión medido en tres intervalos: <1 mm/año, 0,5-1 mm/año y >1 mm/año.
- De manera *continua*, dependiendo del valor de alguna magnitud proporcional al riesgo.

Ejemplos: la presión de disparo del sistema de alivio, la distancia a hornos de proceso o llamas abiertas, etc.

Como se puede comprobar con el análisis en profundidad de alguno de los índices, estos métodos pueden tener aplicaciones complementarias:

- Servir de *lista de chequeo* para identificar circunstancias de peligro y riesgo. En el Anexo 1 se han desarrollado listas de chequeo asociadas al índice DOW, como método para identificar factores de riesgo afines a una potencial situación de reacción fuera de control.
- Disponer de *tablas de riesgo relativo*. La aplicación de estos métodos supondrá la subdivisión de la planta en unidades de análisis, generalmente asociadas a equipos principales o secciones de la planta, para los que podrá obtenerse un valor de riesgo o índice que nos permita priorizar acciones futuras de mejora y control de la seguridad. Por ejemplo, en aplicación del índice DOW, un valor superior a 128 implica la necesidad de desarrollar análisis de riesgos más rigurosos. Precisamente el nacimiento de estos métodos se debió a la necesidad de una metodología que permitiera priorizar, en instalaciones complejas, las acciones tendentes al control de pérdidas y la mejora de la seguridad.
- Justificar el *beneficio de la inclusión de determinados sistemas de protección* (contra incendio, drenaje, bloqueo, control, etc.). La inclusión de estos sistemas implica la adopción de unos factores de reducción (bonificaciones) que repercuten en el valor final del índice calculado o de las pérdidas previstas.
- Valorar *áreas de exposición* por daño severo a las instalaciones. Así, el índice DOW permite un radio de exposición proporcional al índice calculado. En general, este resultado no debe ser empleado como una previsión de las consecuencias en caso de accidente, sino como un dato para utilizar en la toma de decisiones a la hora de diseñar la implantación de unidades y la separación entre equipos de proceso.

FACTORES DE RIESGO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

INTRODUCCIÓN: ÍNDICES DE RIESGO

Con el objeto de determinar cuáles son los factores más influyentes en la gravedad de los accidentes industriales con sustancias peligrosas y tener una imagen general de todas aquellas variables que afectan a sus probabilidades de ocurrencia (frecuencia), efectos y consecuencias [CROWL 1997] [GRIFFITHS 1991] [HENDERSHOT 1996] [PIETERSEN 1992], en el presente capítulo se analizan los índices de riesgo tecnológico más relevantes, con especial atención sobre los específicos para la industria química.

Los factores así identificados deberán complementarse con aquellos que el análisis cuantitativo de riesgos (ACR) utiliza para determinar el riesgo de afectación sobre las personas (densidad de población en la zona de influencia, equipos de protección individual o colectiva, facilidad de evacuación, etc.).

En este capítulo se establece una primera clasificación en función del grado de especificidad de cada índice y se revisa el fundamento de cada uno, analizando el ámbito de aplicación, su nivel de descripción de la realidad, los factores considerados para hacer la evaluación y la ponderación de cada factor en el conjunto. Por último, como conclusión, se resumen los factores de riesgo relevantes en la industria química, agrupados en varias tipologías.

Un índice es un valor numérico que pretende medir una característica determinada del objeto de un estudio, comparándolo con otros de referencia. Un índice de riesgo tecnológico, por tanto, intenta evaluar el riesgo inherente de una instalación o proceso industrial, por comparación con otros considerados estándares, mediante el uso de unas listas de comprobación cuantificada y más o menos detallada según el índice utilizado [RODRIGUEZ 1986].

En algunos casos puede ser compuesto, obtenido a partir de otros de tipo parcial que valoran de forma independiente riesgos específicos de la instalación analizada [INSHT 1995].

Para su aplicación es preciso estimar una serie detallada de parámetros, mediante los cuales se describe la instalación. Algunos de estos parámetros son de tipo cualitativo, otros son semi-cuantitativos (se asignan valores de una escala numérica de intervalo, pero esta asignación es criterio subjetivo del experto analista) y otros son cuantitativos, obtenidos a través de funciones o de las propiedades físico-químicas de los materiales (por ejemplo la entalpía de combustión).

El análisis de riesgos mediante índices es una técnica muy difundida. Su principal característica es que permite obtener resultados semi-cuantitativos con mucha rapidez y con un conocimiento muy reducido de la instalación objeto de estudio, por lo que los recursos humanos, materiales y temporales necesarios para su aplicación son escasos [CASAL 1992] [CASAL 1996].

Aunque los índices de riesgo no son una herramienta para la identificación de peligros, se aplican mediante la utilización de listas de comprobación y éstas permiten identificar los factores de riesgo presentes en la instalación [VILCHEZ 1996].

Su fundamento teórico genérico se basa en la definición del riesgo como esperanza matemática de la pérdida y los diversos índices, de una manera más o menos indirecta pretenden evaluar, mediante la estimación de parámetros, la magnitud del daño y su posible frecuencia [MIR 1997] [MIR 1999]. A los efectos del mismo, en tres grandes

categorías fundamentales en función de su nivel de descripción de la realidad: índices basados en la definición matemática de riesgo; índices basados en la carga de fuego e índices basados en la peligrosidad de las sustancias químicas.

Entendemos por índices basados en la definición matemática de riesgo aquellos cuya aplicación se hace siguiendo la definición matemática de riesgo presentada en el Capítulo 1 (Riesgo = Frecuencia x Magnitud). Dada su descripción abstracta de la realidad, no se restringen a un tipo de peligro concreto. Se incluyen en este tipo de índices el método Fine, el Sistema de Evaluación y Propuesta de Tratamiento de Riesgos (SEPTRI) y el Hazard Rating Number (HRN), que se describirán a continuación.

Se clasifican como índices basados en la carga de fuego aquellos que por diseño son aplicables a instalaciones genéricas (edificios industriales y/o comerciales o residenciales y procesos productivos de todo tipo), sin importar de forma significativa el tipo de actividad desarrollada en su interior. Se ha centrado el estudio en todos aquellos que valoran el riesgo de incendio y explosión. Se consideran dentro de esta categoría los siguientes: Método Simplificado de Evaluación del Riesgo de Incendio (MESERI), método Gretener, índice Eric, índice de Pourt, el cálculo de la carga de fuego ponderada, el índice de los coeficientes K y el índice de coeficientes α .

Por último, dentro de la categoría de índices basados en la peligrosidad de las sustancias químicas se contemplan aquellos desarrollados para valorar el riesgo en instalaciones industriales con actividad química y uso y manipulación de sustancias peligrosas. Para este tipo de índices se estudian los riesgos generalmente asociados a estas instalaciones (incendio, explosión, fuga o derrame, intoxicación, etc.).

Se incluyen en este grupo los siguientes: índice Instantaneous Fractional Annual Loss (IFAL), índice de incendio y explosión de la empresa DOW, índice MOND (desarrollado por ICI), el índice UCSIP (Union des Chambres Syndicales de l'industrie du Petrole), los índices de Riesgo de Procesos Químicos del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo y el Chemical Exposure Index (CEI), desarrollado por DOW, específicamente para riesgo de intoxicación y de contaminación en instalaciones del sector químico.

Quedan fuera del objetivo de esta recopilación todos los índices relacionados con el transporte de mercancías peligrosas [LATINO 1996] y/o los índices de reactividad o peligrosidad de sustancias [VILCHEZ 1996]. El primero por no estar asociado a la valoración del riesgo de una instalación fija de producción o almacenamiento determinada y los segundos por ser demasiado específicos en cuanto al riesgo que valoran.

En los próximos apartados se hace una descripción relativamente superficial de los índices de los dos primeros tipos y más detallada de aquellos basados en la peligrosidad de las sustancias químicas, por su proximidad al objeto de este estudio.

Tabla 2.1. Relación de índices analizados, clasificados por su grado de descripción de la realidad.

BASADOS EN LA DEFINICIÓN DE RIESGO (grado de descripción bajo)	BASADOS EN LA CARGA DE FUEGO (grado de descripción medio)	BASADOS EN LA PELIGROSIDAD DE LAS SUSTANCIAS (grado de descripción alto)
Fine	MESERI	IFAL
SEPTRI	Gretener	F&E (de Dow)
HRN	Eric	Mond (de ICI)
	Purt	UCSIP
	Carga de fuego ponderada	IRPQ (de INSHT)
	Coeficientes K	CEI (de Dow)
	Coeficientes α	

ÍNDICES BASADOS EN LA DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE RIESGO

Índice FINE

El método FINE fue elaborado y publicado en 1975 [FINE 1975] y pretende la estimación de la esperanza matemática de la pérdida con el objeto de priorizar sus correcciones. El fundamento matemático es el siguiente:

$$GP=C.E.P \quad (2.1)$$

donde:

GP: grado de peligrosidad
C: coeficiente de las consecuencias
E: coeficiente de exposición al riesgo
P: probabilidad de ocurrencia del suceso.

A la vista de este planteamiento, resulta evidente la correspondencia que existe entre esta definición y la de esperanza matemática de la pérdida.

Se trata de un método no exclusivo de la industria química, en principio apto para valorar cualquier tipo de peligro, de aplicación prácticamente universal y muy simple pero con poca especificidad y selectividad. Su grado de representación de la realidad de un riesgo concreto es prácticamente nulo.

Un aspecto a tener en cuenta en la descripción de los parámetros de este método, es que éstos hacen referencia reiterada a importes económicos fijos (en dólares USA), lo que a la larga convierte en obsoletas las clasificaciones (debido a la influencia de la desactualización de estos importes) y contribuye a aumentar la subjetividad de su aplicación.

Frente a esta categorización absoluta del parámetro "consecuencias" se han propuesto otras de tipo porcentual en las que se indica el porcentaje de la instalación analizada que resultaría dañado o afectado por el riesgo estudiado (es el caso del método IFAL). De esta forma se evita la obsolescencia temporal del método y se relativiza la magnitud posible del daño en función del tamaño de la instalación analizada.

Una aportación adicional es el cálculo del Factor de Justificación, por el cual, en función del grado de peligrosidad calculado para un riesgo concreto, del coste asociado a su corrección y del nivel de corrección conseguido, se determina qué alternativas correctoras conviene adoptar, priorizando las de mejor rendimiento frente a las demás:

$$FJ = \frac{GP}{FC \times GC} \quad (2.2)$$

donde:

FJ : factor de Justificación
FC: factor de coste
GC: grado de corrección.

Así, una medida de corrección cara, que aporte una mejora relativamente pequeña a un riesgo grande, dará como resultado un valor de justificación bajo (inferior a 10), por lo que se aconsejará la adopción de otras medidas más efectivas. Por el contrario, una medida económica pero muy efectiva en la reducción del riesgo, daría como resultado un factor de justificación muy elevado.

Método SEPTRI

La denominación completa del método es "Sistema de Evaluación y Propuesta de Tratamiento de Riesgos", y fue presentado por F. Martínez García, de la Fundación Mapfre Estudios [MARTÍNEZ 1990].

Como en el caso anterior, se trata de una adaptación o desarrollo de la definición matemática de riesgo, aunque incorporando algunos parámetros que permiten describir mejor el objeto de estudio. Dado que evalúa las consecuencias del evento en términos económicos, no es válido para estimar otro tipo de daños susceptibles de ser considerados (daños a las personas, al medio ambiente, etc.).

Su ámbito de aplicación no se restringe a un peligro concreto, sino que, al igual que el método Fine, es apto para evaluar cualquier factor de peligrosidad. Su aplicación requerirá siempre un conocimiento estadístico de las probabilidades de ocurrencia del evento, que por lo general son difíciles de conocer, resultan incompletas, poco precisas o parciales, cuando no inexistentes.

El cálculo fundamental viene dado por la siguiente expresión:

$$R = \frac{P \times E \times I}{S} \quad (2.3)$$

donde:

R : evaluación del riesgo
P : coeficiente de probabilidad
E : coeficiente de exposición
I : coeficiente de intensidad
S : coeficiente de seguridad.

Los valores de R pueden ir desde infinito (suponiendo la inexistencia de medidas de seguridad) hasta 0 (suponiendo que la probabilidad de ocurrencia o la exposición al riesgo sean nulas). Los valores superiores a 300 se consideran un riesgo inaceptable, mientras que los inferiores a 30 se entienden como tolerables.

Todo riesgo cuyo índice **R** se encuentre entre 30 y 300 deberá ser modificado o transferido hasta que una nueva aplicación del índice lo califique como aceptable.

Los factores que se evalúan en este método son los siguientes:

Coficiente de probabilidad (P): Ponderado de 0 a 10, en función de la probabilidad de ocurrencia del evento no deseado. Dada la falta de especificaciones de este aspecto, el procedimiento es aplicable a cualquier tipo de riesgo (inundación, incendio, terremoto, explosión,...). Sin embargo ello implicaría conocer valores de probabilidad del riesgo considerado convenientemente contrastados.

Coficiente de exposición (E): Es el factor que representa la frecuencia con la que se lleva a cabo la acción que motiva el riesgo estudiado. Se han establecido los siguientes valores: 0 (nunca), 1 (cada 100 años), 2 (cada 50 años), 3 (cada 10 años), 4 (cada año), 5 (cada 6 meses), 6 (cada mes), 7 (cada semana), 8 (cada día), 9 (cada hora) o 10 (continuamente).

Coficiente de intensidad (I): Estima la magnitud esperable de las consecuencias del evento de acuerdo con la definición clásica de riesgo. Sin embargo esta estimación se hace de una forma razonada y, en la medida de lo posible, objetivada.

El coeficiente I se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$I = \frac{i_r + i_p}{2} \quad (2.4)$$

Donde:

i_r : coeficiente del Valor Máximo Expuesto (en unidades monetarias fijas) o Pérdida Máxima Posible (cuando se expresa como porcentaje del total)

i_p : coeficiente de la Pérdida Máxima Probable. También puede estimarse tomando como punto de partida unidades económicas fijas o porcentajes sobre el total expuesto.

Se entiende por Valor Máximo Expuesto el importe económico de la máxima pérdida esperada en las condiciones más desfavorables y asumiendo la total inoperatividad de los medios de intervención, propios o externos. La Pérdida Máxima Posible es el mismo concepto pero expresado en unidades porcentuales sobre el total del riesgo considerado.

La Pérdida Máxima Probable, normalmente expresada en forma porcentual sobre el total, es la máxima pérdida esperada ante un riesgo determinado en las condiciones usuales de operación de los medios propios y externos disponibles para la intervención.

Ambos factores están tabulados en función de valores económicos absolutos o porcentajes respecto al total del riesgo y toman valores de entre 0 y 10.

Si bien puede resultar complejo evaluar estos factores (en ocasiones requerirá el análisis del riesgo con detenimiento o el planteamiento de escenarios específicos), resulta una aportación conceptualmente interesante calcular la magnitud del daño como media aritmética entre la pérdida máxima y la probable.

Coefficiente de seguridad (S): Es un factor que pretende reducir el índice R mediante la consideración de las medidas de protección que se han tomado para minimizar las consecuencias de un evento no deseado.

Los conceptos evaluados son:

- 1) Política de seguridad
- 2) Programa de gerencia de riesgos
- 3) Integración de los criterios de seguridad en el diseño de métodos, máquinas y procesos
- 4) Programa de Control de Calidad
- 5) Programa de seguridad (Director de seguridad, planes de formación, planes de inspección, revisión y mantenimiento, servicio de vigilancia, equipos de emergencia, planes de contingencia, etc.)
- 6) Auditorías periódicas externas y 7) Servicios de socorro externos (bomberos, policía, sanitarios, etc.).

Cada factor de los citados se puntúa entre 0 y 1 (salvo el punto 5 que se evalúa entre 0 y 4). El coeficiente S se obtiene mediante la suma de los coeficientes parciales:

$$S = \sum_{i=1}^{i=7} s_i \quad (2.5)$$

donde s_i son cada uno de los factores parciales antes indicados.

Para evaluar adecuadamente estos sistemas integrados de gestión puede consultarse abundante información en [APA 1980] y [UNE 81900 EX].

El Hazard Rating Number (HRN)

La definición del Hazard Rating Number se debe a J. Steel [STEEL 1990], [CASAL 1996]. Su fundamento teórico es muy similar al de los índices Fine y SEPTRI, aunque en este caso se evalúan las consecuencias del evento en función del daño a las personas y no, como en los casos anteriores, como valor económico del daño.

Se basa en el producto de cuatro factores (Ec. (2.6)): E) Posibilidad de exposición al peligro (valor comprendido entre 0=imposible y 15=cierto), F) Frecuencia de la exposición al peligro (entre 0,1=no frecuente y 5=constante), M) Número de personas sometidas al peligro (entre 1 para 1 ó 2 personas y 12 para 50 personas o más) y G) Máxima pérdida probable (entre 0,1 para arañazos y 15 para muerte).

Analizando el paralelismo entre la Ec. (2.6) y la definición de riesgo, los dos primeros factores de este índice estiman la frecuencia del evento y los dos segundos la magnitud del daño (el factor M valorando el nº de personas expuestas y el factor G valorando la gravedad del daño).

$$\text{HRN} = \text{E.F.M.G} \quad (2.6)$$

El producto de estos cuatro factores puede dar como resultado valores desde 0 a más de 1.000. Se entiende que valores de HRN inferiores a 1 representan riesgos tolerables y valores superiores a 1.000 identifican riesgos intolerables. Los resultados intermedios imponen la aplicación de medidas correctoras para la reducción del riesgo.

ÍNDICES BASADOS EN LA CARGA DE FUEGO

Índice MESERI

El método MESERI, acrónimo de Método Simplificado de Evaluación del Riesgo de Incendio, fue desarrollado en 1990 [MARTÍNEZ 1990] [DIAZ 1991]. Propone el cálculo de un índice simplificado del riesgo de incendio (exclusivamente) y está especialmente orientado a evaluar el riesgo en edificios de uso general.

Se basa en el cálculo del factor P:

$$P = \frac{5X}{129} + \frac{5Y}{22} + (1,BCI) \quad (2.7)$$

$$X = \sum_{i=1}^{i=18} x_i \quad (2.8)$$

$$Y = \sum_{i=1}^{i=6} y_i \quad (2.9)$$

En la Ec. (2.8), x_i son los factores de protección "pasivos" (construcción, situación, proceso industrial, concentración, propagación y destructibilidad) y en la Ec. (2.9), y_i los factores "activos" (extintores, bocas de incendio equipadas, columnas hidrantes exteriores, detectores automáticos de incendios, rociadores automáticos, instalaciones fijas de extinción).

Se considera aceptable un riesgo si se obtienen valores de P superiores o iguales a cinco.

El factor P deberá incrementarse en una unidad si la instalación dispone de Brigada Contra Incendios (BCI) propia.

Considerando que los valores máximos y mínimos que pueden tomar los factores "activos" y los factores "pasivos" son los siguientes:

$$0 \leq X \leq 129 \qquad 0 \leq Y \leq 26$$

se desprende que el valor mínimo del índice P es 0 y el máximo es 11,90.

A continuación se recopilan los coeficientes propuestos para cada factor de riesgo.

Junto al texto descriptivo se indica el peso relativo de ese epígrafe en el conjunto del índice P1.

Construcción:

- 1) Altura del edificio: 0,98%
- 2) Mayor sector de incendio: 1,62%
- 3) Resistencia al fuego: 3,5%
- 4) Falsos techos: 1,62%.

Valora los riesgos inherentes al tipo de edificación. El método resulta aplicable sólo a edificios, por lo que difícilmente podría ser utilizado para instalaciones con presencia de equipos ubicados al exterior sobre estructuras portantes simples o a parques de almacenamiento al aire libre, situación muy frecuente en instalaciones de tipo químico.

Los sectores de incendios descritos y las características de estabilidad al fuego de los elementos portantes deben cumplir la normativa técnica al respecto (Dto. 351 y sus anexos – Ley 19587, IRAM de aplicación).

Los pesos relativos atribuidos a cada característica descriptiva se basan exclusivamente en el juicio experto y se desconoce por completo la base empírica o experimental que respalda estos valores.

Situación del riesgo:

- 1) Distancia de los bomberos: 3,25%
- 2) Accesibilidad del edificio: 1,62%.

Valora las posibilidades de intervención desde el exterior por parte de los servicios públicos de extinción. En este sentido valora la proximidad de estos servicios al riesgo y la facilidad de acceso, tanto desde el punto de vista de la distribución de calles, como desde la perspectiva de los accesos al edificio desde el exterior (fachadas y puertas).

Procesos:

- 1) Peligro de activación: 3,25%
- 2) Carga térmica: 3,25%
- 3) Combustibilidad: 1,62%
- 4) Orden y limpieza: 3,25%
- 5) Almacenamiento en altura: 0,98%.

Evalúa la peligrosidad intrínseca de la actividad industrial desarrollada en el interior del edificio. Para ello se analiza el peligro de activación, la carga combustible en el interior, la combustibilidad de los materiales contenidos (materias primas, productos intermedios o

terminados), el orden y limpieza de los locales y la altura de almacenamiento de mercancías.

La propiedad "peligro de activación" se valora de manera subjetiva, por lo que el resultado es totalmente arbitrario y excesivamente superficial.

La carga térmica por unidad de superficie se describe sólo como_

- Alta ($Q \geq 200$ Mcal/m² ó $Q \geq 840$ MJ/m²)
- Media ($100 \leq Q < 200$ Mcal/m² ó $42 \leq Q < 840$ MJ/m²)
- Baja ($Q < 100$ Mcal/m² ó $Q < 420$ MJ/m²).

La combustibilidad de los materiales presentes en la planta no considera la forma ni las condiciones de almacenamiento de los mismos y sin embargo este aspecto es, en la industria química, un factor altamente determinante del riesgo presente.

Asimismo se obvian totalmente toda una serie de peligros inherentes a la manipulación de sustancias peligrosas y la posibilidad de reacciones inestables o incontroladas.

Los criterios de orden y limpieza y de altura de almacenamiento están claramente orientados a almacenes en estanterías o pallets y no consideran la presencia de parques de tanques, zonas de almacenamiento de inflamables, presencia de bidones o botellas de gases comprimidos, etc. [MAPFRE 1982]. Estos criterios resultan muy limitantes a la hora de intentar utilizar este índice en instalaciones de tipo químico.

Factor de concentración: Concentración de capitales: 0,8%. Valora la posible magnitud del evento (en valor monetario/m²), exclusivamente desde la perspectiva económica.

Destaca el escaso valor relativo de este parámetro (0,8%) sobre el índice P, ya que este es el único parámetro que describe la magnitud del daño.

Propagabilidad:

- 1) En vertical: 1,62%
- 2) En horizontal: 1,62%.

Evalúa la facilidad con la que el fuego se transmite en vertical de una planta a otra y la velocidad de propagación en horizontal.

Destructibilidad:

- 1) Calor: 3,25%
- 2) Humo: 3,25%
- 3) Corrosión: 3,25%
- 4) Agua: 3,25%.

Evalúa la facilidad con la que la maquinaria y las instalaciones en general se verán afectadas por los efectos de un incendio: calor, humo, corrosión y agua.

Los materiales almacenados y los propios equipos de proceso pueden verse afectados por una o varias de las consecuencias citadas, derivadas de un incendio.

La sensibilidad de los diferentes contenidos al humo, el calor, la corrosión o el agua variará de uno a otro. Sin embargo el método MESERI atribuye a todos ellos los mismos coeficientes (y en definitiva el mismo peso relativo sobre el índice P).

Factores de protección:

- 1) Extintores: 3,81%
- 2) Bocas de incendio equipadas: 7,63%
- 3) Columnas hidrantes exteriores: 7,63%
- 4) Detección automática de incendios: 7,63%
- 5) Rociadores automáticos: 15,27%
- 6) Instalaciones fijas de extinción (CO₂ o similares): 7,63%.

Valora los medios de intervención disponibles ante la emergencia causada por un incendio.

Se remite a las reglas técnicas para extintores, para bocas de incendio equipadas, para abastecimientos de agua contra incendios, para instalaciones de columnas hidrantes exteriores, para sistemas de detección automática de incendios, para instalaciones de rociadores automáticos de incendio y para instalaciones fijas de extinción por anhídrido carbónico.

Propone añadir un punto al coeficiente P cuando la instalación dispone de una brigada contra incendios propia, convenientemente formada y equipada. El peso relativo de la brigada contra incendios en el conjunto es del 8,4%.

En general, el índice MESERI es de muy fácil aplicación. Implica el conocimiento de las reglas técnicas de protección contra incendios (UNE y CEPREVEN básicamente), permitiendo obtener una idea aproximada del nivel de riesgo de incendio asumido en una instalación a partir de un conocimiento muy superficial de la misma.

Sin embargo esta sencillez le resta cualquier especificidad, y resulta muy limitada su aplicación sobre riesgos del sector químico, ya que los factores determinantes (proceso, materiales y procedimientos de trabajo) son totalmente subjetivos o simplemente no se contemplan (reactividad, toxicidad,...).

La descripción del método no especifica el proceso seguido para la determinación de los pesos relativos de cada factor en el conjunto, y al parecer éstos se limitan a intentar imitar de forma intuitiva el juicio experto.

No se contemplan otros daños que no sean los daños materiales y directos derivados del incendio, estando restringido en su aplicación al incendio en edificios y sin analizar ningún otro factor de riesgo adicional (fugas, derrames, contaminaciones, etc.).

No analiza en absoluto el grado de sensibilidad y concienciación de la gerencia en relación con las medidas de seguridad a adoptar (como hace por ejemplo el método SEPTRI).

Método Gretener

Este método fue desarrollado entre 1960 y 1965 por el ingeniero suizo Max Gretener [CEPREVEN 1988] [ROCA 1986] y está orientado a la evaluación matemática del riesgo de incendio de las construcciones industriales y de edificios.

No es un índice de riesgo específico para la industria química.

Asume como punto de partida que el riesgo cumple las normativas vigentes en materias de seguridad tales como distancias entre edificios, vías de evacuación, iluminación de seguridad, etc.

El cálculo del índice se basa en:

$$R = \frac{P}{N \times S \times F} \times A \quad (2.10)$$

Donde:

R: riesgo efectivo de incendio

P: factores de peligrosidad intrínseca

N: coeficiente de las medidas de seguridad normales

S: coeficiente de las medidas de seguridad especiales

F: coeficiente de las medidas constructivas de seguridad (pasivas)

A: riesgo de activación.

Esta definición se corresponde con la definición matemática de riesgo, donde A representa la probabilidad de ocurrencia y el resto valora la magnitud que puede alcanzar.

Como aspecto adicional, el método Gretener ofrece una estimación del peligro para las personas en función del número de ocupantes de la planta y la altura de la misma.

El cálculo de cada uno de los coeficientes anteriores se basa en las siguientes expresiones:

$$P = \prod_{i=1}^{i=7} p_i \quad (2.11)$$

$$N = \prod_{i=1}^{i=5} n_i \quad (2.12)$$

$$S = \prod_{i=1}^{i=5} s_i \quad (2.13)$$

$$F = \prod_{i=1}^{i=4} f_i \quad (2.14)$$

A continuación se describen los parámetros P, N, S y F, indicando junto a cada uno de ellos el valor máximo que pueden adoptar.

Peligro potencial: (P_{máx}: 112,32) Evalúa las condiciones de riesgo intrínsecas a la actividad industrial desarrollada y a las características de distribución del edificio.

El factor de la carga térmica es una medida del poder calorífico de las sustancias almacenadas en el recinto considerado y se evalúa en función de su distribución por unidad de superficie (obsérvese que los métodos específicamente desarrollados para industria química utilizan el mismo parámetro) [CEA-CEPREVEN 1987].

Otros aspectos como la combustibilidad, peligro de generación de humos, peligro de generación de gases corrosivos y superficie de compartimento se corresponden directamente con los comentados para el método anterior, si bien con ciertas diferencias de ponderación.

El peligro de generación de humos que impidan una correcta actuación de las brigadas contra incendios en este método puede incrementar en un 20% el valor del índice final, mientras que en el método MESERI, el valor relativo de este actor era únicamente del 3,25%.

El factor "superficie del compartimento" viene influenciado por la relación largo-ancho del recinto, de modo que un riesgo con relación 8:1 y superficie de 68.000 metros cuadrados, tiene el mismo factor (5) que otro de 34.000 metros cuadrados pero con relación largo-ancho de 1:1. Ello es debido a que en este factor se evalúa conjuntamente la "superficie" y la "accesibilidad" mientras que el método MESERI las evalúa por separado.

Medidas normales de protección: (Nmáx: 1,0) Evalúa las medidas de protección frente al incendio consideradas normales.

El valor máximo atribuido a cualquier parámetro "n" es 1,00, lo que significa que la presencia de uno de ellos no reduce el riesgo sino que tan sólo no lo empeora.

Ello es debido a que en este método se considera que éstas son las medidas mínimas necesarias y su ausencia penaliza el índice de riesgo obtenido. Si bien éste es un aspecto conceptual, permite diferenciar con claridad las medidas de tipo n de las de tipo s, que se verán a continuación.

La simple observación de los pesos relativos de cada factor y su comparación con los el método anterior permite ver que no hay relación alguna entre ellos.

Este método introduce respecto al anterior un pequeño matiz relativo a las medidas organizativas en materia de seguridad, al considerar un peso del 20% según exista o no personal instruido en la manipulación de los equipos de extinción.

Medidas especiales de protección: (Smáx: 7,93) Establece como medidas especiales de protección todas aquellas encaminadas a reducir el tiempo de detección, la transmisión de la alarma, la intervención y las instalaciones fijas de extinción.

En el factor "detección" se contempla la vigilancia propia y permanente, la detección automática y los rociadores automáticos, ya que a parte de iniciar la extinción, también cumplen una función detectora.

El factor "transmisión de la alarma" contempla las garantías con las que la señal del detector será transmitida eficazmente hasta los equipos de intervención (en general, bomberos, policías locales o centrales receptoras de alarmas).

Ante la disparidad de equipamiento y formación que existe entre unos equipos de intervención y otros (ya sean voluntarios o profesionales), el método Gretener establece una clasificación en siete categorías de acuerdo con la política al respecto establecida en Suiza, otorgando a cada categoría un coeficiente diferente en el factor "intervención". Ello hace que la aplicación de este punto en otros países con estructuras de protección distintas requiera de una adaptación previa de éstas.

El peso relativo atribuido a la rapidez de actuación es del 40% sobre el factor S ya que divide por 0,6 en el peor de los casos. En el método MESERI, el peso máximo de este factor, descrito de manera muy similar, no supera el 4%.

En la misma línea, el peso asignado a la presencia de rociadores automáticos es del 100% en el método Gretener y del 15% en el método MESERI.

Resulta asimismo interesante destacar la presencia de un factor para la evacuación de humos a través, generalmente, de ventanas de evacuación, no contemplado en otros métodos, con un peso relativo del 20%.

Obsérvese que los parámetros de tipo S son mayores que la unidad (salvo en el caso del tiempo de intervención) y por lo tanto, al hallarse en el denominador en el cálculo del índice R, cuanto mayores son las medidas de seguridad del riesgo, menor resulta el índice.

Medidas inherentes a la construcción: (Fmáx: 2,72) Con el cálculo de los factores f, se evalúa la capacidad de resistencia al fuego propia de la edificación que alberga las instalaciones. Ello restringe su aplicación a instalaciones ubicadas en edificios.

Cálculo del peligro de activación (A): (Amín: 0,85; Amáx: 1,8) El factor "A", peligro de activación, se desarrolla poco y se deja abierto a la subjetividad del analista. Como única ayuda, se presenta una tabla con ejemplos tipo como orientación.

Resultan evidentes las limitaciones de este método a la hora de valorar, de manera concreta y específica, el riesgo de activación de un incendio en un lugar determinado.

Este aspecto es sin duda el que peor se ha resuelto en la ejecución del método Gretener, ya que si bien permite, de manera aproximada, discriminar entre la probabilidad de ocurrencia de un accidente en un sector industrial u otro, no permite diferenciar este aspecto entre dos riesgos del mismo sector.

Peligro para las personas (PH,E): Una interesante aportación del método Gretener es la estimación del peligro para las personas, de especial interés para aquellos riesgos en los que la masificación o las dificultades de evacuación pueden suponer una agravación importante.

El cálculo de este factor se hace tomando en consideración el aforo de la planta, la altura de la misma respecto al nivel del suelo y la "categoría de la exposición al riesgo de las personas" que vendrá determinada por la facilidad/dificultad de evacuación atendiendo a las características de la actividad desarrollada.

En función de estos parámetros, el factor "exposición para las personas" toma valores entre 0,40 y 1,00.

Definición del riesgo de incendio aceptado: Se define según la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{1,3 * P_{H,E}}{R} \quad (2.15)$$

donde:

γ : coeficiente de seguridad contra incendio

$P_{H,E}$: exposición al riesgo de las personas

R: riesgo de incendio efectivo.

Se considera aceptable cualquier situación en la que el coeficiente de seguridad contra incendio γ sea igual o superior a 1. Para ello, R deberá tomar valores inferiores a 1,3 siempre que el riesgo para las personas no sea significativo para considerar aceptable el riesgo.

Esta limitación (R menor o igual a 1,3) se hace más exigente cuando existe riesgo para las personas, en cuyo caso el factor $P_{H,E}$ es menor que la unidad, se reduce el numerador de la expresión anterior y, por lo tanto, para conseguir que γ siga superando la unidad es preciso reducir más el coeficiente R.

Resumiendo, el método Gretener es un índice de riesgo de incendio exclusivamente, por lo que no toma en consideración otras situaciones de emergencia potencialmente peligrosas. No es un método específicamente desarrollado para la industria química, estando especialmente adaptado a la evaluación de riesgos en edificios con grados de ocupación alto o problemas específicos de evacuación (hospitales, hoteles,...).

Su aplicabilidad es sencilla y no requiere grandes conocimientos específicos sobre el riesgo analizado. Por contra, esta falta de información le impide profundizar en el nivel de riesgo generado por las operaciones del proceso desarrollado.

Si bien no se justifica estadísticamente el cálculo de los factores aplicados a cada concepto, éstos están ampliamente avalados por entidades internacionales de reconocido prestigio que han estado utilizando el método durante años, circunstancia que no se daba en el método MESERI. Se observan grandes diferencias de "peso" entre los coeficientes atribuidos a un mismo factor por cada uno de los dos métodos.

No obstante, existe una gran coincidencia entre los aspectos considerados como determinantes para la evaluación del riesgo de incendio en uno y otro método.

No se contemplan las pérdidas derivadas de la paralización de la actividad a consecuencia de un incendio.

En general, es un método más detallado y elaborado que el anterior, aunque su falta de especificidad en temas de industria química y la poca consideración que hace del factor de activación, le restan interés para su aplicabilidad a este tipo de industrias.

El índice "Evaluation du risc d'incendie par le càcul" (índice ERIC)

El método tiene por objeto la evaluación global del riesgo de incendio de un edificio o sector, enfocado en una doble vertiente: el riesgo para las personas y el riesgo para los bienes. También pretende facilitar la aportación de medidas de seguridad que aumenten la calidad de ésta. El desarrollo original de este índice se debe a Sarrat y Cluzer [SARRAT 1979].

Se basa en el método Gretener y está claramente enfocado al riesgo en edificios, diferenciando tres ambientes: industrial, establecimientos con gran afluencia de público y oficinas y viviendas.

El riesgo para las personas se evalúa como:

$$R_1 = \frac{P_1}{M_1 * F_1} \quad (2.16)$$

donde:

R1: riesgo para las personas

P1: peligro potencial para las personas

M1: medidas de protección para las personas

F1: resistencia al fuego valorada para las personas.

A su vez el riesgo para los bienes es calculado como:

$$R_2 = \frac{P_2}{M_2 * F_2} \quad (2.17)$$

donde:

R2: riesgo para los bienes
P2: peligro potencial para los bienes
M2: medidas de protección para los bienes
F2: resistencia al fuego valorada para los bienes.
Para el cálculo de P1:

$$P1 = t.f.i.r.c \quad (2.18)$$

donde:

t: coeficiente asociado al tiempo de evacuación calculado según la fórmula de Togawa

f: coeficiente relativo a la opacidad de los humos
i: coeficiente asociado a la toxicidad de los humos
r: riesgo de activación
c: coeficiente de inflamabilidad del combustible.

Todos estos parámetros son estimados mediante tablas, al igual que sucedía en el método Gretener.

Para calcular P2:

$$P2 = q.e.f.g.k.a.c \quad (2.19)$$

donde:

q: coeficiente de carga térmica
e: coeficiente para el nivel del sector considerado
f: coeficiente de opacidad de humos
g: coeficiente del tamaño y forma del sector de incendios
k: coeficiente asociado al peligro de corrosión
a: peligro de activación.

Para calcular Mi:

$$Mi = Si.Ti.Ei.Di \quad (2.20)$$

Con:

Mi: medidas de protección
Si: coeficiente asociado a las posibilidades y medios de extinción
Ti: coeficiente relativo al tiempo de intervención
Ei: coeficiente asociado a los medios de extinción y la formación de los encargados de usarlos
Di: coeficiente asociado a la instalación de evacuación de humos.

El cálculo de Fi, se efectúa considerando los factores relativos a la resistencia mínima al fuego y el tamaño de las aberturas existentes.

Para el caso industrial el índice R para las personas se considera adecuado por debajo de 0,5 y aceptable (con limitaciones o mejoras) hasta 1,3. En este mismo caso (industrial) para el índice R para los bienes, se admiten 0,5 y 1,5 como valores límite.

Índice de Pourt

Nota: El método de Pourt (Norma IRAM 3528) es el que se utiliza en Argentina por mandato de la Ley 19587 en su decreto 351 y sus anexos. Lo trataremos en detalle más adelante).

El método fue desarrollado por Gustav Pourt para la empresa EURALARM [POURT 1975] [VILLANUEVA 1995], dedicada al diseño, venta e instalación de instalaciones fijas de extinción, y su principal orientación está encaminada a determinar de manera objetiva qué tipo de riesgos requieren, de forma predominante, la instalación de medidas de seguridad especiales.

Se trata de un método sencillo para identificar el riesgo de incendio. No es un método específico para la industria química y en muchos aspectos es muy similar al método Gretener, al que hace referencia en algunos apartados.

Se basa en suponer que la acción destructora del fuego se desarrolla en dos ámbitos distintos: **los edificios y su contenido.**

Por ello calcula dos coeficientes independientes.

El riesgo del edificio estriba en la posibilidad de que se produzca la destrucción del inmueble. Dependerá de dos factores que son, por un lado, la intensidad y duración del incendio y por otro la resistencia de la construcción.

El riesgo del contenido está constituido por el daño a las personas y a los bienes materiales que se encuentran en el interior del edificio.

El cálculo de GR se hace según la ecuación:

$$GR = \frac{(Q_m * C + Q_i) * B * L}{W * R_i} \quad (2.21)$$

donde:

GR: grado de peligro

Q_m: coeficiente de carga térmica del contenido (1,0-4,0)

Q_i: coeficiente de carga térmica del inmueble (0,0-0,6)

C: coeficiente de combustibilidad (1,0-1,6)

B: coeficiente correspondiente a la superficie del sector (1,0-2,0)

L: coeficiente correspondiente al tiempo de intervención (1,0-2,0)

W: coeficiente de resistencia al fuego de la estructura portante (1,0-2,0)

R_i: coeficiente de reducción del riesgo (escasos focos, almacén correcto,...).

Los factores de riesgo considerados coinciden de forma muy significativa con los de los otros métodos descritos. Incluso los coeficientes a ellos atribuidos guardan relación con los de los otros métodos.

Obsérvese que, por ejemplo, el factor de superficie o el factor de intervención pueden agravar el índice en un 100% cada uno, y la combinación de los factores similares en el método Gretener tiene una ponderación similar.

Si bien teóricamente es posible obtener un GR de 28, el método establece que para valores superiores a 5 es preciso replantear la instalación dado que el riesgo se considera inaceptable y no susceptible de mejora mediante medidas de protección.

Dado que el objetivo fundamental de este método es determinar la necesidad o no de instalar sistemas de intervención automáticos, no valora la posible existencia de estos medios y por lo tanto no pondera la mejora que ello aporta al conjunto.

Por lo que al riesgo del contenido se refiere, el método define el índice como:

$$IR = H \cdot D \cdot F$$

donde:

- IR:** índice de riesgo para el contenido
- H:** coeficiente de peligro para las personas
- D:** coeficiente de peligro para los bienes
- F:** coeficiente de peligro por humos.

Los valores de H y D oscilan entre 1 y 3. Los de F, lo hacen entre 1 y 2. De ello se desprende que el índice de riesgo para el contenido está entre 1 (riesgo umbral) y 18 (riesgo máximo).

Por último, el índice de Purtt aporta un gráfico de coordenadas, situando en abscisas el valor del coeficiente IR y en ordenadas el del coeficiente GR. La combinación de estos dos factores sitúa en un plano bidimensional las coordenadas de cada riesgo analizado y según su posición en ese plano es posible determinar el riesgo estimado e incluso sugerir una serie de medidas correctoras.

Índice del cálculo de la carga de fuego ponderada

Se considera aplicable a los edificios o establecimientos de uso industrial o almacenamientos que estén ubicados en edificios destinados exclusivamente a estos usos. Incluye las secciones de oficinas y servicios auxiliares que estén ubicados en el mismo edificio.

Se basa en el cálculo de **Qp** (carga de fuego ponderada) y clasifica el riesgo en tres categorías:

- **Riesgo bajo** para Qp inferior a 200 Mcal/m² (840 MJ/m²)
- **Riesgo medio** para Qp entre 200 y 800 Mcal/m² (entre 840 y 3.340 MJ/m²)
- **Riesgo alto** para Qp superior a 800 Mcal/m² (3.340MJ/m²):

$$Q_p = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \times H_i \times C_i}{A} \times R_a \quad (2.23)$$

donde:

- Qp : carga de fuego ponderada (Mcal/m² o MJ/m²)
- Pi : masa de cada una de las sustancias combustibles (kg)
- Hi : poder calorífico de cada una de las sustancias en Mcal/kg o MJ/kg
- Ci : coeficiente adimensional que valora la peligrosidad de los productos
- A : superficie construida del local en m²
- Ra : coeficiente del riesgo de activación inherente a la actividad (adimensional)
- i : cada uno de los productos almacenados considerados.

Los tres primeros parámetros se pueden obtener de tablas bibliográficas generales o de las mediciones hechas sobre el proyecto de la instalación. Lo mismo puede indicarse del parámetro área (A). Para el índice C, se propone 1,6 para riesgos altos, 1,2 para riesgos

medios y 1,0 para riesgos bajos (por ejemplo, líquidos con punto de inflamación superior a 61°C).

Para la estimación del parámetro Ra, el índice propone tres niveles en función del riesgo de activación: 3,0 para riesgo alto, 1,2 para riesgo medio y 1,0 para riesgo bajo.

En líneas generales, la aplicación de este método de evaluación del riesgo sigue la descripción matemática del mismo, ya que el parámetro Ra evalúa las posibilidades de activación (probabilidad o frecuencia) y el resto de la Ec. (2.23) estima las consecuencias o magnitud del incendio.

Pese al fundamento termodinámico de la Ec. (2.23), la aplicación de este procedimiento adolece de ciertas indefiniciones. Los valores de los coeficientes C y Ra son un tanto arbitrarios y en particular la estimación de Ra es tan generalista como sucedía en el índice Gretener, con el agravante de que algunos de los ejemplos aportados no se han ponderado convenientemente (sorprende, por ejemplo, que a la fabricación de textiles se le atribuya un peligro de activación bajo, equivalente al de mecanizados metálicos y que a la destilación de productos se le atribuya un peligro de activación medio).

Método de los coeficientes "K"

Es un método de evaluación con igual objetivo que el índice de G. Pourt descrito anteriormente (pretende determinar si la estabilidad y resistencia al fuego de un determinado recinto es suficiente o no en función del riesgo intrínseco del mismo para garantizar el confinamiento del incendio) [CARDONA 1986].

El grado de resistencia o estabilidad al fuego se calcula como:

$$G = \frac{K \cdot Q_r}{4} \quad (2.24)$$

donde:

G: resistencia al fuego en minutos
Qr: carga térmica en Mcal/m²
K: coeficiente reductor entre 0,2 y 1.

El coeficiente K se calcula como:

$$K = f(\sum k_i) \quad (2.25)$$

Los factores ki hacen referencia a: altura del sector analizado, superficie del sector, actividad desarrollada, distancia al edificio más próximo, señalización, accesibilidad y posibilidades de intervención (detección, alarma, bomberos de empresa, equipos de lucha contra incendios, bomberos profesionales, vigilancia permanente, tiempos de intervención, etc.).

Método de los coeficientes "a"

Es un método de evaluación de riesgos parcial, que pretende determinar si la estabilidad y resistencia al fuego de un determinado recinto es suficiente o no en función del riesgo intrínseco del mismo, de manera que se garantice que, de iniciarse un incendio en su interior, sus consecuencias quedarían confinadas, sin afectar a otros sectores [CARDONA 1986].

La resistencia y/o estabilidad al fuego se calculan gráficamente en función de un parámetro V tal que:

$$V = \hat{\alpha} * \sum \alpha_i \quad (2.26)$$

donde β varía entre 1 y 1,3 según sea la función del elemento considerado y α son los coeficientes correspondientes a: carga térmica del contenido y tipo de material, superficie del sector, relación de personas-salidas, detección de alarma y rociadores, personal de extinción profesional o no, dificultades en la extinción y necesidad de equipos especiales de extinción.

En general, se trata de un método de evaluación de las posibilidades de confinamiento de un incendio en recintos cerrados.

ÍNDICES BASADOS EN LA PELIGROSIDAD DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Método IFAL

El método IFAL (Instantaneous Fractional Annual Loss) fue publicado en 1979 por el Insurance Technical Bureau [LEES 1996] [MUNDAY 1980]. Se basa en el cálculo de la pérdida anual esperada, expresada como fracción del total del valor de la planta evaluada, promediada durante un largo período de años, y suponiendo que durante ese período las condiciones de operación se mantengan constantes.

Se compone de tres factores, según la ecuación:

$$\text{IFAL} = P \times E \times M \quad (2.27)$$

Donde P es el factor de proceso, E es el factor de ingeniería y M es el factor de gerencia.

El factor P pondera el peligro inherente de la planta y se evalúa para cinco escenarios diferentes: fuegos en líquidos, fuegos de vapores, explosiones de vapor no confinadas, explosiones de vapores confinados y explosiones internas.

Para cada uno de estas situaciones se sigue la secuencia de ocurrencia: pérdida de integridad del continente, probabilidad de ignición, probabilidad de propagación del fuego o de la explosión y porcentaje de daños de la zona afectada.

Los criterios usados para la determinación de la probabilidad y gravedad de un suceso son fórmulas, tablas y gráficos experimentales. La probabilidad se evalúa como probabilidad de fallo de los equipos y no de sus componentes.

La principal utilidad de este método se encuentra en que durante la fase de diseño de una planta se puede estimar la variación de la pérdida media anual esperada en función de las modificaciones que se vayan introduciendo.

De su descripción puede destacarse la estructura similar a un árbol de eventos y la orientación específica a los peligros existentes específicos de la industria química.

Índice de incendio y explosión de Dow Chemical

El índice de incendio y explosión ha sido desarrollado por la empresa DOW y está ampliamente respaldado por el AIChE (American Institute of Chemical Engineers) [AIChE 1987], [VILCHEZ 1996]. Constituye un índice de riesgo exclusivo para incendios y explosiones pero especialmente desarrollado para empresas químicas con un riesgo significativo.

Los objetivos del método son: cuantificar el daño esperado ocasionado por un incendio o una explosión, identificar los equipos que generan el mayor riesgo potencial y facilitar a la gerencia de seguridad una priorización de las medidas a adoptar [SANTAMARIA 1994].

El índice de incendio y explosión (en adelante F&E) ha sido ampliamente contrastado por la empresa Dow y empleado por muchas otras, particularmente aquellas susceptibles de generar accidentes graves. Sin embargo se desconoce cual ha sido el universo de estudio, el método y el rango de empresas y países analizado para el cálculo de los coeficientes.

El F&E añade posteriormente unas consideraciones adicionales que permiten estimar el importe de los daños materiales originados por un accidente y la pérdida de beneficios derivada de la paralización de las instalaciones. Con ello se convierte en una herramienta básica para la gerencia de riesgos.

Contrariamente a lo que sucedía con los métodos de aplicación general, el F&E no contempla el peligro para las personas ni las condiciones de evacuación.

La primera fase de su aplicación consiste en la determinación de la unidad de proceso objeto de estudio. De hecho, se considerarán dentro de una misma unidad de proceso todos aquellos equipos próximos entre sí que manipulen los mismos materiales en condiciones de trabajo similares.

El cálculo básico del método es el siguiente:

$$F \& E = F_1 \times F_2 \times MF \quad (2.28)$$

$$F_1 = 1 + \sum_{i=1}^{i=6} f_{1,i} \quad (2.29)$$

$$F_2 = 1 + \sum_{i=1}^{i=12} f_{2,i} \quad (2.30)$$

donde:

F1 : coeficiente de riesgos generales del proceso

F2 : coeficiente de riesgos especiales

MF : factor del material.

Considerado de esta forma, el método no contempla la contribución positiva de los medios de control y de seguridad disponibles, los cuales son analizados con posterioridad bajo el epígrafe de "factores de bonificación" y aplicados sobre el valor de MPPD (Maximum Probable Property Damage, Máximos Daños Probables a la Propiedad).

Estos coeficientes de bonificación se evalúan según:

$$C = C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (2.31)$$

siendo

C1 : bonificación por control de proceso

C2 : bonificación por aislamiento del material

C3 : bonificación por protecciones contra incendios.

Cada factor Ci se calcula como producto de una serie de factores ponderados inferiores a la unidad y que por lo tanto tienden a minimizar el valor del índice obtenido.

A partir de la determinación de F&E, el método propone una estimación del radio de exposición, del importe económico a valor de reposición de los bienes ubicados en el área presuntamente expuesta, el factor de gravedad del daño a considerar, los días de paralización estimados y las pérdidas de beneficios derivadas de ello.

A continuación se analizan con detalle cada uno de los factores citados.

Factor material (MF): Una vez identificada la unidad de proceso que se va a analizar, el primer paso consiste en determinar la peligrosidad intrínseca de los materiales presentes en la planta, derivada de la energía potencial que pueden liberar en caso de incendio o explosión.

Para esta estimación el método se apoya en los números Nf de incendio [NFPA 1986] (o St en el caso de polvos) y Nr de reactividad de la NFPA (National Fire Protection Association) y en función de ellos se calcula un factor MF de 1 a 40.

Ello implica que en función de MF el índice F&E puede aumentar 40 veces su valor.

El factor Nf para líquidos y gases, según queda definido en el código NFPA 325M [NFPA 325M], tomará valores entre 0 y 4 en función de su temperatura de inflamación ("flash point") y de su punto de ebullición en condiciones estandar.

El factor Nr representa la inestabilidad o reactividad de la sustancia en condiciones ambientales normales. Su estimación puede hacerse de forma cualitativa u obtenerse de forma objetiva considerando la temperatura de pico de un análisis térmico diferencial, según la Tabla 2.2:

Tabla 2.2. Estimación del factor Nr.

N _r	DESCRIPCIÓN	TEMPERATURA (°C)
0	Estable	>400
1	Poco reactiva (incluso con P y T)	305 – 400
2	Alguna reactividad (incluso sin P o T)	215 – 305
3	Posible detonación por confinamiento	125 – 215
4	Detonante incluso sin confinamiento	<125

Factores generales del riesgo (F1): Evalúan la potencial peligrosidad de las operaciones normales de proceso. Obviamente si un factor no debe ser considerado en un caso particular, se aplicará con coeficiente 0. Los mínimos valores atribuidos en la Tabla 2.3 son los que propone el método como penalización más suave, caso de que proceda la consideración de un factor de riesgo determinado.

La última columna recoge la influencia relativa en F1 que representa cada coeficiente máximo. Obviamente no suman 100, pues el cálculo de F1 incluye un factor base de 1, con lo que su valor máximo, en el supuesto teórico de que fueran procedentes todas las penalizaciones, es de 5,45.

Tabla 2.3. Factores generales del riesgo.

FACTOR DE RIESGO	COEFICIENTE	PESO RELATIVO (% de F ₁) ⁵
Reacciones exotérmicas	0,3 - 1,25	22,9
Procesos endotérmicos en reactores	0,20 - 0,40	7,33
Manejo y transferencia de materiales	0,25 - 1,05	19,2
Unidades de proceso en zonas cerradas	0,25 - 0,90	18,5
Accesos inadecuados para equipos de emergencia	0,35	8,4
Drenajes	0,25 - 0,50	9,17

Es fácil observar que el presente método se aleja en principio de la definición matemática de riesgo y que en el cálculo de F1 se mezclan criterios que afectan a la frecuencia (manejo y transferencia de materiales, reacciones exotérmicas, ...) y criterios que afectan a su magnitud (drenajes, accesos,...).

Para instalaciones de trabajo en continuo en las que un equipo trabaja siempre en las mismas condiciones y en el mismo proceso, resulta más o menos sencillo atribuir unos u otros coeficientes por lo que respecta a la presencia o ausencia de reacciones exotérmicas o endotérmicas. Sin embargo, para empresas que puedan trabajar en procesos discontinuos ("batch") puede resultar complejo asignar de una manera razonada unos u otros coeficientes.

La consideración de la forma de manipulación de los reactivos y productos empleados en la planta es una aportación nueva respecto a los otros índices estudiados hasta el momento, obviamente fruto de la especificidad del método para empresas del sector químico.

Factores especiales de riesgo (F2): Aquellas condiciones de proceso especialmente agravantes del riesgo de explosión y/o incendio.

El método considera un valor relativo a la toxicidad que no pretende evaluar el riesgo de contaminación del medio ambiente o la salud laboral de los trabajadores, sino tan sólo considerar el factor agravante para la intervención en caso de emergencia que ello supone.

Se calcula en función del número Nh, también definido en el código NFPA 704 y NFPA 325M.

Las penalizaciones correspondientes a trabajos en concentraciones de inflamables próximas a su límite inferior o superior de inflamabilidad (LII ó LSI), son de entre 0,3 y 0,8 según se trate de una situación habitual en la unidad o únicamente factible en caso de avería o mal funcionamiento de algún equipo o instrumento.

Por lo que a la presencia de polvos se refiere, el factor atribuido es tanto mayor cuanto menor es el tamaño de partícula. Si la manipulación de estos polvos se hace en atmósfera inerte, el factor se divide por dos.

La presencia de dispositivos para aliviar presiones es considerada en el método de forma bastante desarrollada. El principal inconveniente de su aplicación es que se basa en un gráfico de penalización frente a presiones con ulteriores correcciones del valor obtenido (los valores mínimos y máximos se indican en la Tabla 2.4 para el rango de presiones del gráfico).

⁵ El peso relativo se calcula como la relación entre el máximo valor que puede adoptar un factor y el máximo valor de F1 (5,45), expresado en forma porcentual.

Tabla 2.4. Factores especiales de riesgo.

FACTOR DE RIESGO	COEFICIENTE	PESO RELATIVO ⁶ (% de F ₂)
Toxicidad del material	0,20 – 0,80	5,18
Operaciones a vacío	0,50	3,24
Trabajos próximos a los LII y LSI	0,30 – 0,80	5,18
Peligro de explosión de polvos	0,13 – 2,00	12,96
Dispositivos de alivio de presiones (dependen de P)	0,10 – 1,13	7,32
Trabajos a baja temperatura	0,20 – 0,30	1,94
Cantidad de material combustible (depende de m y ΔH _c)	0,15 – 4,00	25,92
Corrosión y erosión	0,10 – 0,75	4,86
Escapes a través de juntas	0,10 – 1,50	9,72
Presencia de hornos (depende de la distancia)	0,10 – 1,00	6,48
Equipos de intercambio de calor con aceite térmico	0,25 – 1,15	7,45
Equipos en rotación de gran potencia	0,50	3,24

Como punto de partida se toma el factor de penalización correspondiente a la presión de trabajo habitual. Si es preciso, este factor se corrige con algunos factores multiplicativos entre 0,7 y 1,3 y por último este resultado se multiplica por el factor obtenido para la temperatura de trabajo y se divide por el factor correspondiente a la presión de alivio del sistema, obteniéndose así el valor definitivo.

Existe un factor de penalización para la cantidad de material peligroso presente en la unidad de proceso, diferenciando entre tres situaciones: líquidos y gases de proceso, líquidos y gases en zonas de almacenamiento y combustibles sólidos en almacenamiento o polvos en proceso. Se observa que no se hacen referencias explícitas a las formas de almacenamiento posibles, con las limitaciones que ello supone.

En el caso de líquidos y vapores de proceso, deberá evaluarse la cantidad de sustancia presente considerando la que en un momento determinado está en la unidad o la mayor cantidad posible de material que se encuentre en una unidad conectada a ella (no se considerará si hay posibilidad de aislarlas de forma remota).

Esta cantidad deberá multiplicarse por el calor de combustión o calor de reacción correspondiente (para sustancias inestables) y realizar una lectura en gráfico, lo cual supone un relativo inconveniente para automatizar el cálculo (la función representada es fácilmente ajustable empíricamente).

Para el caso de que se trate de almacenamientos, el proceso es muy similar, sigue el mismo mecanismo pero da como resultado penalizaciones inferiores. Es interesante la consideración que hace de los cubetos para contención de derrames, indicando que si no existe posibilidad de drenarlos en 30 minutos, se tomará como cantidad de reactivo la totalidad del que contiene el cubeto.

⁶ El peso relativo se calcula como la relación entre el máximo valor que puede tomar un factor y el máximo valor de F₂ (15,43), expresado en forma porcentual.

Para combustibles sólidos o polvos, se trabaja de forma muy parecida pero se obtienen coeficientes distintos en función de la densidad del material. Los factores en este caso pueden alcanzar valores próximos a 4.

Sin embargo, para lo que a la cantidad de material combustible o reactante se refiere, el método hace una aclaración indicando que cualquier valoración que pueda hacerse de forma personal puede ser más válida que la sugerida por el método.

A priori parece difícil estimar la cantidad de materia involucrada en el evento en tanto en cuanto no se han evaluado de forma sistemática escenarios de siniestros o simulaciones de la dispersión generada, etc. En este sentido el método Dow, buscando más facilidad de aplicación, a renunciado a recurrir a modelos de simulación u otros procesos de análisis de riesgos más detallados [CCPS-AICHe 1989] [CCPSAICHE 1994] [CCPS-AICHE 1996] [MADSEN 1994].

La presencia de quemadores próximos a la unidad de proceso es penalizada con valores de entre 0,1 y 1,0 en función de un gráfico que depende de la distancia del quemador a posibles fugas y del estado físico de la sustancia considerada para evaluar el factor material.

Se adopta como valor máximo del factor F2, 15,43. De aquí se extraen los pesos relativos indicados en la Tabla 2.4, utilizando los coeficientes máximos de cada parámetro. Como ya se ha comentado anteriormente, este valor aun podría ser algo superior en algunas condiciones, dadas las limitaciones que impone la aplicación del factor que caracteriza el trabajo cerca de las concentraciones de inflamabilidad.

Analizando los pesos relativos de cada factor resulta obvia la importancia que en el factor F2 tiene la cantidad de materia involucrada en un posible evento no deseado (25%), así como la presencia de polvos susceptibles de explotar (13%).

Resulta interesante observar por ejemplo que el método Gretener, a un factor equivalente (carga térmica mobiliaria) le atribuye un peso relativo máximo del 2,5%.

Factor de bonificación por control del proceso (C1): En la consideración de las bonificaciones por control de procesos, se contemplan todas aquellas medidas adicionales que permitirían una actuación rápida y eficaz en caso de pérdida de control de la situación.

Conviene destacar que los métodos no específicamente desarrollados para empresas del sector químico no hacían ninguna referencia a este tipo de parámetros, altamente significativos.

Tabla 2.5. Bonificaciones por control de procesos.

FACTOR DE RIESGO	COEFICIENTE
Generadores de emergencia	0,98
Refrigeración mínima de 10 min. para emergencias	0,97 – 0,99
Sistemas de alivio	0,84 – 0,98
Parada de emergencia	0,96 – 0,99
Control por ordenador	0,93 – 0,99
Gases inertizantes	0,94 – 0,98
Instrucciones de operación escritas y detalladas	0,91 – 0,99
Revisiones bibliográficas	0,91 – 0,98

Factor de bonificación por aislamiento del material (C2): Se recogen en este grupo C2 aquellos aspectos que permiten un aislamiento rápido de los materiales susceptibles de alimentar un incendio de manera indeseada. Por lo tanto estos factores irán en función de la velocidad de drenaje, la posibilidad de venteos o de recogida en depósitos pulmón, etc. Al igual que sucedía para el factor C1, estas consideraciones no estaban contempladas en los métodos no específicos para empresas químicas.

Tabla 2.6. Bonificaciones por aislamiento del material.

FACTOR DE RIESGO	COEFICIENTE
Válvulas de aislamiento a distancia	0,96 – 0,98
Depósito de trasvase para emergencias	0,96 – 0,98
Drenajes	0,91 – 0,97
Bloqueo para flujos incorrectos	0,98

Factor de bonificación por protecciones contra incendios (C3): Se recogen en este grupo aquellos aspectos que permiten una actuación eficaz en la lucha contra incendios.

Respecto a otros métodos analizados aparecen como factores nuevos, los generadores de espumas, las cortinas de agua, la protección de los cables y la detección de fugas.

Se destaca que la presencia de rociadores minora el riesgo hasta en un 25%, mientras que para el método Gretener su peso relativo era del 100% y para el método MESERI era de 15%.

De la misma forma, el método Gretener establece un peso relativo del 30% para la capacidad RF de la estructura portante, que es el factor equiparable a la ignifugación recogida en la Tabla 2.7 y al que el F&E atribuye un peso relativo del 5% como máximo.

Como ya se ha comentado anteriormente, una vez calculado el F&E es posible estimar el radio (y en consecuencia el área) de exposición al fuego, el porcentaje de daños estimado (es decir la gravedad del accidente esperado, lógicamente en función del producto $F1 \cdot F2 \cdot MF$), el valor máximo más probable de los daños materiales (MPPD, calculado como valor de reposición de los equipos del área de exposición multiplicado por los factores C de bonificación), los días de parada de la planta y las consecuencias económicas que de ello se derivan (pérdida de beneficios por paralización).

Tabla 2.7. Bonificaciones por protecciones contra incendios (C3)

FACTOR DE RIESGO	COEFICIENTE
Detección de fugas	0,94 – 0,98
Recubrimientos ignifugantes	0,95 – 0,98
Tanques	0,84 – 0,91
Disponibilidad de agua	0,94 – 0,97
Sistemas especiales de extinción	0,91
Rociadores	0,74 – 0,97
Cortinas de agua	0,97 – 0,98
Generadores de espuma	0,92 – 0,97
Extintores portátiles y monitores	0,95 – 0,98
Protección de cables	0,94 – 0,98

El método F&E de DOW, permite evaluar un índice de riesgo exclusivamente derivado de incendio y/o explosión en industrias del sector químico. Los coeficientes aportados para cada factor de riesgo no se justifican estadísticamente, y aunque se observan tendencias muy similares a las de los otros métodos analizados, lo cierto es que los pesos relativos atribuidos en unos y en otros no se corresponden.

Como limitaciones más destacables se indican la no consideración de los incendios exógenos ni la propagación de un incendio a plantas vecinas (efectos dominó).

Tampoco se hacen consideraciones relevantes con relación al riesgo de contaminación ambiental por escapes, fugas o generación de atmósferas tóxicas.

La estimación de las consecuencias de una fuga se deja a criterio del analista y se renuncia a la aplicación de algún modelo de dispersión o técnica equivalente más objetiva.

Como gran ventaja destaca el hecho de que el método ha venido aplicándose durante decenas de años con un resultado práctico que ha permitido su revisión y puesta al día (la última edición es la séptima).

Índice Mond (Desarrollado por ICI)

El índice MOND fue desarrollado por Imperial Chemical Industries y la primera versión apareció en el año 1979. La exposición que se hace a continuación se basa en la segunda edición del método, publicada por ICI en 1985 [ICI 1985].

Es un índice de riesgo de incendio y explosión aplicable a industrias de proceso de gran capacidad productiva. Sin embargo, la toxicidad de los materiales involucrados o de los que posiblemente se generen en un accidente, es contemplada únicamente como un factor agravante en las tareas de control y limitación de la incidencia y no como un posible riesgo en sí mismo.

La aplicación del método, a diferencia de los anteriores, es iterativa, por cuanto en primer lugar se divide la instalación objeto de estudio en unidades de proceso, se describen los materiales determinantes en el riesgo y se evalúa el peor caso ("worst case"). Una vez obtenido un primer resultado, se corrige con la modificación de los índices más determinantes (si ello es razonable) y por último se modifican los valores obtenidos mediante la aplicación de unos factores correctores que tienen en consideración aquellos aspectos que minimizan el riesgo, igual que se hacía en el método DOW.

El método no se complementa con cálculos sobre la pérdida de beneficios, el área afectada o los días de paralización. Sin embargo se subdivide en varios factores indicadores de riesgos parciales (explosión e incendio por separado).

Índice DOW equivalente:

$$D = B \times \left(1 + \frac{M}{100}\right) \times \left(1 + \frac{P}{100}\right) \times \left(1 + \frac{S+Q+L+T}{100}\right) \quad (2.32)$$

Índice de incendio:

$$F = \frac{B \times K}{N} \quad (2.33)$$

Índice de explosión interior:

$$E = 1 + \frac{M+P+S}{100} \quad (2.34)$$

Índice de explosión aérea:

$$A = B \times \left(1 + \frac{m}{100}\right) \times (1+p) \times \left(\frac{Q \cdot H \cdot E}{1.000}\right) \times \left(\frac{t+273}{300}\right) \quad (2.35)$$

Índice global (MOND):

$$R_o = D \times (1 + 0,2 \times E \times \sqrt{A \times F}) \quad (2.36)$$

donde:

D: índice DOW equivalente
B: factor de riesgo del material dominante
M: peligros especiales del material dominante
P: peligros generales del proceso
S: peligros especiales de proceso
Q: peligros con relación a la cantidad de materia
L: coeficiente relativo al área afectada y entorno
T: coeficiente de efectos sobre la salud
F: índice de incendio
K: material total en toneladas
N: área de trabajo (m²)
E: índice de explosión interior
A: índice de explosión aérea
m: características de la dispersión
p: factor de presión máxima de trabajo
H: altura máxima de la instalación
t: temperatura máxima de proceso (°C)
R0: índice global de incendio MOND.
El índice global finalmente obtenido se calcula mediante la aplicación de unos coeficientes correctores:

$$R = R0.K1.K2.K3.K4.K5.K6 \quad (2.37)$$

donde:

K1: posibilidades de contención
K2: control de procesos
K3: actitud frente a la seguridad
K4: protección estructural contra incendios (resistencia)
K5: aislamiento del material
K6: protecciones contra incendios.

Los factores K_i pueden aplicarse tanto sobre el coeficiente R0 global como sobre cada uno de los coeficientes parciales obtenidos.

El cálculo del índice de incendio F no incluye el término de peligro de activación, ya que en la ecuación anterior tan sólo se consideran el factor K (cantidad), el factor B (carga térmica) y N (superficie del área de trabajo).

Resulta interesante destacar que hay unas semejanzas evidentes con el método DOW, en especial en lo que a los factores considerados se refiere. Sin embargo, la evaluación del índice de riesgo no se limita al producto de unos factores por otros sino que introduce en la fórmula de cálculo exponentes fraccionarios y correcciones por temperatura o presión.

No obstante, se desconocen las bases de cálculo utilizadas para el ajuste de los coeficientes así como los casos estudiados para la obtención de los valores calculados.

Material dominante: Tras la división de la planta en unidades, de forma muy similar a como lo trataba el índice F&E de DOW, procede determinar el material dominante en el riesgo y su grado de peligrosidad.

Habitualmente, cualquier sustancia que represente frente al total menos de un 10% en volumen o masa se considera despreciable, a no ser que su peligrosidad intrínseca sea evidente.

El factor material B se calcula como función lineal de la energía de combustión (o de reacción si se trata de productos inestables), que es aquella que se entiende resultaría liberada de forma no controlada en un incendio. Aunque los valores de B pueden ser muy diversos, oscilan aproximadamente entre 1 y 30.

No resulta sencillo determinar el peso relativo del factor B en el conjunto del cálculo, pues participa en varios de los factores y no únicamente como factor multiplicativo. Así por ejemplo, se calcula la relación R30/R1 donde R30 es el índice MOND para una planta con un factor de material B=30 y R1 es el equivalente para la misma planta con un factor de peligrosidad del material B=1:

$$R_1 = D_1 + 0,2 \times D_1 \times E \times \sqrt{A_1 \times F_1} \quad (2.38)$$

$$R_{30} = 30 \times D_1 + 0,2 \times 30 \times D_1 \times E \times \sqrt{30 \times A_1 \times 30 \times F_1} \quad (2.39)$$

luego

$$\frac{R_{30}}{R_1} = 30 \times \frac{1 + 0,2 \times 30 \times E \times \sqrt{A_1 \times F_1}}{1 + 0,2 \times E \times \sqrt{A_1 \times F_1}} \quad (2.40)$$

Si se compara este resultado con el calculado para el F&E (donde el MF máximo era 40) se observa un paralelismo importante.

Con respecto a los métodos anteriormente descritos, la evaluación del factor B equivaldría al 5% que atribuye el método MESERI al conjunto carga térmica Hay que destacar que los dos índices indicados no son exclusivos de la industria química, sector en que la incidencia de las características del material manipulado es altamente significativo.

Peligros específicos del material: Detallan los peligros potenciales asociados a las propiedades físico-químicas de las sustancias manipuladas (Tabla 2.8).

Tabla 2.8. Peligros especiales del material.

PROPIEDAD	COEFICIENTES	PESO RELATIVO
Materiales oxidantes	0 - 20	0,78
Generación de gases combustibles con el agua	0 - 30	1,17
Características de la mezcla o dispersión	-60 - 100	3,92
Susceptible de calentamiento espontáneo	30 - 250	9,80
Polimerización rápida y espontánea	25 - 75	2,94
Sensibilidad a la ignición	-75 - 150	5,88
Susceptible de descomposición explosiva	75 - 125	4,90
Susceptible de detonación de gases	0 - 150	5,88
Propiedades explosivas de la fase condensada	200 - 1.500	58,8
Otros factores	0 - 150	5,88

El cálculo de los pesos relativos se ha hecho con la siguiente consideración:

$$PR = \frac{M_i}{\sum M_{i\max}} \times 100 \quad (2.41)$$

Por características de la mezcla o dispersión se entienden factores como la baja densidad de gases inflamables, gases inflamables licuados, almacenamiento en frío, materiales de alta viscosidad y presencia de polvos combustibles o inflamables.

Obsérvese, de una parte, la semejanza entre los factores de riesgo considerados por unos y otros métodos de evaluación y por otra compárense (aunque de forma aproximada) los pesos relativos atribuidos a cada uno de ellos.

Es de destacar el elevado valor asociado a las propiedades explosivas de la fase condensada (riesgo de explosión en masa), muy superior al atribuido por otros métodos.

Peligros generales de proceso: Evalúan los peligros asociados a los procesos desarrollados en la planta (Tabla 2.9).

Los pesos relativos asignados se han calculado de forma equivalente a como se ha hecho en el apartado anterior en la Ec. (2.41).

Tabla 2.9. Peligros generales de proceso.

PROPIEDAD	COEFICIENTES	PESO RELATIVO
Manipulación y cambios físicos	10 - 50	10,30
Reacciones endotérmicas o exotérmicas	25 - 50	10,30
Reacciones en procesos discontinuos	10 - 60	12,37
Reacciones múltiples en la misma unidad	25 - 75	15,46
Transferencia de materiales	0 - 150	30,92
Contenedores transportables	10 - 100	20,61

F&E venían especificadas explícitamente en la hoja de cálculo, como pueden ser almacenamientos, centrifugación, mezcla y filtración, etc. Los pesos relativos son a simple vista comparables y guardan una similitud importante. No obstante debe tenerse en cuenta que en la aplicación del índice MOND el factor P influye en el cálculo de los índices parciales D y E (y por consiguiente también en A) y su peso relativo en el índice final R es distinto al que aparece en la Tabla.

El índice MOND hace una incidencia concreta en la repercusión negativa que puede tener el que la unidad de proceso sirva para la realización de reacciones diversas. La influencia de este factor puede ser altamente significativa dado que implica operaciones de limpieza, vaciado y situaciones no estacionarias (parada, puesta en marcha,...), en especial en pequeñas y medianas empresas donde los procesos continuos son menos habituales.

Asimismo hace una consideración similar a la que se hacía en el F&E, evaluando el riesgo derivado de las operaciones de transporte, carga y descarga. Es sobradamente conocida la abundancia de siniestros derivados de este tipo de operaciones. El factor será tanto menor cuanto más automatizado y fijo sea el mecanismo de transporte y cuanto menos participación humana haya en el proceso. Consideraciones similares pueden hacerse para los contenedores portátiles.

Peligros especiales del proceso y otros: Similar a los anteriores, recoge todas las incidencias posibles derivadas de condiciones extremas de operación (Tabla 2.10).

Hacer notar tan sólo la presencia de un factor por carga electrostática que no figuraba en el anterior y que al igual que sucede con las operaciones de carga, descarga y manipulación de fluidos influye notablemente en la probabilidad de ocurrencia de un siniestro.

El factor de cantidad de material presuntamente afectado por un incendio o explosión no figura en el cálculo de S pero se calcula a continuación como lectura en un gráfico semi-logarítmico que le atribuye valores entre 1 y 900 (peso relativo: 19,06). Resulta relevante que el método explicita que se dará un valor de Q=1 para cantidades inferiores a 100 kg. Esta anotación permite hacer pensar que el ámbito de aplicación de estas tablas, en su parte inferior, puede ser aplicable a plantas pequeñas.

Tabla 2.10. Peligros especiales de proceso.

PROPIEDAD	COEFICIENTES	PESO RELATIVO
Operaciones a baja presión	50 - 150	3,17
Operaciones a alta presión	0 - 150	3,17
Baja temperatura	0 - 100	2,11
Alta temperatura	0 - 35	0,74
Corrosión y erosión	0 - 400	8,47
Juntas y fisuras	0 - 60	1,27
Vibraciones y otras cargas	0 - 100	2,11
Reacciones difíciles de controlar	20 - 300	6,34
Operaciones próximas al LII - LSI	25 - 450	9,53
Peligros de explosión	40 - 100	2,11
Peligro de explosión o combustión de polvos	30 - 70	1,48
Presencia de oxidantes fuertes	0 - 400	8,47
Sensibilidad a la ignición	0 - 100	2,11
Peligros por carga electrostática	10 - 200	4,22

Es asimismo destacable que siguen sin observarse consideraciones especiales sobre la forma de almacenamiento (tanques, bidones, sacos,...) y el nivel de seguridad/inseguridad que ello implica. De la misma forma, no se contemplan otros riesgos adicionales genéricos de la industria pero no exclusivos de la industria química (cargadores de baterías, transformadores de corriente eléctrica, equipos de acondicionamiento de aire, etc.).

Tabla 2.11. Otros peligros considerados.

PROPIEDAD	COEFICIENTES	PESO RELATIVO
Diseño y distribución de la estructura	0 - 200	4,23
Efecto dominó	0 - 250	5,29
Instalaciones por debajo del nivel del suelo	50 - 150	3,17
Drenajes de superficie	0 - 100	2,11
Otros	50 - 250	5,29
Efectos para la piel	0 - 50	1,06
Efectos por inhalación	0 - 50	1,06

Los parámetros de la Tabla 2.11, estiman los aspectos fundamentales de la ubicación de la planta (L) y los efectos sobre las personas (T).

Es interesante destacar la presencia del factor "efecto dominó", que contempla la posibilidad de que un evento no deseado en una planta A se propague o afecte a una planta B adyacente. Se evalúa en función de la distancia a la que se encuentran una de otra. De todas maneras, en ese supuesto, los daños serían mucho más elevados que lo que proporcionalmente parece indicar la adición de un factor 200 en el cálculo del coeficiente L.

El método MOND presta especial atención al drenaje de las zonas de trabajo, bien por que suele evitar la acumulación de productos en el suelo, bien por que puede evitar el efecto cubeto y contener un líquido ardiendo sin posibilidad de cortar la alimentación del fuego incontrolado.

Los efectos sobre la piel son estimados de manera muy superficial y su consideración no pasa más allá de los problemas adicionales que plantea a la hora de actuar frente a una situación de emergencia (no evalúa el riesgo de contaminación medioambiental).

Los efectos por inhalación son analizados de manera similar, aunque para éstos si que se aporta un criterio más sistemático de evaluación.

El valor máximo que puede tomar el término S+Q+L+T es de 4.720, término que se ha usado en el denominador para calcular los pesos específicos indicados en las Tablas 2.10 y 2.11.

Factores de bonificación: A continuación se recogen los factores de bonificación que el método plantea para reducir el valor del índice obtenido, en función de las medidas de prevención u organización de que disponga la planta.

Tabla 2.12. Factores de bonificación del índice Mond

COEFICIENTE K	PROPIEDAD	COEFICIENTES
Peligro de contención	Tanques a presión	0,8 - 0,9
	Tanques verticales	0,8 - 0,9
	Tuberías de transferencia	0,6 - 0,9
	Otras barreras adicionales	0,45 - 0,9
	Detección y control de fugas	0,7 - 0,95
	Venteos de emergencia	0,9 - 0,95
Control de procesos	Sistemas de alarma	0,9 - 0,95
	Generadores de emergencia	0,9
	Sistemas de enfriado de emergencia	0,9 - 0,95
	Sistemas de gases de inertización	0,8 - 0,95
	Estudios de actividades peligrosas	0,7 (+/-)
	Paradas de seguridad reguladas	0,7 - 0,9
	Control automatizado por ordenador	0,85 - 0,96
	Protección contra reacciones fuera de control	0,8 - 0,95
	Procedimientos normalizados de operación	0,75 - 1
	Vigilancia de la planta	0,9 - 0,97
Actitud frente a temas de seguridad	Implicación de la gerencia	0,9 - 0,95
	Entrenamientos en seguridad	0,85 - 0,95
	Procedimientos de mantenimiento y seguridad	0,8 - 0,97
Protección física contra el fuego	Protección de la estructura	0,8 - 0,98
	Muros cortafuegos	0,8 - 0,97
	Equipamiento de protección	0,5 - 0,97

Tabla 2.12. (Cont.) Factores de bonificación del índice Mond.

COEFICIENTE K	PROPIEDAD	COEFICIENTES
Aislamiento del material	Sistemas de válvulas	0,65 - 0,9
	Ventilación	0,9
Eq. de intervención	Alarmas de incendio	0,9 - 0,98
	Extintores	0,85 - 0,95
	Suministro de agua	0,75 - 1
	Sistema de monitores o rociadores	0,87 - 0,97
	Espumas y otros inertizantes	0,70 - 0,90
	Brigadas contra incendios	0,70 - 0,90
	Cooperación exterior	0,85 - 0,90
	Ventilación de humos	0,80 - 0,90

Pueden apreciarse las similitudes evidentes con el método DOW. Los factores estudiados son casi los mismos y los pesos relativos asignados guardan una relación importante. El método MOND constituye un desarrollo del índice DOW que amplía el resultado aportando

índices parciales para el incendio, la explosión aérea o la que se produce en situaciones de confinamiento.

No contempla en absoluto otros riesgos presentes: derrames, fugas, contaminación de suelos, etc. La estimación del área afectada no queda determinada por el método de aplicación y se deja a criterio del analista.

El índice de la Unión des Chambres Syndicales de l'Industrie du Petrole (Método UCSIP)

Es un método desarrollado por la Unión des Chambres Syndicales de l'Industrie du Petrole en Francia. Sus objetivos son el análisis semicuantitativo de riesgos en términos de probabilidad y gravedad, que se integran en el cálculo del factor de seguridad. Se desarrolló para industrias petroleras, refinerías y plantas petroquímicas, aunque es de fácil adaptación a otras industrias del sector químico. Su compleja aplicación hace casi imposible su cálculo sin apoyo informático. Incluso en ocasiones es preferible abordar un análisis cuantitativo de riesgos completo.

En líneas generales, se basa en el cálculo de 12 parámetros P_{ij} que definen las características de la instalación, de las operaciones y de las protecciones y que permiten evaluar el factor probabilístico. Asimismo, en función de la energía potencial del sistema, de los accidentes que puedan ocurrir y de su gravedad, se determina el factor de gravedad. Una combinación matemática de estos dos factores generales permite alcanzar el resultado final.

Frente a otros métodos antes descritos, es más detallado, especialmente por lo que se refiere a la evaluación de las consecuencias.

Puede encontrarse una descripción completa del método en la Guía Técnica Métodos Cualitativos para el Análisis de Riesgos publicada por la Dirección General de Protección Civil [D.G.P.C. 1990].

La Tabla 2.13 resume los diferentes niveles de riesgo que contempla el método descrito:

Tabla 2.13. Niveles de riesgo adoptados por el método UCSIP.

NIVEL DE RIESGO	PARÁMETROS
$R > 100\%$	NP=5 FS<1
$80\% < R < 100\%$	NP=4 $1 < FS < 1,25$
$55\% < R < 80\%$	NP=3 $1,25 < FS < 1,82$
$35\% < R < 55\%$	NP=2 $1,82 < FS < 2,85$

Donde R es el nivel de riesgo, NP el nivel de probabilidad (1 para acontecimiento improbable, 5 para acontecimientos muy frecuentes) y FS el factor de seguridad como se describe en la siguiente expresión:

$$FS = \frac{30 \times \left[(0,0945 \times NG + 0,7275) - \frac{0,122}{NG} + 0,02971 \right]}{\sum_{i=1}^{i=2} \sum_{j=1}^{j=5} P_{ij} - 4,5} \quad (2.42)$$

donde:

NG : nivel de gravedad
Pij : parámetros del riesgo.

Para el parámetro NG se especifican seis niveles de gravedad:

- Nivel 0, para sucesos normales en la planta
- Nivel 1, para consecuencias menores, sin pérdidas de producción ni heridos
- Nivel 2, para casos con consecuencias significativas que representan la paralización parcial de la producción
- Nivel 3, para consecuencias críticas dentro de la planta e incluso la producción de heridos
- Nivel 4 para consecuencias catastróficas limitadas a la planta y con posibilidad de heridos y/o muertos
- Nivel 5 para consecuencias catastróficas incluso fuera de la planta.

Para determinar el nivel NG correspondiente a una planta, el método contempla los siguientes escenarios accidentales:

1. rotura de sistemas que transfieran un líquido a presión
2. estallido de un equipo a presión
3. pérdida de confinamiento de un tanque o depósito
4. rotura de un equipo en rotación.

Para cada escenario, se desarrolla un árbol de sucesos y con la ayuda de 58 correlaciones o fórmulas se pueden estimar las consecuencias finales siguientes:

1. toxicidad
2. generación de proyectiles
3. sobrepresión por onda de choque
4. radiación térmica
5. derrame de líquido
6. dispersión de nube de gas.

Los resultados aportados por estas correlaciones suelen ser simplificados y conservadores, en el sentido de que se adoptan siempre las simplificaciones correspondientes al peor caso esperable.

Como datos orientativos, en la Tabla 2.14 se indican los límites de peligrosidad adoptados para cada factor de riesgo:

Tabla 2.14. Consecuencias estimadas para cada factor de riesgo.

CONSECUENCIA	SOBREPRESIÓN (bar)	RAD. TÉRMICA (kW/m ²)	ENERGÍA DE IMPACTO (J)	CONCENTRACIÓN TÓXICA O INFLAMABLE
Riesgo Letal	0,7	23,36	102	Concentración tóxica letal (CTL)
Riesgo de rotura de componentes	1,1	238	3,7-10,5	Valor límite de explosión (LII)
Heridas o daños materiales	0,08	11,83		

Por su parte los parámetros Pij, se ponderan con los coeficientes indicados en la tabla 2.15.

Puede apreciarse que los parámetros P1j hacen la descripción esencial de las instalaciones mientras que los P2j evalúan o ponderan la posibilidad de ocurrencia.

Tabla 2.15. Parámetros del índice UCSIP.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO	MARGEN	PONDERACIÓN (% s/total)
P ₁₁	Antigüedad del sistema	2-5	9,43
P ₁₂	Localización del equipo	2-5	9,43
P ₁₃	Orden de los conjuntos mínimos	1-5	9,43
P ₁₄	Redundancias de control	1-4	7,54
P ₁₅	Conformidad a normas	2-4	7,54
P ₁₆	Soldaduras	1-4	7,54
P ₂₁	Frecuencias de controles	1-5	9,43
P ₂₂	Proximidad a llama	1-5	9,43
P ₂₃	Frecuencia de operaciones transitorias	1-5	9,43
P ₂₄	Detección con alarmas	1-3	5,08
P ₂₅	Medios de protección y prevención	1-4	7,54
P ₂₆	Vibraciones	1-4	7,54

Índices de riesgo de procesos químicos (INSHT)

Elaborados por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, pretenden la evaluación sistemática de todos los riesgos (tecnológicos y laborales) presentes en las plantas de tipo químico (por separado), con un enfoque muy similar al de los métodos específicos descritos anteriormente y sin embargo con aportaciones muy significativas en cuanto a las hojas de trabajo o "check-list" y la parametrización de los factores de riesgo.

Se trata por tanto de un método desarrollado específicamente para plantas de tipo químico.

Sin embargo, no se limita a la evaluación de un índice de riesgo de incendio y/o explosión, sino que contempla una larga relación de peligros, incluidos los relacionados con el área de higiene y condiciones de salud laboral (atmósfera de trabajo, fatigas, formación de la plantilla, caídas,...).

En este sentido resulta muy útil para valorar riesgos toxicológicos o de accidentes graves no necesariamente de incendio.

Para ejemplificar mejor esta circunstancia, en la Tabla 2.16 se recogen los títulos de las hojas de cálculo presentadas con el método y que, salvo la primera, dan lugar a uno o más índices de riesgo.

Tabla 2.16. Relación de índices de riesgo del INSHT para plantas químicas.

Nº	HOJA DE CÁLCULO
1	Distribución de la plantilla del personal de proceso
2	Riesgo intrínseco
3	Emplazamiento y área física de trabajo
4	Condiciones materiales de seguridad
5	Condiciones ambientales
6	Almacenamiento de sustancias peligrosas
7	Suministro de gases
8	Instalación eléctrica
9	Recipientes a presión
10	Protección contra incendios
11	Mantenimiento
12	Comunicaciones y procedimiento de trabajo
13	Operaciones e intervenciones peligrosas
14	Información y formación
15	Carga física
16	Carga mental y organización del trabajo
17	Análisis de riesgos
18	Almacenamiento de productos químicos
19	Estación transformadora y mantenimiento eléctrico
20	Instalaciones generadoras de vapor

Por ejemplo, la hoja Nº 5 "Condiciones ambientales" da origen a cuatro índices de riesgo correspondientes a iluminación, ambiente térmico, ruido y ventilación.

El principal inconveniente, al igual que sucedía con los demás métodos, reside en la evaluación de los coeficientes que se atribuyen a cada condición de riesgo y su representatividad dentro del conjunto. La aceptabilidad del riesgo para cada uno de los calculados, se establece en la Tabla 2.17:

$IR \leq 20$	Riesgo BAJO
$20 < IR \leq 40$	Riesgo MEDIO
$40 < IR \leq 80$	Riesgo ALTO
$80 < IR \leq 100$	Riesgo MUY ALTO

según la Ec. (2.43):

$$IR_j = \min \left[(1 - X_n) \sum_{i=1}^{i=n-1} x_i, 100 \right] \quad (2.43)$$

Aunque no en todos los índices la fórmula base es la misma.

Su aplicación requiere un conocimiento especialmente detallado del riesgo analizado y de las condiciones de trabajo en el mismo.

Por otra parte, se apoya de forma significativa y evidente en conceptos tratados por los índices MOND y DOW, pero aportando criterios adaptados a las normativas legales

españolas y europeas, por lo que permite la evaluación de la adecuación a normas de forma bastante sencilla.

En la Tabla 2.18 se recogen los índices calculados para la peligrosidad del proceso y de las materias utilizadas. A la vista de esta tabla, es interesante destacar los siguientes aspectos:

- 1) El cálculo del factor de peligrosidad intrínseca de la unidad (IRP) no viene afectado por las propiedades de las sustancias involucradas y se corresponde perfectamente con el cálculo del factor $F1 \cdot F2$ del índice F&E de DOW.
- 2) El riesgo de inflamabilidad de una sustancia se calcula en función del riesgo intrínseco de la unidad, de la inflamabilidad propia de la sustancia y del factor de riesgos adicionales.
- 3) Uno de los índices calculados, el IRI (Riesgo de inflamabilidad de una sustancia en el proceso), sería lo más próximo al F&E de Dow, ya que contempla los riesgos generales y específicos del proceso y las características del material con el que se trabaja.

En general, para todo el conjunto de índices cabe destacar que las hojas de cálculo han sido muy bien diseñadas y recogen de manera ordenada y pormenorizada los datos e informaciones de interés para la correcta valoración de los riesgos.

Tabla 2.18. Índices calculados para evaluar la peligrosidad del proceso.

ÍNDICES	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA
IR211 - Inflamabilidad (de una sustancia).	Σ peligrosidad \times Σ cantidad
IR212 - Reactividad (de una sustancia).	Σ peligrosidad \times Σ cantidad
IR213 A - Toxicidad aguda (de una sustancia).	$(0,2 \cdot \text{Factor de toxicidad en humanos} + 0,8 \cdot \text{Factor de toxicidad en animales}) \cdot \text{Cantidad} \cdot \text{Factor de propiedades físico-químicas}$.
IR213 C - Toxicidad crónica.	Peligrosidad de la sustancia \cdot Factor de propiedades físico-químicas.
IR214 - Corrosividad.	Σ peligrosidad \times Σ cantidad
IR215 I - Factores adicionales de inflamabilidad.	Σ factores de inflamabilidad
IR215 T - Factores adicionales toxicológicos.	Σ (Factores de condiciones de proceso y propiedades físico-químicas) \cdot coeficiente
IR22 - Peligrosidad general del proceso.	Σ Factores de condiciones de trabajo
IR23 - Peligrosidad específica del proceso.	Σ Condiciones de trabajo extremas
IRP - Peligrosidad intrínseca de la unidad.	$0,25 \cdot \text{IR22} + 0,75 \cdot \text{IR23}$
IRI - Riesgo de inflamabilidad de una sustancia en el proceso estudiado.	$0,4 \cdot \text{IR211} + 0,5 \cdot \text{IRP} + 0,1 \cdot \text{IR215 I}$
IRT - Riesgo de toxicidad de una sustancia en el proceso estudiado.	$0,4 \cdot \text{IR213 A} + 0,5 \cdot \text{IRP} + 0,1 \cdot \text{IR215 T}$

Índice Chemical Exposure Index de DOW (CEI)

La primera versión de este método fue elaborada en 1986 por DOW y contempla el riesgo de exposición a contaminantes químicos derivado de un accidente tecnológico agudo. Por lo tanto no es un índice de riesgo de incendio como los anteriores y, en principio, si exclusivo para aplicar en industrias químicas o que manipulen sustancias tóxicas o peligrosas.

No evalúa las probabilidades de ocurrencia del suceso y no valora la mayor o menor peligrosidad intrínseca del proceso, sino que únicamente estima la peligrosidad de manipular una sustancia peligrosa en un área determinada [DUCLOS 1995].

La primera revisión del índice se publicó por AIChE en 1994 [AICHE 1994], [MARSHALL 1995]. Para valorar el impacto de una fuga accidental, se consideran en el CEI cinco parámetros fundamentales: toxicidad, cantidad de materia emitida a la atmósfera, distancia al área sensible a la fuga, peso molecular de la sustancia y otras variables que influyen en

la magnitud del daño. Cada uno de estos cinco parámetros es ponderado en una escala de intervalo que varía de 0 a 4 y el producto de todos ellos da como resultado el índice CEI.

Para la estimación de las cantidades de sustancia que constituyen las nubes tóxicas o para determinar las velocidades de salida de los fluidos a través de los orificios que se asumen en los diferentes escenarios, se utilizan modelos muy simplificados de reconocida solvencia.

Este índice es utilizado para establecer un ranking de prioridades a la hora de valorar y corregir situaciones peligrosas [MELHEM 1996]. En los procesos de gerencia de riesgos de la empresa DOW, niveles del CEI inferiores a 100 determinan analizar de forma periódica el riesgo, sin más detalle. Niveles entre 100 y 300 determinan profundizar en el análisis de riesgo de forma más generalizada. Valores por encima de 300 determinan la intervención de técnicos especializados de la corporación en análisis de riesgos.

Pese a que los resultados obtenidos de la aplicación del índice se consideran buenos, se apuntan unas limitaciones importantes que han motivado la revisión del mismo. Por una parte, la selección de los escenarios era inconsistente de una planta a otra, provocando resultados totalmente dispares en instalaciones muy similares. Por otra, la poca sensibilidad del método a la descripción de la propia planta implica que la incorporación de medidas correctoras queda incorrectamente reflejada en la disminución del índice CEI.

El proceso de aplicación se inicia con la selección de los diferentes escenarios o situaciones de riesgo. Según la revisión de 1995, los escenarios considerados son los siguientes: rotura o perforación de tuberías de proceso, perforación de mangueras, venteos de seguridad a la atmósfera, rotura de recipientes (tanques, reactores, depósitos, etc.) y rebosamiento en el llenado de recipientes.

Para cada escenario considerado, se estima la cantidad de sustancia que llegaría a intervenir en el accidente mediante las correlaciones citadas y se calcula el índice CEI, que lleva implícitas las condiciones atmosféricas generales de la zona.

A continuación se determinan las distancias a las que se alcanzarían las concentraciones límite en cada caso, seleccionándose aquellos escenarios con un valor más elevado.

En resumen, el índice CEI facilita un método simple para valorar la posible gravedad para las personas en las proximidades de una planta debida a la manipulación de sustancias peligrosas como consecuencia de una fuga accidental.

No pretende definir si una instalación es o no más segura que otra.

Por si mismo es una herramienta preliminar de evaluación de riesgos que permite priorizar las actuaciones correctoras allí donde la gravedad potencial es más evidente.

CONCLUSIONES

Los factores analizados como determinantes para valorar el riesgo de incendio y/o explosión coinciden de manera muy significativa en todos los métodos estudiados.

Esta coincidencia es todavía más evidente si se comparan entre sí los métodos generales aplicables a cualquier tipo de riesgo industrial (Apartado 2.3) o los específicos, desarrollados para la industria química (Apartado 2.4) [LINVILLE 1990].

Se observan asimismo paralelismos evidentes en los procedimientos de cálculo de todos ellos.

Sin embargo, en general, la relevancia que en cada índice tiene cada uno de los factores no se justifica estadísticamente, y responde más a un intento de simular el juicio experto que a

un razonamiento objetivo detallado. En cualquier caso, se desconoce siempre el universo de estudio y el proceso seguido para el desarrollo de los coeficientes atribuidos a cada factor en cualquiera de los índices analizados.

Los valores atribuidos por cada método a estos factores no se corresponden de uno a otro, siendo muy significativas las diferencias de "peso" entre unos y otros.

Se hace evidente que los métodos de aplicación general están mal adaptados a los riesgos de tipo químico. Ello se debe, principalmente, a que en este tipo de riesgos, uno de los factores determinantes para la valoración de los mismos es la peligrosidad intrínseca de las sustancias utilizadas y las condiciones de proceso.

Sin embargo, los métodos de aplicación general descritos en el Apartado 2.3 contemplan muy superficialmente las características químicas de las sustancias, limitándose, por lo general, a la ponderación de la energía de combustión y olvidando otros riesgos no menos importantes (reactividad, polimerizaciones, reacciones no deseadas, toxicidad, explosividad, etc.).

Los métodos desarrollados para la industria química, no obstante, se centran en la descripción de grandes procesos industriales y de alta reactividad, normalmente relacionados con la industria del petróleo y sus derivados básicos, resultando relativamente inadecuada (o desproporcionada) su aplicación a instalaciones más simples y menos peligrosas. La aplicación de estos métodos a empresas de otro tipo requeriría una adaptación de algunos de los factores, la incorporación de otros (que a pequeña escala adquieren mayor relevancia) y la supresión de otros poco significativos.

La valoración de la frecuencia de ocurrencia (el peligro de activación) en muchos de los índices analizados es muy subjetiva y arbitraria, lo que pone de evidencia la dificultad de estimar este factor mediante el estudio de ciertos aspectos concretos de las plantas analizadas.

Dado que los índices estudiados centran su atención en los peligros de incendio y/o explosión, pasan por alto, o valoran de forma muy superficial, los riesgos derivados de emisiones a la atmósfera o de vertidos de líquidos a cauces públicos.

En general, las consecuencias medioambientales no están convenientemente evaluadas en estos índices [CHIRSTEN 1994].

A modo de resumen, en la Tabla 2.19 se estructuran por conceptos los distintos factores de riesgo considerados por los índices Dow y Mond, que han sido los analizados con mayor detalle en los apartados precedentes. Como puede apreciarse, existe una gran coincidencia en lo relativo a factores de riesgo.

Entre paréntesis se indica el método que contempla el factor de riesgo citado y la tabla de este capítulo en la que se cita.

Tabla 2.19. Factores de riesgo en instalaciones de tipo químico.

Propios de las sustancias	Temperatura de inflamación (Dow), Sensibilidad a la ignición (Mond, 2.8, 2.10)
	Punto de ebullición (Dow)
	Reactividad (Dow, 2.2)
	Toxicidad (Dow, 2.4)
	Efectos sobre la piel (Mond, 2.11)
	Efectos por inhalación (Mond, 2.11)
	Presencia de oxidantes fuertes (Mond, 2.10)
	Explosividad de polvos (Dow, 2.4), Descomposición explosiva (Mond, 2.8, 2.10)
	Cantidad de sustancia (Dow, 2.4)
	Material oxidante (Mond, 2.8)
	Generación de gases combustibles con el agua (Mond, 2.8)
	Propiedades de la dispersión (Mond, 2.8)
	Tendencia al calentamiento espontáneo (Mond, 2.8)

Tabla 2.18. (Cont.) Factores de riesgo en instalaciones de tipo químico.

Propios de las sustancias (cont.)	Posibilidad de polimerización espontánea (Mond, 2.8) Posibilidad de detonación de gases (Mond, 2.8)
Peligrosidad intrínseca del proceso	Reacciones exotérmicas (Dow, 2.3) (Mond, 2.9) Procesos endotérmicos (Dow, 2.3) (Mond, 2.9) Procesos a vacío (Dow, 2.4) Trabajos próximos a los límites de inflamabilidad (LII-LSI)(Dow, 2.4)(Mond, 2.10) Trabajos a alta o baja temperatura (Dow, 2.4) (Mond, 2.10) Cambios de estado físico (Mond, 2.9) Reacciones en procesos discontinuos (Mond, 2.9) Reacciones a alta o baja presión (Mond, 2.10) Reacciones inestables (Mond, 2.10)
Control y conocimiento del proceso	Control informatizado del proceso (Dow, 2.5) (Mond, 2.12) Protocolos de operaciones válidos (Dow, 2.5) (Mond, 2.12) Información bibliográfica del proceso (Dow, 2.5) (Mond, 2.12)
Sobre la instalación	Transferencia de materiales (Dow, 2.3) (Mond, 2.9, 2.12) Contenedores móviles (Mond, 2.9) Procesos en zonas confinadas (Dow, 2.3), Instalaciones en subsuelo (Mond, 2.11) Existencia de drenajes (Dow, 2.3, 2.6) (Mond, 2.11) Dispositivos de alivio de presiones (Dow, 2.4, 2.5) (Mond, 2.12) Protecciones frente a la corrosión (Dow, 2.4) (Mond, 2.10) Escapes a través de juntas (Dow, 2.4) (Mond, 2.10) Protección de cables (Dow, 2.7) Peligros por electricidad estática (Mond, 2.10) Proximidad a hornos (Dow, 2.4) Equipos de intercambio de calor (Dow, 2.4) Equipos de rotación de gran potencia (Dow, 2.4) Válvulas de bloqueo para flujo inverso (Dow, 2.6) Depósitos de trasvase para emergencias (Dow, 2.6) Reacciones múltiples en la misma unidad (Mond, 2.9) Vibraciones y otras cargas (Mond, 2.10) Distribución de la estructura (Mond, 2.11) Posibilidades de efecto dominó (Mond, 2.11) Tanques a presión (Mond, 2.12) Tanques verticales (Mond, 2.12) Protección frente a reacciones fuera de control (Mond, 2.12) Vigilancia de la planta (Mond, 2.12) Procedimientos de mantenimiento (Mond, 2.12)

Tabla 2.18. (Cont.) Factores de riesgo en instalaciones de tipo químico.

Sobre las medidas de emergencia	Accesibilidad en caso de emergencia (Dow, 2.3) Generadores de emergencia (Dow, 2.5) (Mond, 2.12) Refrigeración para emergencias (Dow, 2.5) (Mond, 2.12) Parada controlada para emergencias (Dow, 2.5) (Mond, 2.12) Gases inertizantes (Dow, 2.5) Mond (2.12) Válvulas de aislamiento a distancia (Dow, 2.6) (Mond, 2.12) Sistemas de detección de fugas (Dow, 2.7)(Mond, 2.12) Recubrimientos ignífugantes (Dow, 2.7) (Mond, 2.12) Disponibilidad de agua (Dow, 2.7) (Mond, 2.12) Sistemas especiales de extinción (Dow, 2.7) (Mond, 2.12) Rociadores (Dow, 2.7) (Mond, 2.12) Cortinas de agua (Dow, 2.7) Generadores de espuma (Dow, 2.7) (Mond, 2.12) Extintores portátiles y monitores (Dow, 2.7)(Mond, 2.12) Contención de derrames (Mond, 2.12) Sistemas de alarma (Mond, 2.12) Implicación de la gerencia (Mond, 2.12) Personal de seguridad (Mond, 2.12) Entrenamientos de seguridad (Mond, 2.12) Muros cortafuegos (Mond, 2.12) Equipos de protección (Mond, 2.12) Ventilación de humos (Mond, 2.12)
---------------------------------	---

Las referencias recogidas en la Tabla 2.19 ponen de manifiesto la gran cantidad de información de que es necesario disponer para poder hacer una descripción detallada de la planta analizada. Para poder elaborar modelos que permitieran estimar la frecuencia o la gravedad de estos accidentes sería necesario disponer de esta información detallada.

EVALUACIÓN DE RIESGOS DE INCENDIO (MÉTODO DE PURT) – (Para la aplicación de sistemas automáticos de detección y extinción).

INTRODUCCION

Desde hace mucho tiempo, se discute, en diversos medios competentes. el problema de la evaluación del riesgo de incendio de un objeto determinado, mediante criterios objetivos para poder determinar consecuentemente, el mejor sistema de protección contra incendio de aquel.

Las personas interesadas en el establecimiento de semejante sistema pueden clasificarse en cuatro grupos:

- a) Los aseguradores (seguros contra incendio)
- b) Las autoridades, por su condición de promotoras de reglamentos referentes a la construcción, cuerpos de extinción (bomberos) o simplemente los encargados de velar por la protección de vidas y propiedades del público
- c) Los usuarios de los edificios (propietarios. inquilinos, clientes, pacientes. etc.)
- d) Los fabricantes de instalaciones de protección contra incendios

Según su origen, son emitidas, frecuentemente, opiniones muy distintas, respecto a la naturaleza y extensión de las medidas de protección contra incendios. Este hecho es comprensible porque actualmente, los juicios solamente pueden apoyarse sobre bases insuficientes. La argumentación se lleva a cabo de manera subjetiva, en lugar de razonar objetivamente.

DEFINICIÓN Y OBJETIVO

Toda medida de protección contra incendio tiene por objeto reducir el peligro de Incendio en un objeto determinado. prescripciones legales de diversa índole, relativas a la construcción y proyecto de edificios, materiales de construcción, instalaciones eléctricas y de calefacción, talleres, etc., tienden a dicho fin.

Se trata esencialmente de medidas preventivas que tienen como finalidad los puntos siguientes:

- Primero, conseguir que la probabilidad de que se declare un incendio sea muy pequeña.
- Segundo, en el caso de que el incendio se produzca, el fuego no se debe poder extender rápida y libremente. es decir solamente deberá causar el menor daño posible.

Cuando se origina un incendio. el tiempo necesario para dominarlo eficazmente comprende dos fases:

- 1) El tiempo necesario para descubrir el incendio y transmitir la alarma
- 2) El tiempo necesario para que entren en acción los medios de extinción.

Estas dos fases, así como la eficacia de los servicios públicos de extinción (efectivos, material, formación) constituyen lo que se llama tiempo necesario para iniciar la extinción y evidentemente es necesario tenerlo en cuenta para la evaluación del riesgo.

Se disminuirá cualquier determinado riesgo de incendio, no solamente mejorando las medidas de prevención sino también y muy especialmente, por medidas complementarias tales como la reducción del tiempo necesario para iniciar la extinción.

Esta es la finalidad de las instalaciones automáticas de protección contra incendios (instalaciones de detección de extinción de incendios).

La decisión relativa a las medidas adecuadas de protección contra incendio es frecuentemente muy difícil de tomar. Por una parte, se trata de determinar si es necesario y económicamente soportable, reducir el riesgo de Incendio con medidas que afecten a la construcción o a la explotación (por ejemplo, construcción de muros corta fuego, adopción de determinado sistema de almacenaje).

Por otra parte se debe juzgar si es necesario establecer una instalación automática de protección contra incendio (detección - extinción). En determinados casos puede imponerse una mejora de efectivos de intervención (pe., la organización de un cuerpo de bomberos de empresa).

La finalidad de una evaluación sistemática del riesgo de incendio consiste en obtener magnitudes numéricas que permitan decidir razonablemente, en función de todos estos factores.

El principio en que se basa la presente proposición consiste en calcular el riesgo de incendio mediante los referentes a la construcción y explotación, así como de los relativos a los efectivos de intervención disponibles. Los valores numéricos así obtenidos, deberán permitirnos determinar si el riesgo se puede considerar tolerable.

Si no fuese así. la fórmula que sirve al base al método de calculo, debe mostrar de manera simple, si se puede llegar y hasta que punto, a la reducción adecuada del riesgo mejorando las medidas preventivas, Pero si esta reducción del riesgo no puede conseguirse, ya sea, por razones financieras o relativas a la explotación, o si el riesgo continúa siendo, no obstante, demasiado grande, los valores numéricos calculados deben entonces proporcionar la base para decidir, si es posible reducir el riesgo por medios suplementarios, y cuáles deben ser estos medios (detección, extinción, etc.).

Contrariamente a otros sistemas, renunciamos aquí a atribuir un valor fijo de protección a las instalaciones de detección y de extinción, pues este valor solamente puede ser apreciado e función de un riesgo determinado. Según el riesgo, las medidas apropiadas podrán ser una instalación de pre-detección, cuyo objeto es dar la alarma lo antes posible, o bien una instalación automática de extinción que también de la alarma (pero solamente cuando el incendio ha tomado ya cierta importancia) y que inicia, por el contrario, la lucha contra el fuego, simultáneamente.

En determinados casos, una combinación de los dos sistemas (la llamada doble protección) puede representar la mejor solución.

NORMAS A CONSULTAR

Para la aplicación de ésta norma no es necesaria la consulta específica de ninguna otra.

DEFINICIONES

Poder calorífico: Capacidad de 1 kg de material para producir calor por combustión completa, expresada en megajoule por kilogramo (4,18 Mj/kg = 1Mcal/kg).

Carga de fuego: Capaz de desarrollar una cantidad de calor equivalente a la de los materiales contenidos en el sector de incendio

Inflamable: Producto capaz de entrar y mantenerse en combustión en fase gaseosa con emisión de luz, durante o después de la aplicación de una fuente de calor.

Combustible: Susceptible de quemarse.

Incombustible: No susceptible de quemarse.

Estable al fuego: Aptitud de un elemento de construcción portante o no de no debilitar su resistencia cuando se lo somete a la acción del fuego.

Parallama: Material estable al fuego que además, posee estanqueidad a la llama.

Muro cortafuego: Muro construido con materiales de resistencia al fuego similar a los exigidos al sector de incendio que divide y que cumple asimismo con los requisitos de resistencia a la rotura por compresión, resistencia por impacto, conductibilidad térmica, relación altura/espesor y disposiciones constructivas que establecen las normas IRAM respectivamente.

Resistencia al fuego: Propiedad que se corresponde con el tiempo, expresado en minutos, durante un ensayo de incendio después del cual el elemento de construcción ensayado pierde su capacidad resistente o funcional.

Sector de incendio: Lugares al aire libre, local o conjunto de locales, delimitados por muros y entresijos de resistencia al fuego acorde con el riesgo y la carga de fuego que contiene, comunicado con un medio de escape.

Medio de escape: Medio de salida exigido, que constituye la línea natural de tránsito que garantiza una evacuación rápida y segura. Cuando la edificación se desarrolle en uno o más niveles, el medio de escape puede estar constituido por:

- *Primera sección:* Ruta horizontal desde cualquier punto de un nivel hasta una salida.
- *Segunda sección:* Ruta vertical, escaleras abajo hasta el pie de las mismas
- *Tercera sección:* Ruta horizontal desde el pie de la escalera hasta el exterior de la edificación.

CONDICIONES GENERALES

Sector de incendio de peligrosidad alta: Aquel cuya carga de fuego es mayor a 120 kg de madera/m²

Sector de incendio de peligrosidad media: Aquel cuya carga de fuego está comprendida entre 120 y 60 kg de madera/m²

Sector de incendio de peligrosidad baja: Aquel cuya carga de fuego es menor a 60 kg de madera/m²

Carga de fuegos menores: Las cargas de fuego menores a 20 kg de madera/m² no se tendrán en cuenta a los efectos de aplicación de ésta norma.

Extintores portátiles: Las instalaciones fijas deberán complementarse con equipos extintores portátiles manuales y sobre ruedas, de acuerdo con las normas IRAM correspondientes

CALCULO DEL RIESGO DE INCENDIO

FUNDAMENTO DEL CALCULO DEL RIESGO DE INCENDIO

La acción destructora del fuego se desarrolla en dos ámbitos distintos: los edificios y su contenido.

El riesgo del edificio estriba en la posibilidad de que se produzca un daño importante: la destrucción del inmueble. Depende esencialmente, de la acción opuesta de dos factores:

- a) La intensidad y duración del incendio.**
- b) La resistencia de la construcción.**

El riesgo del contenido está constituido por el daño a las personas y a los bienes materiales que se encuentran en el interior del edificio.

Los dos riesgos están hasta tal punto unidos, el uno al otro, que por una parte, la destrucción del edificio, lleva consigo también, generalmente, la destrucción de su contenido representa, muy frecuentemente, el principal peligro para el edificio. De todos modos, estos dos riesgos pueden existir también independientemente uno del otro.

Así un gran riesgo para el edificio puede no representar más que un riesgo insignificante para el contenido, pudiendo ocurrir también que el contenido sufra un perjuicio muy importante antes de que se produzca un daño apreciable en el edificio.

De ello resulta que el riesgo total no puede representarse por un sólo valor numérico. Un estudio utilizable prácticamente requiere por lo menos dos sumandos distintos a saber, la componente del riesgo del edificio y la del riesgo del contenido.

El razonamiento siguiente nos muestra claramente que tal distinción es Indispensable: efectivamente la finalidad del sistema consiste en deducir, de la evaluación, las medidas de protección contra incendios, necesarias en cada caso. Si, por ejemplo, el riesgo del edificio predomina, las medidas adecuadas son diferentes de las que hay que tomar cuando el riesgo del contenido es mayor.

En el primer caso, se puede tolerar cierto margen al incendio; pues lo importante, sobre todo, es que no se supere un límite determinado. Si la posibilidad de intervención humana no está en condiciones de garantizarlo, el inmueble está en peligro por lo que se impone la adopción de una instalación de rociadores automáticos de agua.

Si se trata por el contrario de conseguir la evacuación de las personas en un tiempo determinado o de la conservación de instalaciones de valor muy elevado, de bienes preciosos o irremplazables, el objetivo no puede ser alcanzado, por regla general, más que con una instalación de predetección.

Pero semejante diferenciación solamente es posible si representamos el riesgo total por la suma de dos componentes. Esto se obtiene de una manera práctica, con la ayuda de un gráfico sobre el cual se llevan los dos valores como abscisas y ordenadas respectivamente. A cada combinación de riesgo para el edificio y para el contenido corresponde así un punto preciso en el gráfico.

Este diagrama comprende zonas correspondientes a las diferentes medidas de protección. Estas zonas determinan si el riesgo es tolerable o si son necesarias instalaciones automáticas de extinción o de predetección, o incluso las dos conjuntamente.

El principio de esta determinación de las medidas de protección está representado en la fig. 1.

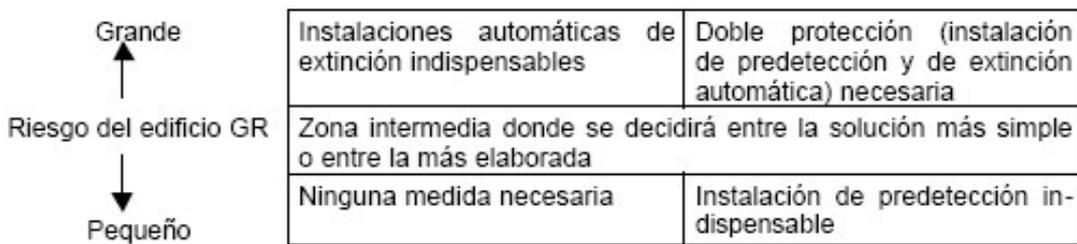


Fig. 1- principio del diagrama de medidas de protección

Si el edificio comprende varias zonas o sectores corta fuegos que se diferencian claramente unos de otros, es necesario que el cálculo de G R y de IR se realice separadamente para cada zona. Se puede llegar así a medidas de protección diferentes para cada una de las zonas corta fuegos.

Si no es posible llegar a una normalización, por ejemplo a consecuencia de un cambio en la concepción, se deberá considerar la combinación de varios tipos de instalaciones de protección contra incendio para un mismo edificio. Este será muy frecuentemente el caso para edificios de grandes dimensiones.

4. CALCULO DEL RIESGO DEL CONTINENTE GR (Edificio)

Aumentan el peligro en relación con el riesgo del edificio los siguientes factores principales:

- 1) *La carga térmica (Q) y la combustibilidad (C).* La carga térmica se compone de la carga térmica del contenido (Qm) y la carga calorífica del inmueble (Qi).
- 2) *La situación desfavorable y gran extensión del sector corta fuegos (B)* considerado.
- 3) *Largo período de tiempo para iniciar la actuación* de los bomberos y eficacia de intervención insuficiente comprendidos en el coeficiente de tiempo necesario para iniciar la extinción (L).

Por el contrario favorecen la acción del riesgo:

- 1) *Una gran resistencia al fuego* de la estructura portante de la construcción (W).
- 2) *Numerosos factores de influencia secundaria* (pe., focos de ignición, almacenaje favorable) que hay que tener en cuenta como factores de reducción del riesgo (R).

De acuerdo con los factores mencionados anteriormente, se puede calcular el riesgo del edificio de acuerdo con la siguiente expresión:

$$GR = \left(\frac{Qm.C + Qi}{W.Ri} \right).B.L$$

- **Qm** = Coeficiente de carga de fuego del contenido
- **C** = Coeficiente de combustibilidad del contenido
- **Qi** = Coeficiente de la carga de fuego del continente (inmueble)
- **B** = Coeficiente del sector de incendios según tabla VII
- **L** = Coeficiente correspondiente al tiempo necesario para iniciar la extinción
- **W** = Factor correspondiente a la resistencia al fuego de la estructura portante de la construcción según tabla IX
- **Ri** = Coeficiente de reducción del riesgo, según tabla X

Explicación y apreciación de los diferentes coeficientes.

Q_m = Coeficiente de carga calorífica del contenido: La carga calorífica se mide generalmente en Kgs. De madera/m² o en Mcal/m². El valor se puede calcular o estimar y en determinados casos se puede obtener de tablas de apreciación para las diferentes clases de materiales. Se atribuye así a la carga calorífica efectiva un valor numérico estimado: Q_m . A este efecto hemos seguido la proposición de M. Gretener.

La tabla 1 reproduce los valores correspondientes.

Escala	Kgs. de madera/m ²		Mcal/m ²		Q_m
1	0	15	0	60	1.0
2	16	30	61	120	1.2
3	31	60	121	240	1.4
4	61	120	241	480	1.6
5	121	240	481	960	2.0
6	241	480	961	1.920	2.4
7	481	960	1.921	3.840	2.8
8	961	1.920	3.841	7.680	3.4
9	1.921	3.840	7.681	15.360	3.9
10		> 3.841		> 15.361	4.0

Una vez determinado Q_m se establece ya cierra correlación. Todos los otros factores del riesgo del edificio **GR** deben estar en relación lógica. Estas relaciones en gran parte pueden deducirse inmediatamente del hecho de que mediante el conocimiento de la carga calorífica se puede prever bastante bien la duración probable del incendio.

Conocida esta relación puede considerarse como suficiente un tipo de construcción que presente una resistencia al fuego correspondiente a la duración máxima previsible del incendio; por ejemplo, si ésta fuese de 30 minutos, la estructura tendría que tener una resistencia al fuego igual a RF-30.

La resistencia al fuego a su vez, puede relacionarse con el tiempo necesario para iniciar la extinción: un edificio tiene grandes probabilidades de ser salvado si se espera que la intervención pueda realizarse en forma eficaz en un periodo de tiempo inferior a la resistencia al fuego de la estructura portante de la construcción.

Para otros factores, la relación no se puede deducir tan directamente. De todos modos, como se demostrara seguidamente, esta relación no presenta ningún problema particular puesto que se puede referir parcialmente a las prescripciones existentes.

C = Coeficiente de combustibilidad: Desde el punto de vista técnico de la protección contra incendio, se toma como base, para la determinación del coeficiente de combustibilidad, la clasificación de materiales y mercancías, establecida de acuerdo con la lista publicada por el Servicio de Prevención, Extinción de Incendios y Salvamento (SPEIS) y el CEA.

Se establecen seis clases de las que tres presentan una combustibilidad y velocidad de combustión superior a la madera en trozos. A la madera en trozos, se le asigna el valor 1.

Para las tres clases de materiales con coeficiente de combustibilidad mayor que el de la madera a trozos, se han establecido valores, que varían entre 1 y 1.6. Esta clasificación corresponde, muy aproximadamente a la propuesta por M. Gretener.

Escala	Clase de riesgo del material	C
1	Fe VI (peligro mínimo)	1.0
1	Fe V	1.0
1	Fe IV	1.0
2	Fe III	1.2
3	Fe II	1.4
4	Fe I (peligro máximo)	1.6

Porcentaje del material de mayor combustibilidad con respecto al peso total	Repercusión sobre la clase de peligro
Hasta el 10 %	La clase de peligro del material de mayor representación es determinante
10 al 25 %	Se aumenta 1 grado la clase de peligro del material de más fuerte representación
25 a 50 %	Es determinante la clase de peligro del material de menor representación

Q_i = Valor suplementario para la carga calorífica del inmueble: Solamente se consideran los factores que de acuerdo con la experiencia, juegan un papel real durante el incendio de un inmueble. Debido a ello no se tienen en cuenta las ventanas ni los revestimientos exteriores. En caso de incendio su calor de combustión escapa generalmente, por la periferia. La forma como influye la carga calorífica del inmueble y la naturaleza de los materiales empleados, permiten renunciar a una diferenciación en función de su combustibilidad.

Por analogía con la tabla 1, encontramos para Q_i los siguientes valores suplementarios.

Escala	Kgs. de madera / m ²	Q_i
1	0 – 20	0.0
2	21 – 45	0.2
3	46 – 70	0.4
4	71 - 100	0.6

Prácticamente el valor Q_i puede obtenerse de la tabla de M. Gretener.

En esa tabla, los diferentes tipos de edificaciones están clasificados, desde el punto de vista técnico de la protección contra el incendio, de acuerdo con los correspondientes valores de la carga térmica del Inmueble.

B = Coeficiente correspondiente a la situación y superficie del sector corta fuego:

Tiene en cuenta el incremento del riesgo resultante, por una parte, de la dificultad de acceso del equipo de intervención (sótano, planta superior) y por otra la posibilidad de propagación del incendio a todo el sector.

La tabla 4 contiene los valores establecidos para el factor B y se basa en las prescripciones existentes.

Escala	El objeto presenta las características siguientes	B
1	- superficie del sector corta fuego inferior a 1.500 m ² - o como máximo tres plantas - o altura del techo 10 m como máximo	1.0
2	- superficie del sector corta fuego comprendida entre 1.500 y 3.000 m ² - o de 4 a 8 plantas - o altura de techo comprendida entre 10 y 25 m - o situado en el primer sótano	1.3
3	- superficie del sector corta fuego comprendida entre 3.000 y 10.000 m ² - o más de 8 plantas - o altura de techo superior a 25 m - o situado en el segundo sótano más bajo	1.6
4	- superficie del sector corta fuego superior a 10.000 m ²	2.0

L = Coeficiente correspondiente al tiempo necesario para iniciar la extinción: Comprende el tiempo necesario para la entrada en acción de los bomberos y la medida en que su intervención será más o menos eficaz.

Escala de calificación	Tiempo de intervención	10'	10'-20'	20'-30'	>30'
	Distancia en línea recta	1 km	1-6 km	6-11 km	>11 km
	Bomberos				
1	Bomberos profesionales	1.0	1.1	1.3	1.5
2	Bomberos de empresa				
3	Bomberos de empresa dispuestos a intervenir siempre	1.1	1.2	1.4	1.6
4	Puesto de intervención de bomberos	1.2	1.3	1.6	1.8
5	Cuerpo local de bomberos con retén	1.3	1.4	1.7	1.9
	Cuerpo local de bomberos sin retén	1.4	1.7	1.8	2.0
	Escala de intervención	(a)	(b)	(c)	(d)

W = Coeficiente de resistencia al fuego de la construcción: Tiene en cuenta la disminución del riesgo del edificio, cuando este, presenta una estabilidad adecuada en caso de incendio. La tabla 6 indica los valores de W correspondientes a los diferentes grados de resistencia al fuego

Escala	Clase de resistencia al fuego	W	Correspondiente a una carga calorífica de (aproxim.)	
			Kgs. de madera / m ²	Mcal / m ²
1	RF 30	1.0	--	-
2	RF 30	1.3	37	148
3	RF 60	1.5	60	240
4	RF 90	1.6	80	320
5	RF 120	1.8	115	460
6	RF 180	1.9	155	620
7	RF 240	2.0	180	720

En el caso, por ejemplo, de la clase RF 90, el factor 1.6 corresponde a una carga calorífica de alrededor de 80 Kgs. de madera/m², lo que equivale a una duración del incendio de 90 minutos aproximadamente.

Ri = Coeficiente de reducción del riesgo: Teniendo plenamente en cuenta los principales factores de riesgo, se estima el riesgo máximo de incendio. Esto supone implícitamente: una gran probabilidad de incendio una propagación muy rápida de incendio el efecto total de la carga térmica

Se considera así que existe un riesgo determinado a consecuencia del número y naturaleza de los focos de ignición y de la forma en que el almacenaje inadecuado de los materiales combustibles facilita la rápida extensión del incendio.

Esto se refiere particularmente a determinadas industrias de transformación de la madera. Por el contrario encontramos en la mayor parte de casos condiciones que se pueden considerar como menos peligrosas en cuanto a las probabilidades de ignición y combustión.

Por ejemplo, acceso fácil para las fuerzas de intervención en pequeñas naves de una sola planta, o bien condiciones favorables de evacuación del calor que reducen también el riesgo. Por consiguiente esta justificado tener en cuenta estas condiciones favorables mediante un coeficiente de reducción R_i .

El establecimiento de una escala R_i , es evidentemente una cuestión de apreciación. Basándonos parcialmente en el proyecto DIN 18230, proponemos un margen comprendido entre 1 y 2. Con un factor de reducción $R_i = 2$, el riesgo del edificio disminuye a la mitad.

Consideramos como "caso normal" las condiciones existentes en edificios de habitación o en las oficinas. Es decir con los focos de ignición corrientes y una carga calorífica de 35 Kg. de madera/m². Según M.Gretener, el riesgo calculado queda reducido entonces, a 77 % para $R_i = 1.3$ Un coeficiente de reducción $R_i = 2$, deberá aplicarse, por ejemplo, a una biblioteca (libros únicamente). En realidad, en este caso, la carga calorífica es muy grande, pero los focos de ignición son pocos; además la inflamabilidad es muy débil y la combustión probablemente lenta.

La tabla 7 indica las medidas propuestas para fijar R_i Las cuatro escalas corresponden aproximadamente a las categorías de riesgos de incendio a cubrir por las instalaciones de "rociadores automáticos de agua".

Escala	Apreciación	R_i	Datos
1	Mayor que normal	1.0	- inflamabilidad facilitada por almacenaje extremadamente abierto o poco compacto de las materias combustibles - combustión previsible generalmente rápida - número de focos de ignición peligrosos mayor que normal
2	Normal	1.3	- inflamabilidad normal debida a almacenaje medianamente abierto y poco compacto de las materias combustibles - combustión previsible normal - focos de ignición habituales
3	Menor que normal	1.6	- inflamación reducida por almacenaje de una parte (25 a 50 %) de la materia combustible en recipientes incombustibles o muy difícilmente combustibles - almacenaje muy denso de los materiales combustibles - desarrollo muy rápido de un incendio poco probable - en principio el edificio es de una sola planta, de superficie inferior a 3.000 m ² - condiciones muy favorables de evacuación del calor
4	Muy pequeño	2.0	- muy débil probabilidad - en principio, probabilidad de combustión lenta (fuegos latentes)

CALCULO DEL RIESGO DEL CONTENIDO IR

Como hemos indicado, el riesgo del contenido puede considerarse como una cuestión prácticamente independiente del riesgo del edificio, en cuanto a la elección de medidas de protección complementarias. Su cálculo es mucho más sencillo que el del riesgo del edificio y está condicionado esencialmente por las consideraciones siguientes:

- En caso de incendio ¿hasta qué punto existe un peligro inmediato para las personas que se encuentren eventualmente en el edificio?

- O en el mismo caso ¿hasta qué punto existe un peligro inmediato para los bienes, bien porque presenten un gran valor, o porque sean irremplazables o particularmente sensibles a los productos de extinción?
- Y también ¿en qué medida el humo incrementa, todavía más, el peligro para las personas y los bienes?

El estudio de estos tres factores de influencia nos da la siguiente expresión:

$$IR = H \times D \times F \text{ (fórmula 2)}$$

H = Coeficiente de daño a las personas,
 D = Coeficiente de peligro para los bienes,
 F = Coeficiente de influencia del humo,

Cálculo de los diferentes factores.

Teniendo en cuenta que no hemos establecido ninguna relación directa con el riesgo del edificio, no es necesario establecer una relación directa entre los valores precitados y GR.

Por el contrario, los tres valores H, D, F deben presentar entre ellos una relación lógica. Para el peligro para las personas se ha escogido un margen comprendido entre 1 y 3 y para el humo entre 1 y 2.

H = Coeficiente de peligro para la personas: Para su determinación son importantes los siguientes puntos:

- ¿Hay normalmente personas en el edificio ?
- ¿Cuántas y por cuánto tiempo ?
- ¿Están familiarizadas con las salidas de socorro ?
- ¿Pueden salvarse por si solas en caso de incendio ?
- ¿Cómo son las salidas de socorro ?

Es evidente que los hospitales, las residencias de ancianos y las casas de maternidad representan un peligro particularmente elevado para las personas. También los hoteles, especialmente los de construcción muy antigua, pueden presentar un peligro acrecentado. Este peligro es frecuentemente, todavía mayor debido a que la señalización es insuficiente. La tabla 8 muestra los valores numéricos atribuidos.

Tabla 8 Valores del coeficiente H del peligro para las personas		
Escala	Grado de peligro	H
1	No hay peligro para las personas	1
2	Hay peligro para las personas, pero éstas no están imposibilitadas para moverse (pueden eventualmente salvarse por sí solas)	2
3	Las personas en peligro están imposibilitadas (evacuación difícil por sus propios medios)	3

D = Factor de peligro para los bienes: Hay que tener en cuenta: por una parte, la concentración de bienes y la posibilidad de reemplazarlos (bienes culturales, pérdidas que constituyen una amenaza para la existencia de la empresa. etc.) y por otra, su destructibilidad. La tabla 9 indica la clasificación.

Escala	Grado de peligro	H
1	El contenido del edificio no representa un valor considerable o es poco susceptible de ser destruido (por sectores corta fuego)	1
2	El contenido del edificio no representa un valor superior a 2.500 FrS / m ² o bien un valor total superior a 2.000.000 en el interior del sector corta fuego y es susceptible de ser destruido	2
3	La destrucción de los bienes es definitiva y su pérdida irreparable (bienes culturales); es decir, los valores destruidos no pueden ser reparados de manera rentable, o bien representan una pérdida que constituye una amenaza para la existencia de la empresa	3

F = factor correspondiente a la acción del humo: Comprende el efecto agravante del humo para las personas y los bienes. Por una parte el humo es tóxico y por consiguiente, directamente nocivo para las personas.

Por otra parte los bienes pueden resultar inutilizados sin estar en contacto con el fuego, sino simplemente por el efecto del humo o de los productos corrosivos resultantes de a combustión.

El humo puede también provocar el pánico y por consiguiente, un peligro indirecto para las personas. Además, dificulta el trabajo de los equipos de extinción, lo que en principio acrecienta también el peligro para el edificio. Pero es incuestionable que el peligro directo a las personas y los bienes es el más importante.

La evaluación de la posibilidad de los diferentes materiales puedan producir humo (Fu), productos tóxicos (Tx) o fuerte corrosión (C) durante su combustión puede obtenerse de la CEA, desde el punto de vista de la protección contra incendios. La tabla 10 muestra la clasificación.

Escala	Datos	F
1	- Sin peligro particular de humos de corrosión	1.0
2	- Más del 20 % del peso total de todos los materiales combustibles son materias que desprenden mucho humo o productos de combustión tóxicos - O bien en edificios o zonas corta fuego sin ventanas	1.5
3	- Más del 50 % del peso total de todos los materiales combustibles son materias que desprenden mucho humo o productos de combustión tóxicos - O más del 20 % del peso total de todos los materiales combustibles son materias que desprenden gases combustión corrosivos	2.0

DIAGRAMA DE MEDIDAS

Después de haber calculado los valores de GR y de IR se llevan como ordenadas y abscisas, respectivamente, al diagrama de medidas. A cada combinación de GR y IR corresponde un punto en una zona determinada del cuadro de medidas.

La división del diagrama en zonas se ha establecido de acuerdo con un gran número de experiencias relativas a la protección contra incendios de diversos riesgos. Además, el método ha sido comprobado, prácticamente, en un gran número de casos.

De acuerdo con la situación, en el diagrama, del punto correspondiente al peligro de incendio que se estudia, se atribuye al riesgo complejo, las medidas de protección contra incendios apropiadas. Solamente algunos casos (naturaleza particular) no han podido ser tratados, por este método, de manera totalmente satisfactoria.

Debemos mencionar de manera particular dos sectores:

- El primero que corresponde a los valores de GR e IR del orden de 1 o ligeramente superiores sector 1a) en el que las medidas particulares, en general, no son necesarias. Se trata de casos normales locales destinados a habitación en los que se considera el riesgo como tolerable y que no exigen, por tanto, protección suplementaria. Esto es ciertamente válido, pues las medidas de protección contra incendios, son casi siempre costosas y cuando se estudia la protección contra incendios, no debe olvidarse nunca, el aspecto financiero. En este sentido, en todo el sector 1, es decir para valores de GR e IR inferiores a 2, el montaje de una instalación de protección contra incendios es fundamentalmente una cuestión de apreciación particular.
- El otro sector a examinar especialmente se refiere a valores de GR superiores a 5. El riesgo no es entonces tolerable, no puede compensarse ni por una instalación de rociadores automáticos de agua, ni por sistema de detección de incendios. Será necesario recurrir a otras medidas, por ejemplo, aumentar la resistencia de la estructura al fuego, reducir las zonas corta fuego o mejorar el tiempo necesario para iniciar la extinción.

La fijación de las medidas de prevención está ligada, por principio a las siguientes hipótesis:

- El abastecimiento de agua está asegurado de manera satisfactoria en la zona en cuestión.
- Existe en el edificio medios de lucha contra el fuego (extintores portátiles, puestos de incendio interiores) de naturaleza y en cantidad adecuadas.
- Las instalaciones complementarias automáticas de protección contra incendio y de transmisión de la alarma serán montadas en forma que respondan a las exigencias requeridas.

No obstante, la orientación suministrada por el diagrama de medidas, no es más que una primera etapa. Será necesario examinar después, si los datos prácticos obtenidos permiten considerar de manera válida la instalación de un sistema de protección contra incendio o si por el contrario, se impone una mejora de las medidas de prevención.

Además el diagrama de medidas indica simplemente, por ejemplo: "Instalación automática de extinción" o "Pre-detección". Pero sin precisar el sistema más adecuado en cada caso.

Si se trata de un sistema automático de extinción hay que determinar cuál es el que debe emplearse: Instalación de rociadores automáticos de agua (sistema húmedo o seco), instalación de inundación total o bien instalación de extinción por CO₂.

En determinados casos será necesario considerar también los más recientes procedimientos de extinción tales como espuma, polvo seco o compuestos halogenados (si existen) y agentes extintores inertes.

En cuanto a las instalaciones de pre-detección la elección del sistema es también muy importante. Existe en efecto una gran variedad de detectores, entre otros por ejemplo, los de ionización, los de llamas, detectores ópticos de humos (de absorción y difusión). Junto a su comportamiento ante los fenómenos que acompañan al fuego, es necesario examinar las posibilidades eventuales de falsas alarmas.

Puede obtenerse la información necesaria para la elección utilizando una adecuada lista de chequeo (check list). El procedimiento detallado para la elección del sistema más apropiado, constituye un problema que no creemos necesario abordar aquí.

la extinción tampoco es, evidentemente un valor constante. Además, ¿quién podría decir con exactitud en qué proporción disminuye el riesgo de incendio cuando, por ejemplo, se subdivide en dos una zona corta fuego? ¿Para que pues una búsqueda detallada de factores que no hacen más que complicar la operación y cuya influencia está comprendida en todo caso en las usuales tolerancias de exactitud? .

Nos parece mucho más importante desarrollar un procedimiento simple, que puede ser ampliamente aplicado.

Por este procedimiento, la operación queda clara hasta el final del cálculo y permite ver la influencia de los distintos factores en el resultado obtenido.

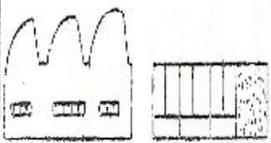
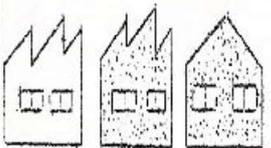
Es particularmente importante el hecho de que las instalaciones de protección contra incendios no sean introducidas en el cálculo con que su utilización solo sea recomendada en función de un riesgo determinado (edificio y contenido)

Otro objetivo principal, consiste en que el método propuesto permite a todos los observadores hablar un mismo lenguaje, es decir que partiendo de datos idénticos, deben llegar a los mismos resultados y que sus decisiones no se vean influidas ni por la emoción ni por la susceptibilidad ni mucho menos por intereses comerciales.

T A B L A VI
EDIFICIOS DE UNA SOLA PLANTA

Norma INAM 3 525

- 24 -

FRENTE LATERAL	Tipo de edificio	F	Paredes	F	Estructura portante	F	Cielo raso	F	Techo	Carga de fuego del contenido kg de madera/m ²	Si
	1	60	Hormigón/mampostería	60	Concreto Mampostería	60	Hormigón/ 90	60	Hormigón/ 90	0	3
	2	60	Hormigón/mampostería	30	Acero con protección para resistencia al fuego	30	Acero d acero y madera con protección	20-25	0,2		
	3	60	Hormigón/mampostería	<30	Acero no protegido	<30	Acero no protegido	20-25	0,2		
	4	30	Acero con protección para resistencia al fuego mezcla de ladrillo	30	Acero con protección para resistencia al fuego	30	Acero con protección	0	0		
	5	<30	Acero sin protección y relleno de ladrillo	<30	Acero	<30	Acero sin protección	0	0		

(Continuación)

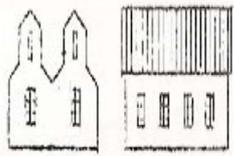
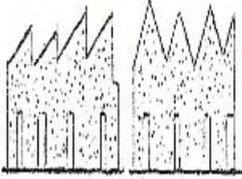
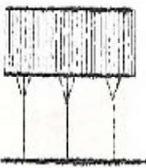
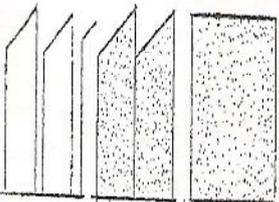
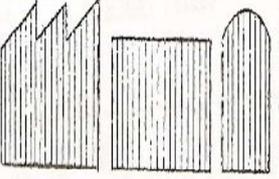
<p>PROVEE LATERAL</p>	<p>Tipo de edificio</p>	<p>Paredes</p>	<p>Estructura portante</p>	<p>Cielo raso</p>	<p>Techo</p>	<p>Carga de fuego del exterior q_{ext} (kcal/m²)</p>	<p>Q₁</p>
	<p>8</p>	<p>60 Mampolen/monopostado</p>	<p><30 Madera</p>	<p><30</p>	<p>Madera</p>	<p>65</p>	<p>0,4</p>
	<p>7</p>	<p><30 Chapa corrugada de acero, asbestos o cemento y afines</p>	<p><30 Metal (Acero, aluminio, otros) sin protección</p>	<p><30</p>	<p>Metal, (acero, aluminio, otros) sin protección</p>	<p>0</p>	<p>0</p>
	<p>5</p>	<p><30 Asbesto-cemento y afines</p>	<p><30 Madera</p>	<p><30</p>	<p>Madera</p>	<p>66</p>	<p>0,6</p>
	<p>9</p>	<p><30 Madera (Estructura entera)</p>	<p><30 Madera</p>	<p><30</p>	<p>Madera</p>	<p>46-50</p>	<p>0,4</p>
	<p>10</p>	<p>60 Madera o plástico</p>	<p>30 Madera</p>	<p>30</p>	<p>Madera</p>	<p>65</p>	<p>0,4</p>

TABLA VI
EDIFICIOS DE OCS O MAS PISOS

Norma IRAM 3 528

- 26 -

FRENTE LATERAL	Tipo de edificio	F	Paradas	F	Estructura portante	F	Ciclo raso	F	Techo	Carga de fuego del contenedor kg de madera/m ²	Qi
	11	60	Hormigón Mampostería	60 90	Concreto Mampostería	60 90	Concreto aliviado		Concreto	0	0
	12	60	Hormigón Mampostería	60 90	Concreto Mampostería	60 90	Concreto aliviado	<30	Madera con ó sin protección	5	0
	13	60	Hormigón Mampostería	30	Acero con protección para la resistencia al fuego	30	Concreto aliviado	30	Acero con protección	0	0
	14	50	Hormigón Mampostería	<30	Acero sin protección	30	Concreto aliviado	<30	Acero sin protección	0	0
	15	30	Acero con protección/Ralleno de ladrillo	30	Acero con protección	30	Concreto aliviado	30	Acero con protección	0	0
	16	<30	Acero sin protección/Ralleno de ladrillo	<30	Acero sin protección	30	Concreto aliviado	<30	Acero sin protección	0	0

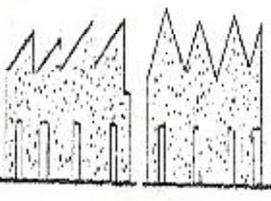
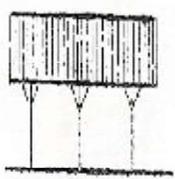
FREME LATERAL	Tipo de edificio	F	Paredes	F	Estructura portante	F	Cielo raso	F	Techo	Carga de fuego del contenido kg de madera/m ²	Q _E
	6	60	Hormigón (vacío)	<30	Madera			<30	Madera	65	0,4
	?	<30	Chapa corrugada de hierro, asbesto ó cemento y esinas	<30	Metal (Acero, aluminio, níquel) sin protección			<30	Metal, (Acero, aluminio, níquel) sin protección	0	0
	6	<30	Asbesto-cemento y esinas	<30	Madera			<30	Madera	65	0,6
	9	<30	Madera (Estructura abierta)	<30	Madera			<30	Madera	45-50	0,4
	10	60	Madera ó plástico	30	Madera			30	Madera	65	0,4

TABLA VI
EDIFICIOS DE DOS O MAS PISOS

Norma IRAM 3 328

- 25 -

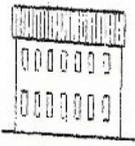
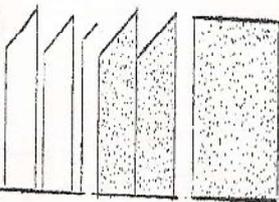
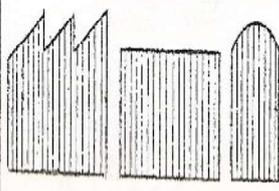
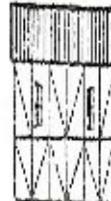
FRENTE LATERAL	Tipo de edificio	Paredes		Estructura portante		Cielo raso		Techo		Carga de fuego del continente kg de madera/m ²	Si
		F		F		F		F			
	11	60	Hormigón Mampostería	60 90	Concreto Mampostería	60 90	Concreto aliviado		Concreto	0	0
	12	60	Hormigón Mampostería	60 90	Concreto Mampostería	60 90	Concreto aliviado	<30	Madera con ó sin protección	5	0
	13	60	Hormigón Mampostería	30	Acero con protección para la resistencia al fuego	30	Concreto aliviado	30	Acero con protección	0	0
	14	60	Hormigón Mampostería	<30	Acero sin protección	30	Concreto aliviado	<30	Acero sin protección	0	0
	15	30	Acero con protección/Ralle no de ladrillo	30	Acero con protección	30	Concreto aliviado	30	Acero con protección	0	0
	16	<30	Acero sin protección/Ralle no de ladrillo	<30	Acero sin protección	30	Concreto aliviado	<30	Acero sin protección	0	0

TABLA VI
EDIFICIOS DE DOS O MÁS PISOS

Norma IRAM 3 328

- 27 -

FRENTE LATERAL	Tipo de edificio	F	Faros	F	Estructura portante	F	Cielo raso	F	Techo	Carga de fuego del contenido: kg de radars/m ²	Gi
	27	60	Hormigón Mampostería	<30	Acero, fundación, mampostería	<30	Madera	<30	Madera	65	2,2
	25	<30	Repleno de la cristal empujante raso	<30	Madera	<30	Madera	<30	Madera	65	0,4
	19	<30	Repleno de la cristal pilares de acero sin protección	<30	Madera ó acero sin protección	<30	Madera protegida o sin protección	<30	Madera	70- 75	0,6
	20	60	Hormigón Mampostería	60 (30)	Concreto ó acero con protección	60 (30)	Concreto	60 (50)	Concreto	5	0

RIESGOS DE LOS MATERIALES

Límites de inflamabilidad

Las mezclas de un combustible con un oxidante sólo pueden reaccionar si se encuentran dentro de un intervalo concreto de composiciones. Los límites de este intervalo se conocen con el nombre de límite inferior de inflamabilidad (*LFL*) y límite superior de inflamabilidad (*UFL*), y se expresan como la concentración de combustible en una determinada mezcla oxidante/diluyente y a una determinada presión y temperatura.

Fuera de estos límites, la mezcla es demasiado rica o demasiado pobre para que se pueda producir la combustión sin una aportación externa de energía.

Los límites de inflamabilidad dependen de las concentraciones de oxígeno y de gases inertes en la mezcla. A medida que disminuye la concentración de inertes y aumenta la concentración de oxígeno, aumenta el límite superior de inflamabilidad, mientras que el límite inferior prácticamente no varía.

Este último tampoco se altera con la presión (excepto con presiones muy por debajo de la presión atmosférica).

Otro parámetro que actúa sobre los límites de inflamabilidad es la temperatura. A medida que ésta aumenta, el intervalo de concentraciones entre los dos límites se amplía (Fig. 4.5).

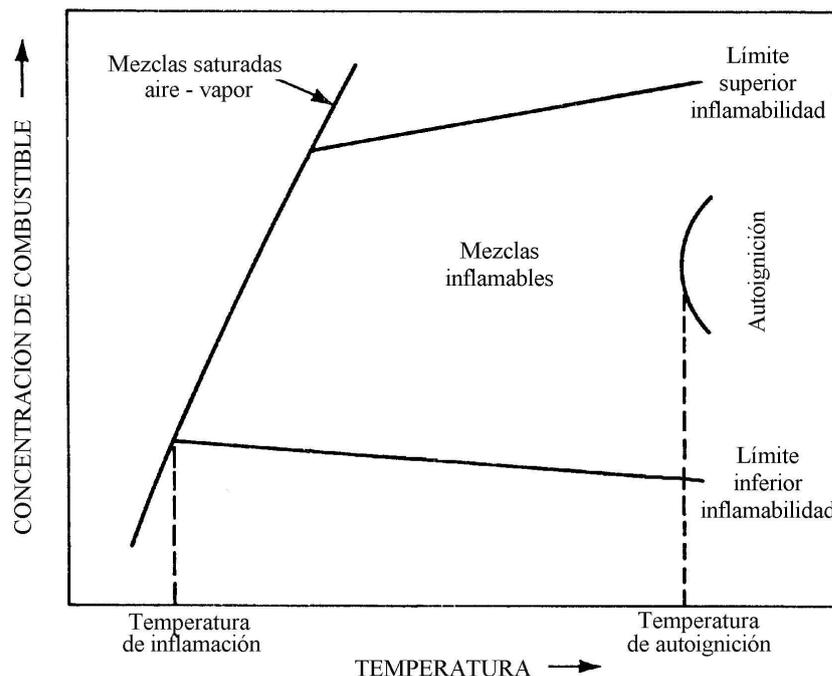


Fig. 4.5 Variación de los límites de inflamabilidad con la temperatura

Métodos para estimar los límites de inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad se determinan experimentalmente, por esta razón los valores que se obtienen dependen en gran medida del método que se haya utilizado. De todas formas, la mayoría de datos que se pueden encontrar se han determinado con el método propuesto por el U.S. Bureau of Mines [SFPE90].

El aparato que se utiliza en este método consiste en un tubo cilíndrico de 5 cm de diámetro y 1,5 m de altura, cerrado por la parte superior y abierto por debajo. Se introducen mezclas

aire/combustible de diferentes composiciones y por el extremo abierto se aplica una fuente de ignición. Entonces se observa la propagación de la llama dentro del tubo.

Si la llama sobrepasa la mitad de la altura del tubo, se considera que la mezcla está dentro de los límites de inflamabilidad. El test se suele realizar en condiciones normales de presión y temperatura. El aparato se puede utilizar también con la fuente de ignición en la parte superior y la llama propagándose hacia abajo. Pero en estas condiciones se obtiene un intervalo de inflamabilidad más reducido y por ello este método no se utiliza tanto.

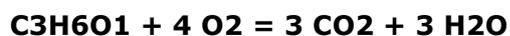
Cuando no sea posible determinar experimentalmente los límites de inflamabilidad de una sustancia, se pueden utilizar expresiones empíricas como las que se proponen a continuación, si bien a menudo pueden comportar errores importantes (véase el ejemplo 4.2):

$$LFL = 0,55 C_{\text{esteq.}} \quad (4.44)$$

$$UFL = 3,5 C_{\text{esteq.}} \quad (4.45)$$

Ejemplo

Según las ecuaciones 4.44 y 4.45, los límites inferior y superior de inflamabilidad se pueden determinar a partir de la concentración estequiométrica. Conociendo pues la estequiometría de la reacción de combustión se pueden determinar dichos límites. En el caso de la acetona (C₃H₆O₁):



Por cada mol de acetona se requieren 4 moles de oxígeno, es decir $4/0,21 = 19,05$ moles de aire. La concentración estequiométrica de acetona en aire es, pues:

$$C_{\text{est}} = \frac{1}{19,05} = 0,053$$

Según las ecuaciones 4.44 y 4.45, los límites serán:

$$\mathbf{LFL = 0,55 \cdot 0,053 = 2,9\%}$$

$$\mathbf{UFL = 3,5 \cdot 0,053 = 18,6\%}$$

Temperatura de inflamación

La temperatura de inflamación (o de destello) de una sustancia (Fig. 4.5) es la temperatura mínima a la que se produce suficiente vapor como para formar, cerca de la superficie del líquido, una mezcla con aire que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad.

A la temperatura de inflamación la mezcla arderá, pero sólo brevemente, ya que no se genera bastante vapor como para mantener la llama. En general, la Temperatura de inflamación aumenta a medida que aumenta la presión.

Hay diversos métodos experimentales normalizados para determinar la temperatura de inflamación; los resultados de cada uno son ligeramente distintos respecto a los demás.

Los dos más utilizados son los llamados de recipiente abierto y de recipiente cerrado.

En el primero, los valores de T_{fi} son ligeramente superiores. En todos los casos el procedimiento consiste en un calentamiento lento del líquido en contacto con el aire. A intervalos predeterminados se aplica una fuente de ignición y se registra el momento en el que se produce la inflamación.

Temperatura de autoignición

La temperatura de autoignición es aquella a la que una sustancia inflamable puede arder en aire sin necesidad de una fuente de ignición externa.

La temperatura de autoignición depende de muchas variables. Se ha observado que un aumento en el volumen del sistema, en la presión total de la operación o en la concentración de oxígeno disminuye el valor de T_{au} , mientras que la variación de la concentración de combustible tiene una influencia mucho más compleja.

Un hecho muy importante que debe tenerse en cuenta es si la mezcla aire/combustible está cerca de una superficie caliente. En este caso, la propia superficie o los materiales que pueda haber depositados en ella, pueden tener efectos catalíticos sobre la mezcla y hacer que la T_{au} se reduzca en 100-200 °C.

En la tabla 4.7 se dan las características de inflamabilidad más importantes de algunos de los combustibles más comunes.

Tabla 4.7 Características de inflamabilidad de algunas sustancias en aire a presión atmosférica

Substancia	LFL _{25°C} (%Vol.)	UFL _{25°C} (%Vol.)	T_{fi} (°C)	T_{au} (°C)
Acetona	2,6	13,0	-18	465
Acilonitrilo	3,0	----	-6	---
Anilina	1,2	8,3	---	615
Benceno	1,4	8,0	-11	562
N-butano	1,8	8,4	-60	405
Etano	3,0	12,4	-135	515
Etileno	2,7	36,0	---	490
Hidrógeno	4,0	75,0	---	400
N-heptano	1,05	6,7	-4	215
N-hexano	1,2	7,4	-26	225
Metano	5,0	15,0	---	540
Óxido de etileno	3,0	100,0	---	429
Propano	2,1	9,5	<-104	450

Energía de ignición

La energía de ignición es la energía que se necesita para encender una mezcla inflamable. Hay, pues, una energía mínima de ignición (MIE) necesaria para iniciar la combustión. Esta energía depende de la mezcla o del producto inflamable, de la concentración, la presión y la temperatura. Datos experimentales muestran que la MIE disminuye al aumentar la presión, que un aumento en la concentración de nitrógeno provoca un aumento de la MIE, y que los polvos en general tienen valores de MIE similares a los de los gases combustibles. A continuación (Tabla 4.8) se da una tabla con algunos valores de la MIE.

Como se puede ver en la tabla, muchos hidrocarburos tienen la MIE alrededor de 0,25 mJ. Esta energía es muy pequeña si se compara con la energía de las fuentes de ignición. A

título de ejemplo cabe citar que, caminando sobre una alfombra, la descarga estática que se produce es de 22 mJ, y que la chispa de un enchufe es de 25 mJ.

Si la temperatura de la mezcla gaseosa es suficientemente alta, la ignición se podrá producir incluso sin necesidad de una fuente de ignición: es lo que se denomina ignición espontánea. La temperatura a la que se produce la ignición espontánea es la conocida bajo el nombre de temperatura de autoignición, que ya se ha visto en el apartado 4.4.5.

Tabla 4.8 Valor de la energía mínima de ignición para algunas sustancias

Combustible	Presión (atm)	MIE (mJ)
Metano	1	0,29
Propano	1	0,26
Heptano	1	0,25
Hidrógeno	1	0,03

Incendio de un líquido

Cuando se produce un escape de un líquido inflamable se pueden generar diferentes tipos de incendio, según el tipo de escape y el lugar donde se produzca. Así pues, en este apartado se tratarán separadamente:

- los charcos de fuego al aire libre
- los charcos de fuego sobre el mar
- los incendios en movimiento.

También se podrían tratar en este apartado las bolas de fuego originadas por BLEVE de sustancias inflamables, pero atendiendo a su importancia y a sus características particulares se ha preferido tratarlas separadamente en un capítulo específico

Charcos de fuego al aire libre

Los charcos de fuego al aire libre se originan cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y en el exterior. En caso de que se produzca la ignición del líquido derramado, el tipo de fuego resultante dependerá en gran medida de si el escape es continuo o instantáneo.

Si el escape es instantáneo, el líquido se irá esparciendo hasta que encuentre una barrera o hasta que se haya consumido todo el combustible en el incendio. En caso de un escape continuo, el charco irá creciendo hasta que la velocidad de combustión iguale el caudal de vertido. De este modo se llega a un diámetro de equilibrio, que se mantiene mientras no se detiene la fuga. Por otra parte, si el líquido queda retenido dentro de algún recipiente o área protegida, como puede ser una cubeta, el incendio no dependerá tanto de si el escape es instantáneo o continuo.

En muchos de los modelos que se proponen a continuación es necesario conocer el diámetro del incendio. En caso de que el líquido haya quedado retenido en una cubeta, este diámetro será directamente el de la cubeta o, si la cubeta es rectangular, el diámetro equivalente de una cubeta circular con una área igual a la de la cubeta rectangular.

a) Geometría del incendio de un charco

Si bien hay diversos modelos que permiten determinar la radiación emitida por un incendio de charco, el más utilizado y que más desarrollado está es el llamado modelo de llama sólida. En este modelo se supone que la llama es un sólido con una forma bien definida, que se puede aproximar a un cilindro y que, además, se comporta como un emisor gris.

Así pues, para poder describir el incendio se deberá determinar el diámetro, la altura y, en caso de presencia de viento, también la inclinación y el desplazamiento.

El efecto del viento en cuanto a la radiación es relativamente poco importante para distancias largas.

Por el contrario, puede tener una gran incidencia en distancias cortas si el desplazamiento de la base del incendio provoca un contacto directo de la llama con otro equipo (por ejemplo, un depósito). En estas circunstancias, el flujo calorífico que recibe este equipo es muy superior y la situación puede agravarse considerablemente.

b) Efectos térmicos

El efecto térmico del incendio de un charco es principalmente la radiación. Cuando se habla de radiación térmica debe tenerse en cuenta tanto el emisor de esta radiación como el objeto u objetos que se encuentran expuestos a ella. Así pues, ya se ha dicho que para el incendio se tomará el modelo de cuerpo sólido, si bien al final se expone un modelo más específico para aquellos combustibles que generan mucho humo.

Cuando uno se fija, sin embargo, en cuál será el receptor, es necesario distinguir dos casos claramente diferenciados: cuando el objeto de interés se encuentra a una cierta distancia del incendio o cuando se encuentra inmerso en él. Según sea el caso, el mecanismo de transferencia de calor varía y, por lo tanto, estos dos casos se tratarán de manera diferente.

Respecto a la transferencia de calor hacia objetos alejados de las llamas, el único mecanismo de transferencia que se debe considerar es la radiación. En el modelo de cuerpo sólido se considera que únicamente las partes visibles de la llama emiten radiación. Esta consideración no comporta grandes errores, puesto que se ha comprobado experimentalmente que las partes no visibles emiten menos de un 10% de la radiación media emitida por las llamas visibles.

Charcos de fuego sobre el mar

No es difícil encontrar un escenario de este tipo: sólo hay que ver el número de accidentes ocurridos en barcos petroleros o plataformas petrolíferas. En todos estos casos, cuando se produce un vertido accidental el resultado es una mancha de combustible en la superficie del mar.

Esta mancha puede prender inmediatamente o al cabo de cierto tiempo, dependiendo de las condiciones del entorno. En este último caso hay que tener en cuenta que, a medida que el tiempo pasa, el diámetro de la mancha va creciendo mientras su grosor va disminuyendo. Se puede alcanzar de este modo un valor mínimo (que según los estudios se encuentra alrededor de 1,25 mm), en el que la ignición no es posible aunque exista una fuente de ignición.

También hay que tener en cuenta la temperatura del combustible: si no está por encima de la temperatura de inflamación, las posibilidades de que se produzca la ignición serán mínimas. En cualquier caso, de producirse la ignición, el combustible va quemando hasta que el grosor de la mancha se hace tan pequeño que, al ser tanto el calor que se pierde en

el agua, el calor restante no puede evaporar el combustible suficiente como para alimentar la llama. Experimentalmente se ha observado que este grosor se encuentra alrededor de 0,8 mm.

Normalmente, lo que sucede es que la mancha se rompe y forma otras manchas más pequeñas que aún pueden continuar ardiendo.

Incendios en movimiento

Los incendios en movimiento tienen lugar cuando un líquido inflamable se vierte sobre una superficie vertical o inclinada (como puede ser, por ejemplo, la pared de un depósito o un pavimento). Si se produce la ignición, el incendio se desplazará hacia donde se desplace el líquido. Este tipo de incendio es muy peligroso ya que en muy poco tiempo puede adquirir grandes dimensiones y abarcar zonas muy amplias dentro de una planta.

El problema es que son poco conocidos. En la bibliografía prácticamente no se encuentran referencias de autores que hayan trabajado en este tipo de incendios. No se conocen, por tanto, las diferencias que pueden existir respecto a los incendios de charcos en cuanto a velocidad de combustión, características geométricas, etc. Lo que sí se ha comprobado experimentalmente [F&W94] es que requieren caudales más grandes de agua (o espuma) para su extinción, en comparación con un incendio de características similares pero estático.

Incendio de un gas

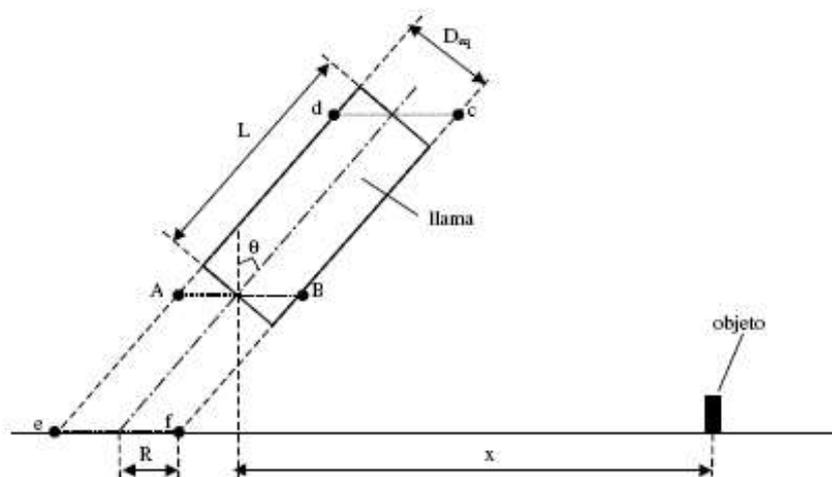
Igual que en el caso de los líquidos, cuando se produce un escape de gas o de vapor inflamable se pueden generar esencialmente dos tipos de incendio:

- incendio de un chorro de gas
- incendio de una nube de gas.

Incendio de un chorro de gas

Este tipo de incendio (*jet fire*) tiene lugar cuando se produce el vertido accidental de vapores o gases inflamables a presión, en áreas de proceso o depósitos de almacenaje. Incendios de características similares son muchas veces intencionados. Se utilizan para eliminar los gases no deseados que se generan durante la extracción del petróleo (antorchas de producción) o en refinerías y petroquímicas, para evacuar subproductos no deseados o gases emitidos a través de válvulas de seguridad (antorchas de proceso).

Prácticamente no hay diferencias entre los chorros generados de manera accidental y los intencionados. Quizá la más importante es que los chorros intencionados salen a través de una válvula y ello permite que el gas pueda alcanzar velocidades de salida supersónicas. En el caso de los chorros accidentales, el gas sale a través de un orificio de un depósito, de una tubería rota o de una brida, y esto hace que la velocidad máxima de salida del gas sea la sónica (velocidad del sonido en el gas, en las condiciones en las que se encuentra el gas a la salida).



Esquema de un dardo de gas, según una geometría cilíndrica.
Esquema útil para el cálculo de la radiación sobre un objeto

Incendio de una nube de gas

Este tipo de incendio (*flash fire*) tiene lugar cuando se produce el vertido de un gas o un vapor inflamable, de manera que se forma una nube que se va dispersando hasta que encuentra una fuente de ignición. El escape puede ser instantáneo o continuo. Estas nubes pueden estar originadas también por el vertido de un líquido que en condiciones atmosféricas experimente un *flash* o que se evapore muy rápidamente.

Es el caso del gas natural licuado y del gas licuado del petróleo: si se produce un escape se formará un charco que se evaporará rápidamente formando una nube. Este fenómeno se trata como si fuera un escape continuo de vapor a la atmósfera.

Es difícil definir el punto de transición entre explosión e incendio de una nube de vapor. En un incendio, los efectos de la presión se pueden considerar despreciables; para ello es preciso que no haya obstáculos o confinamiento que puedan acelerar el frente de la llama, cerca del punto de ignición. La llama se mueve desde el punto de ignición hacia la fuente a través de las zonas de la nube que están dentro de los límites de inflamabilidad.

Los incendios de nubes de vapor tienen una duración muy corta (de unos cuantos segundos) y esto dificulta su estudio y la obtención de datos experimentales. A continuación se dan algunas expresiones para la predicción de la geometría y de efectos como la radiación térmica. Si bien estos modelos no están completamente desarrollados y comportan algunos errores, permiten obtener un orden de magnitud de los efectos que se generan.

a) Velocidad de propagación de la llama

La velocidad de propagación de la llama depende básicamente de la velocidad del viento y de la concentración del gas. La llama se propaga a través de la nube como una pared de fuego, amarillenta por la parte inferior y más azulada en su parte superior. Esta llama nunca alcanza un estado estacionario porque la concentración dentro de la nube no es uniforme.

Experimentalmente se ha observado que la dependencia de la velocidad de propagación de la llama con la velocidad del viento es lineal. A título de ejemplo, según experimentos realizados a gran escala con gas natural licuado y propano licuado sobre el mar por la

compañía Shell en Maplin Sands [SHEL91], la velocidad media de propagación, relativa al gas no quemado, en el caso del propano es de 11-12 m/s con una velocidad del viento de 7 m/s. Para el metano, en las mismas condiciones, es de 4,5-6 m/s.

b) Geometría de la llama

Eisenberg et al. [EISE75] proponen un modelo donde se supone que el incendio tiene la forma de media elipsoide. Este modelo tiene dos parámetros geométricos característicos: el volumen, V_r , y el área que emite radiación, A_r :

c) Efectos térmicos

Dado que el incendio de una nube de vapor tiene una duración muy corta, no se tiene en consideración el efecto térmico que puede provocar sobre las estructuras que estén dentro de la nube. Se considera también que las personas que se vean directamente involucradas morirán inmediatamente, de manera que sólo se calcula el efecto que pueda tener sobre objetos que estén a una cierta distancia de la nube en el momento del incendio.

MÉTODO CHYER

Método de intervención directa para controlar un evento con gas natural por rotura o escapes en vía pública, utilizando mangueras con agua a presión "Encapsulando el riesgo" (CHYER = Cerco Hidráulico y Encapsulamiento del Riesgo), el método se centra en "cercar" el escape o "dirigirlo" hacia lugares menos comprometidos utilizando técnicas de aplicación de agua fraccionada (pantallas de agua) para evitar el ingreso de la masa gaseosa a lugares peligrosos guiándola hacia arriba hasta distancias seguras de dilución con el aire de forma tal que ya no alcance sus límites de inflamabilidad, o dirigiendo un chorro de agua cerrado en fina lluvia en forma de cono hacia el punto de escape para desviar el flujo gaseoso hacia lugares más seguros.

Nota: Éste método fue desarrollado en base a experimentaciones en laboratorio y simuladores de alta presión en el Centro de Entrenamiento Técnico de la empresa Metrogas S.A. en Llavallol, Buenos Aires, Argentina, conjuntamente con el cuerpo de Bomberos Voluntarios de Lanús partiendo de acciones operativas ideadas y supervisadas por el autor del presente, y que son actualmente utilizadas con éxito por los diferentes cuarteles de Bomberos Voluntarios, Federales y Cuerpos Profesionales en Argentina, Inglaterra y algunos países Latinoamericanos. Cabe destacar que el método permite intervenir en eventos con o sin fuego.

Boilover o borbollón

Los incendios en depósitos de almacenaje de hidrocarburos son relativamente frecuentes. Teniendo en cuenta que las cantidades almacenadas suelen ser elevadas (un único depósito puede llegar a contener del orden de 500.000 barriles), las consecuencias de este tipo de incendios pueden llegar a ser imprevisibles.

Existe una tipología muy variada de incendios que pueden afectar a los depósitos de almacenaje, pero uno de los más peligrosos, tanto por la magnitud de sus consecuencias como por su difícil predicción, es el llamado *boilover* o *slopover* (aunque algunas veces también se le llama *foamover* o *puking*), conocido también por incendio "de borbollón".

El *boilover* o borbollón puede producirse sobre todo en depósitos conteniendo mezclas de diversos hidrocarburos. Si en uno de estos depósitos se produce un incendio (que puede durar muchas horas) la capa superficial de hidrocarburo se va calentando debido a la radiación del incendio. Esta capa entra en ebullición, experimentando un proceso de destilación: los componentes más volátiles son los que pasan preferentemente a vapor, alimentando la llama. De esta forma, al irse enriqueciendo en los componentes más

pesados (de mayor temperatura de ebullición) esta capa superficial va aumentando de temperatura.

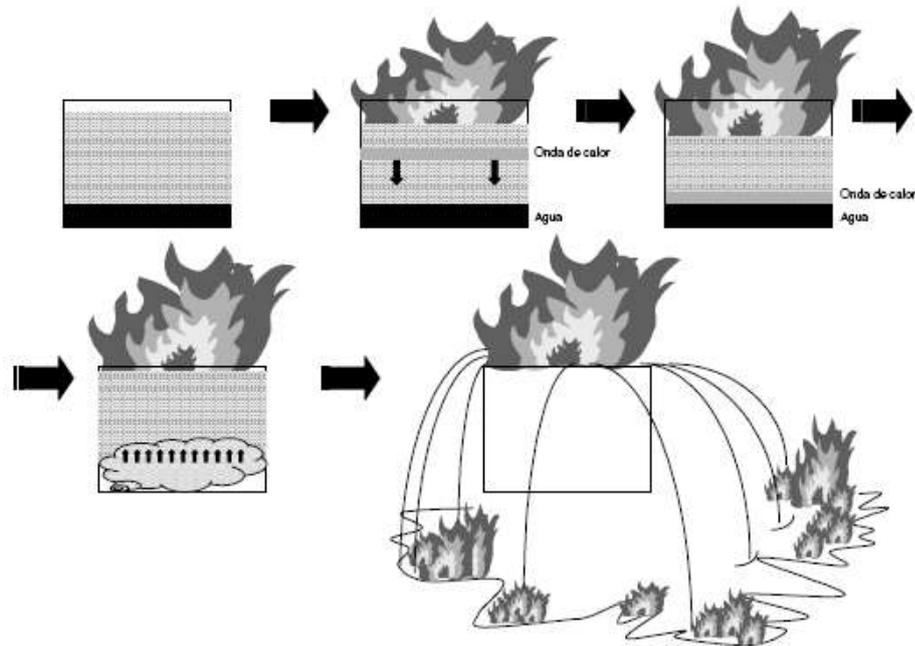


Fig. 4.12 . Representación del fenómeno de boilover

A medida que transcurre el tiempo, esta capa rica en productos pesados aumenta de espesor, progresando en profundidad; la velocidad a la que aumenta su espesor es mayor que la velocidad a la que retrocede la superficie del líquido contenido en el depósito. De esta forma una "onda de calor" se propaga hacia la parte inferior del depósito. Si el mismo contiene agua, en forma de capa acuosa o de emulsión, en algún momento esta ola de calor (a una temperatura superior a la de ebullición del agua) llegará a la capa acuosa. Esto provocará una cierta vaporización inicial del agua; la turbulencia de este fenómeno provocará la mezcla de ambas capas, con una fuerte vaporización de agua.

La generación prácticamente instantánea de una gran cantidad de vapor, con un volumen específico muy superior al del líquido, provocará una violenta erupción, con la formación de una bola de fuego y la proyección del combustible hacia el exterior. Dada la violencia del fenómeno, el combustible inflamado puede ser proyectado hasta distancias considerables.

No todos los combustibles son susceptibles de experimentar el fenómeno del *boilover*; en general éste está asociado a aquellos compuestos por una serie de componentes con una amplia gama de temperaturas de ebullición (un buen ejemplo lo constituye el crudo de petróleo). Sin embargo, también es posible (si bien es mucho menos frecuente) el *boilover* con hidrocarburos puros. En todo caso, lo que si es necesario es que la temperatura de ebullición del combustible sea superior a la del agua.

En determinadas circunstancias, es posible también que ocurra un *boilover* sin presencia de agua, aunque esto es poco frecuente. En estos casos, en una etapa inicial la capa superficial de hidrocarburo se calienta por la radiación del incendio, disminuyendo su densidad. Posteriormente, debido a la destilación, su densidad aumenta. Entretanto, la temperatura de las capas intermedias aumenta lentamente por conducción, disminuyendo su densidad. La capa superior tiene un alto contenido en compuestos de alto punto de ebullición, mientras que la inferior contiene aún fracciones más volátiles.

En un momento determinado, esta situación (existencia de una capa muy caliente y pesada sobre otra capa de menor densidad) puede conducir a una mezcla turbulenta de ambas

capas, con la vaporización instantánea del líquido de la capa inferior y la aparición de un *boilover*.

Condiciones necesarias para la existencia de *boilover*

Para que se produzca el *boilover* es necesario en general que se cumplan tres condiciones:

- a) Presencia de agua en el recipiente.
- b) Generación de una ola de calor; es decir, existencia de una amplia gama de volatilidades en los componentes presentes en el depósito.
- c) Que la viscosidad del hidrocarburo sea suficientemente elevada para dificultar el paso del vapor.

La existencia de agua dentro del recipiente puede tener distintas causas. Puede ser debida a un contenido de agua del propio hidrocarburo, puede haber penetrado en el recipiente debido a fuertes lluvias, o bien haberse condensado la humedad del aire del recipiente debido a cambios en la temperatura ambiente; finalmente, puede ser también debida al agua utilizada como refrigeración o para la extinción en caso de incendio. El agua puede encontrarse en forma de capa acuosa más pesada o bien en forma de emulsión.

En un *boilover*, la temperatura de la capa superior puede alcanzar hasta 430 K. La velocidad a la que se desplaza la onda de calor suele estar comprendida entre 0,3 m/h y 0,5 m/h, si bien en algunos casos ha alcanzado valores de hasta 1,2 m/h

Explosiones

Introducción

Para la mayoría de la gente una explosión se asocia inmediatamente a una imagen de destrucción. No obstante, la mayoría de explosiones que se llevan a cabo diariamente son controladas, como las de los motores de los vehículos, la demolición de edificios, la extracción de metales, minerales, etc. Aquí se tratarán únicamente las explosiones accidentales, no deseadas, las cuales pueden generar grandes pérdidas económicas y también en vidas humanas, principalmente en el ámbito de las industrias de proceso.

En general se puede definir una explosión como una liberación repentina de energía, que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta liberación tiene que ser, no obstante, bastante rápida y concentrada para que la onda que se genera sea audible.

No es necesario, pues, que se produzcan daños para poder considerar este fenómeno como explosión. La energía liberada puede haber sido almacenada inicialmente bajo una gran variedad de formas: nuclear, química, eléctrica o de presión.

En el contexto de este capítulo se considerarán únicamente las explosiones derivadas de los escenarios accidentales siguientes:

En espacios cerrados:

- ignición de mezclas gaseosas inflamables (en la literatura anglosajona, indicada generalmente con las siglas CVE, *confined vapor explosion*);
- ignición de polvo combustible en suspensión.

En espacios abiertos:

- ignición de nubes de vapor no confinado (en inglés UVCE, *unconfined vapor cloud explosion*).

Por explosión de recipientes:

- de gas comprimido;
- de gas licuado o líquido sobrecalentado (en inglés BLEVE, *boiling liquid expanding vapor explosion*);
- reacciones fuera de control (en inglés *runaway reactions*).

Además de analizar individualmente cada uno de estos tipos de explosiones, se proponen también algunos de los métodos más utilizados para el cálculo de las consecuencias derivadas de este fenómeno.

Detonaciones y deflagraciones

Muchas de las explosiones accidentales, aunque no todas, suelen originarse por una reacción de combustión o por reacciones exotérmicas fuera de control. Por esta razón en este capítulo se considerará, en términos generales, que la explosión va unida a uno de estos dos tipos de reacciones.

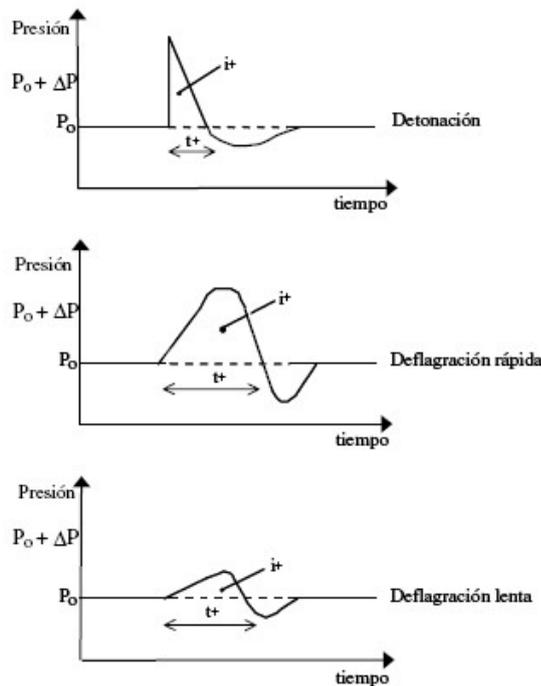


Fig. 5.1 Esquema de una onda de choque para diferentes tipos de explosión (P_0 = presión ambiente, ΔP = pico de sobrepresión, t^* = duración de la fase positiva, i^* = impulso positivo)

Las explosiones pueden ser de dos tipos: deflagraciones y detonaciones. En una deflagración, la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es subsónica; la onda de presión tiene una forma como la de la figura 5.1, con una fase positiva y una fase negativa. En una detonación, la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es supersónica; la onda de sobrepresión muestra un incremento de

la presión casi instantáneo hasta el pico de máxima presión, presenta también una fase positiva y otra negativa (Fig. 5.1).

Las detonaciones son siempre (para una determinada cantidad de energía) mucho más destructivas que las deflagraciones, ya que pueden llegar a tener picos de presión cercanos a los 20 bar, mientras que en las deflagraciones los valores máximos son de unos 8 bar.

De todas formas, también hay que tener en cuenta que es muy difícil iniciar una detonación; por contra, las deflagraciones requieren de muy poca energía (del orden de mJ) para iniciarse. En determinadas situaciones, sin embargo, una deflagración puede llegar a convertirse en detonación (por ejemplo, en el caso de un frente de llama que se propaga dentro de una tubería).

Tipos de explosiones accidentales

Explosiones de vapores confinados

Este tipo de explosiones ocurren cuando habiéndose producido un escape de un gas o de un vapor inflamable en un área confinada, el gas está dentro de los límites de inflamabilidad y encuentra un punto de ignición. Se pueden distinguir dos tipos de comportamiento en función del grado de confinamiento: uno cuando las dimensiones de la zona confinada tienen una relación $L/D = 1$ y, además, en el interior hay pocos obstáculos y divisiones.

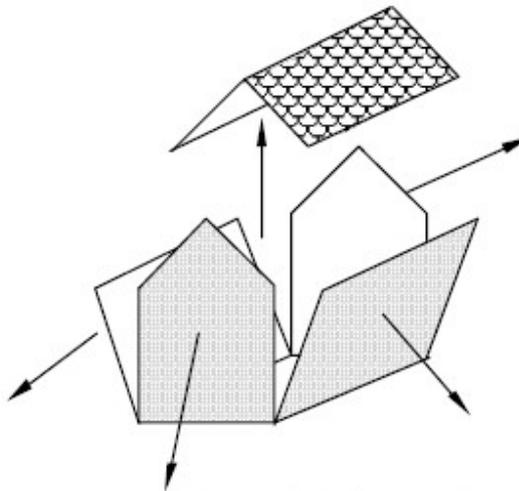


Fig. 5.2 Esquema de los efectos de la sobrepresión de una explosión en el interior de un recinto cerrado

En este caso se producirá únicamente una sobrepresión relativamente baja que, si se trata de edificios, hará saltar el tejado al mismo tiempo que las paredes del recinto se desploman hacia los lados (Fig.5.2). En caso de que el recinto que contiene el gas inflamable sea un recipiente del tipo depósito, reactor, etc., la sobrepresión hará que éste tienda hacia una forma esférica hasta que se produzca la rotura, momento en el que todo el contenido será proyectado hacia el exterior.

Estas explosiones son, en general, muy destructivas para el recinto que contenía el gas pero, en cambio, los efectos hacia el exterior son más reducidos [BAKE83].

Si el recinto donde se encuentra el gas inflamable tiene $L/D > 1$ o en su interior hay un gran número de obstáculos o divisiones, al producirse la ignición el frente de la llama puede acelerarse en los lugares donde están situados los obstáculos, pudiendo provocar detonaciones locales y que se llegue a sobrepresiones mucho mayores que en el caso

anterior. Así, los efectos finales de este tipo de explosión serán mucho más destructivos, principalmente en puntos alejados de la fuente de ignición y a causa de la proyección de fragmentos hacia el exterior del recinto.

Explosiones de nubes de vapor no confinadas

Las nubes de vapor no confinadas se generan a raíz del escape de una cantidad determinada de un vapor combustible, o bien de un líquido a partir del cual se formará el vapor; esto puede ocurrir en una planta de proceso, durante un transporte o por la rotura de un gaseoducto. En cualquier caso, una vez formada la nube, ésta puede:

- dispersarse en el aire antes de que se produzca la ignición, sin causar daños;
- prender inmediatamente e iniciar así un incendio de charco (en general, en este caso no habrá explosión y los daños ocasionados serán menores);
- dispersarse en un área extensa y producirse la ignición al cabo de un cierto tiempo, de manera que se formará una gran llamarada;
- lo mismo que en el punto anterior, pero de modo que el frente de la llama se acelera tanto que genera una onda de sobrepresión.

En [DAVE77] se puede encontrar un estudio exhaustivo sobre los accidentes registrados referidos a nubes de vapor no confinadas. En la tabla 5.1 se expone el porcentaje de accidentes ocurridos, en función de si se ha producido o no sobrepresión. Se puede observar que el porcentaje más elevado corresponde a las nubes que han tenido efectos de sobrepresión. Es importante remarcar, sin embargo, que en parte esto es debido a que, por ser los más destructivos, suelen estar mucho mejor documentados.

Tabla 5.1 Porcentaje de accidentes ocurridos con nubes de vapor no confinadas, según sus efectos

<i>Efectos generados</i>	<i>Núm. de accidentes registrados</i>	<i>Porcentaje sobre el total (%)</i>
Sobrepresión	43	64
Incendio solamente	17	25
Dispersión sin efectos	7	11

El estudio se realizó sobre 67 accidentes ocurridos entre 1940 y 1976

Las explosiones de nubes de vapor no confinadas representan uno de los mayores peligros dentro de la industria química ya que, a pesar de que los escapes tóxicos pueden, potencialmente, producir más víctimas, las primeras ocurren con mucha mayor frecuencia. Por otra parte, el problema principal de este tipo de explosiones proviene del hecho que, además del alcance que puede llegar a tener la nube, la ignición de ésta puede producirse en un punto alejado de la fuente origen del vertido y afectar a grandes áreas.

Uno de los accidentes más investigados en el que se produjo una explosión de una nube de vapor no confinada es el ocurrido en junio de 1974 en Flixborough (Inglaterra). En este accidente, la rotura de una tubería de 0,5 m de diámetro fue el origen del escape de 45 toneladas de ciclohexano que al evaporarse formó una nube de grandes dimensiones. Un punto de ignición dentro de la misma planta comenzó un frente de llama que posteriormente se aceleró formando una onda de sobrepresión que destruyó toda la planta y afectó a las casas situadas a más de 1 km alrededor. En el accidente murieron 28 personas y 89 más resultaron heridas.

Explosiones de recipientes

El origen de este tipo de explosiones puede ser muy diverso. En primer lugar, el estallido de un recipiente se puede producir simplemente porque tenga algún defecto de construcción o

bien porque haya una pérdida de resistencia a causa de la corrosión; estos casos son muy poco frecuentes pero pueden ser particularmente peligrosos si el contenido del recipiente es inflamable.

Otro caso sería cuando el recipiente se calienta desde el exterior (a causa de un incendio o por cualquier otra razón), de manera que la presión en el interior va aumentando mientras el recipiente va perdiendo también resistencia por el aumento de temperatura, hasta que se produce la rotura.

También se encuentran dentro de este tipo de explosiones las originadas por reacciones fuera de control (*runaway reactions*) y los BLEVE, como se verá más adelante.

Finalmente, entrarían también en este apartado las explosiones originadas en sistemas de aire comprimido. En algunos casos, parte del aceite utilizado para lubricar el compresor pasa a la tubería de aire comprimido donde forma una película en su interior. Temperaturas elevadas del aire a la salida del compresor (> 250°C) pueden vaporizar este aceite y provocar su ignición. A menudo el resultado de la ignición será un incendio, pero éste puede derivar hacia una explosión con las características propias de una detonación.

Explosión por ignición de polvo combustible en suspensión

En principio, cualquier producto sólido que sea combustible en aire puede experimentar este tipo de explosión, siempre y cuando se encuentre dividido en partículas lo suficientemente pequeñas y esté en suspensión en una cantidad de aire lo bastante grande, como para que cada partícula tenga espacio suficiente para arder libremente. En [ECKH91] se dan como referencia dimensiones de partícula del orden de 0,1 mm o menores, cuanto más pequeñas sean, más fácil será su ignición y más violenta la explosión. Sólidos aparentemente tan inofensivos como la harina o el polvo de aspirina han originado explosiones muy destructivas.

En algunos casos las partículas metálicas pueden reaccionar con otros gases, pero lo más frecuente es que la reacción tenga lugar con oxígeno. Únicamente aquellos materiales que son estables en oxígeno no experimentan este tipo de fenómeno; es el caso del polvo de silicatos, sulfatos, nitratos, carbonatos y fosfatos, como pueden ser el cemento portland, la arena, etc. Ejemplos de materiales que pueden experimentar este fenómeno son: cereales, lino, fibras, azúcar, plásticos, pigmentos orgánicos, pesticidas, carbón y metales como el aluminio, el magnesio, el zinc, el hierro, etc.

Es interesante remarcar las diferencias en la distribución de porcentajes de un país a otro debidas básicamente al tipo de industria predominante en cada uno de ellos, pero también al hecho de que unos corresponden a la primera mitad de siglo mientras que los otros corresponden a la segunda mitad. En la tabla 5.4 se puede ver qué equipo es el más afectado por estas explosiones.

Tabla 5.3 Explosiones de nubes de polvo ocurridas en Alemania y en los Estados Unidos, en función del tipo de material involucrado

Tipos de polvo	Estados Unidos 1900 - 1956		Alemania 1965-1980	
	núm.	%	núm.	%
Madera	162	14,5	113	31,6
Alimentos	577	51,4	88	24,7
Metales	80	7,1	47	13,2
Plásticos	61	5,4	46	12,9
Carbón	63	5,6	33	9,2
Papel	9	0,8	7	2,0
Otros	171	15,2	23	6,4
Total	1123	100,0	676	100,0

Se puede comprobar como los sistemas que trabajan directamente con materiales en forma de polvo presentan los porcentajes más elevados de accidentes.

Tabla 5.4 Tipos de equipos afectados por explosiones de nubes de polvo. Datos correspondientes a Alemania durante el periodo 1965-1985

<i>Tipo de equipo</i>	<i>núm. de accidentes</i>	<i>% sobre el total</i>
Silos	86	20,2
Sistemas de captación de polvo	73	17,2
Plantas de molturación	56	13,0
Sistemas de transporte	43	10,1
Secadores	34	8,0
Hornos	23	5,4
Plantas de mezcla	20	4,7
Pulidoras	19	4,5
Tamices	12	2,8
Otros	60	14,1
Total	426	100,0

Para que se produzca la explosión de una nube de polvo es necesario, como ya se ha señalado, que el polvo sea combustible, que las partículas tengan unas dimensiones y una distribución adecuadas para la combustión y que exista suficiente oxígeno para que la misma se mantenga; pero, principalmente, es necesario que exista una fuente de ignición con energía suficiente para iniciar la reacción.

En general, las llamas, las chispas eléctricas o las debidas a la fricción o a herramientas de corte y soldadura, la electricidad estática y las superficies calientes pueden provocar la ignición.

Un hecho importante que hay que tener en cuenta es que las concentraciones que marcan los límites de explosividad en una nube de polvo, si bien dependen en parte del tipo del material, son en general muy elevadas. Como referencia, el límite inferior puede estar entre 50-100 g/m³ y el límite superior cercano a los 2-3 kg/m³. Para dar una idea de lo que esto representa, una nube que contuviera 40 g/m³ de polvo de carbón dejaría ver con mucha dificultad una luz situada a 2 m del punto donde estuviera el observador.

Este hecho es interesante ya que una nube con concentraciones muy por debajo del límite inferior de explosividad es fácilmente detectable puesto que resulta muy molesta para el hombre.

Normalmente las explosiones de nubes de polvo grandes comienzan por pequeñas explosiones en el interior de los equipos de proceso; cuando éstos estallan, provocan turbulencia y mezcla de más polvo con el aire, originando otra explosión de dimensiones mucho mayores y con efectos altamente destructivos.

BLEVES

Introducción

Las explosiones de tipo BLEVE son uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte de mercancías peligrosas. Desde un punto de vista riguroso, como se verá más adelante, estas explosiones no siempre tienen efectos térmicos. No obstante, en la mayoría de los casos reales la substancia involucrada es combustible; esto provoca que la explosión sea seguida por la formación de una bola de fuego, de efectos muy graves. En realidad, cuando se habla de BLEVE, en general a lo que se hace referencia

realmente es a la combinación de los fenómenos BLEVE-bola de fuego, esto es, a un accidente que involucra simultáneamente efectos térmicos y mecánicos.

La BLEVE es un accidente que sucede con cierta periodicidad: las sustancias que lo pueden producir (butano, propano, cloruro de vinilo, cloro, etc.) son relativamente comunes en la industria, y abundan las instalaciones susceptibles de sufrirlo (depósitos, cisternas). Por otra parte, de vez en cuando sucede durante el transporte, ya sea por carretera o por tren, con las connotaciones especiales que esto conlleva.

El origen puede ser diverso (reacción fuera de control, colisión, etc.), pero una de las causas más frecuentes es la acción del fuego sobre un recipiente. En la tabla 6.1 [PRUG91] se muestra una lista con una breve información de los BLEVE más notorios ocurridos en todo el mundo entre 1926 y 1986. Como puede observarse, en muchos de ellos ha habido víctimas mortales, a veces en un número muy elevado. Otra fuente [LOND95] cita 900 personas muertas y unas 9.000 heridas en 77 BLEVE ocurridos entre 1941 y 1990.

Desde que la palabra BLEVE, formada por las iniciales de *boiling liquid expanding vapor explosión* (explosión del vapor en expansión de un líquido hirviendo) fue utilizada por primera vez por Smith, Marsh y Walls el año 1957 [WALL58], muchos autores han tratado este tipo de accidente. Una parte importante de ellos se han dedicado a describir el fenómeno. Otros han analizado casos concretos y unos cuantos han propuesto expresiones matemáticas para estimar sus efectos.

Por la complejidad de este fenómeno, que tiene al mismo tiempo características de explosión y de incendio, es oportuno dedicarle específicamente un capítulo. En el mismo se hace una descripción de las características principales de estos accidentes y de sus aspectos fundamentales, y también se presenta una metodología práctica para la estimación de sus efectos.

Descripción del fenómeno

Si un recipiente que contiene un líquido a presión es calentado (por ejemplo, por la radiación procedente de un incendio) la presión en su interior irá en aumento. Llegará un momento en el que las paredes no podrán resistir la elevada tensión a la que están sometidas y cederán. Esto sucederá principalmente en la parte superior del recipiente, donde la pared al no estar bañada por el líquido no estará refrigerada, de este modo aumentará su temperatura y disminuirá su resistencia mecánica. En cambio, la parte del recipiente situada por debajo del nivel del líquido que contiene transmitirá el calor recibido al líquido, por lo que se calentará mucho menos que la parte superior. En caso de abertura de una válvula de seguridad, la ebullición del líquido implicará una refrigeración aún mayor de esta superficie, debido al calor de vaporización.

La despresurización súbita del líquido hará que éste se encuentre a una temperatura superior a la que le correspondería en la curva de saturación P-T para la nueva presión. El líquido que se encuentra en estas condiciones de inestabilidad se define como "líquido sobrecalentado". Si su temperatura en el momento de la despresurización es superior a una temperatura denominada "temperatura límite de sobrecalentamiento" (que será distinta para cada producto), se producirá una vaporización instantánea y brutal de una parte del mismo, que será vertido al exterior en forma de mezcla bifásica líquido/vapor. El incremento extraordinario de volumen que experimenta un líquido al vaporizarse, que es de unas 1.700 veces en el caso del agua y de unas 250 veces en el caso del propano, más la expansión del vapor preexistente, provocarán una onda de presión (explosión, estallido del depósito), así como la rotura del recipiente en varios pedazos que serán lanzados a una distancia considerable.

Si la sustancia contenida inicialmente en el recipiente no es combustible, la onda de sobrepresión y la proyección de fragmentos serán los únicos efectos de la explosión. Este

sería el caso de la explosión de una caldera de vapor que contuviera, evidentemente, agua (como se verá más adelante, de hecho, y estrictamente hablando, para que sea una explosión BLEVE la presión dentro de la caldera debería tener un valor mínimo).

En cambio, si la sustancia contenida en el recipiente es combustible, como suele suceder en la industria química (por ejemplo, gas de petróleo licuado como el etileno o el propano), la masa de líquido y vapor vertida en el momento de la explosión se incendiará, y dará lugar a una hoguera de forma aproximadamente hemisférica que se extenderá inicialmente a ras de suelo. El efecto de la radiación térmica en esta primera fase (muy corta, ya que suele durar sólo un par de segundos), si bien ha sido menospreciada por algún autor, es muy importante.

Esta masa de combustible sólo puede arder en superficie, porque su interior, muy rico en combustible (hay que tener en cuenta la presencia de la fase líquida arrastrada en el proceso de vaporización instantánea) y prácticamente sin aire, se encuentra fuera de los límites de inflamabilidad.

En realidad, no todo el combustible presente en el recipiente en el momento de la explosión forma parte de esta hoguera. Una parte del mismo puede ser arrastrada por la estela formada por los fragmentos del depósito que salen disparados. En un caso (Ciudad de México, 1984) se ha sugerido que parte del combustible había sido proyectado hasta distancias considerables sin inflamarse, y posteriormente se incendió y provocó incendios y explosiones locales en las viviendas de los alrededores; este efecto, sin embargo, no se ha observado en ningún otro accidente. Todo esto afecta, evidentemente, a la cantidad de combustible que queda disponible para alimentar la bola de fuego y, por tanto, afecta también a sus dimensiones y a su duración.

Posteriormente, la turbulencia del incendio provoca que vaya entrando aire dentro de la masa de combustible. Simultáneamente, la radiación procedente de la combustión va evaporando las gotas de líquido y calentando el conjunto. Como resultado de todo este proceso, la masa en ignición va aumentando su volumen de forma turbulenta (se han propuesto valores del orden de 1 m/s para la velocidad de crecimiento del diámetro) [LIHO82], adquiriendo una forma más o menos esférica, y va ascendiendo, dejando una estela de diámetro variable semejante en la forma a la de la típica "seta" de una explosión nuclear (Fig. 6.1). Las dimensiones de las bolas de fuego formadas de este modo pueden ser extraordinariamente grandes, con un desprendimiento de radiación térmica fortísimo. La acción de la combinación BLEVE-bola de fuego puede sintetizarse, pues, en los efectos siguientes:

- radiación térmica,
- onda de sobrepresión,
- fragmentos despedidos por la explosión,
- lluvia eventual de combustible en los alrededores (citada sólo en un caso).

Estos efectos han sido enumerados siguiendo aproximadamente un orden de mayor a menor gravedad respecto a sus consecuencias. Es necesario aclarar, sin embargo, que este orden es difícil de establecer, dada la distinta forma de actuar de las diferentes acciones: puntual o por lo menos muy direccional en el caso de los fragmentos, radial barriando toda el área en el caso de la onda de sobrepresión y de la radiación térmica.

Es importante resaltar la imprevisibilidad que presenta el momento en el que se producirá la explosión. Hace algunos años, se consideraba que desde el comienzo de la emergencia (por ejemplo, desde el inicio de un incendio que afectaba a un depósito) se requería de un tiempo determinado para que se produjera la explosión. Se creía, por tanto, que existía la posibilidad de tomar determinadas medidas (por ejemplo, que los bomberos refrigerasen con mangueras). No obstante, a medida que se ha ido acumulando información sobre los BLEVE se ha visto que este tiempo podía ser extraordinariamente corto; en el accidente de

San Juan Ixhuatepec (Ciudad de México) el tiempo transcurrido entre la primera explosión, que originó distintos incendios y la primera BLEVE fue sólo de 69 s (las dos explosiones fueron registradas por un sismógrafo).

El tiempo a partir del cual puede ocurrir un BLEVE en un recipiente afectado por un incendio depende de los siguientes factores:

- a) flujo calorífico del incendio, que será función de la distancia al fuego del recipiente afectado, de si hay contacto directo con las llamas y del tipo de llamas (llamas turbulentas, de antorcha, etc.)
- b) radio de la esfera o del cilindro que forma el recipiente
- c) grado de llenado del recipiente
- d) capacidad de alivio de las válvulas de seguridad
- e) espesor de la capa de producto ignífugo aplicado como protección pasiva.

Teóricamente, un recipiente ignífugo debería poder aguantar el efecto de las llamas de un incendio de balsa (flujo calorífico del orden de 100 kW m^{-2}) durante unas 2 h. Si se trata de un dardo de fuego, el flujo calorífico aumenta considerablemente (pasa a ser de unos 350 kW m^{-2}). En estas condiciones se han registrado BLEVE en los primeros 8 minutos.

Para el desarrollo de este tipo de accidentes se han propuesto [NAZA88] los tiempos siguientes: contacto directo con dardos de fuego, 5 min, contacto directo con llamas turbulentas, 30 min (este valor coincide con el citado por ciertas normas de intervención de reconocido prestigio [ASTM83], que fijan el tiempo en 20-30 min).

Aunque este tiempo puede variar en función de las características de la instalación (existencia de aislamiento térmico, refrigeración, etc.), es evidente que otros factores pueden contribuir a reducirlo aún más (impactos o daños debidos a ondas de sobrepresión, por ejemplo); lo más prudente, pues, en estas circunstancias, es tener presente que la explosión puede producirse en cualquier momento y evacuar rápidamente la zona.

Condiciones para la existencia de BLEVE

Sobrecalentamiento y despresurización

Si bien la explosión de un recipiente que contenga un líquido inflamable a presión casi siempre provocará una bola de fuego, no siempre se puede hablar rigurosamente de explosión BLEVE. Para que la explosión sea de este tipo, con la violencia extraordinaria que la caracteriza y que es la que provoca que los fragmentos puedan alcanzar distancias considerables, se tienen que cumplir unas determinadas condiciones:

- ***Sobrecalentamiento*** considerable del líquido, de forma que el mismo esté a una temperatura superior a su temperatura límite de sobrecalentamiento. Esta condición la cumplen la mayoría de los gases licuados (GLP, amoníaco, cloro). Por otra parte, también pueden cumplirla líquidos contenidos en recipientes cerrados que se ven sometidos a un calentamiento anómalo, por ejemplo, por la radiación de un incendio; y, como ya se ha dicho anteriormente, también la cumple el agua a presión en el interior de una caldera. En todo caso, para la existencia de BLEVE en sentido estricto es necesario un valor mínimo de este sobrecalentamiento.

- ***Despresurización súbita***, de forma que se reduzca instantáneamente la presión a la que se encuentra toda la masa de líquido contenida en el recipiente.

Un fenómeno de este tipo suele comportar, en caso de accidente, la rotura del depósito, ya sea por el incremento excesivo de la presión interior y, simultáneamente, por el calentamiento excesivo de las paredes a causa de un incendio, o ya sea por un impacto. Sea cual sea la razón, la sustancia contenida en el recipiente pasa en un instante desde la

presión a la que estaba almacenada (extraordinariamente alta si el recipiente había estado sometido a la acción de un incendio) a la presión para la que la vertical trazada por el punto de equilibrio en la curva P-T en la que se encontraba el líquido, corta a la recta límite de sobrecalentamiento (que se define en los párrafos siguientes).

Cuando se dan las dos condiciones anteriores se produce una vaporización casi instantánea con formación de núcleos de vaporización en toda la masa (nucleación homogénea). Se ha sugerido la formación de "un millón de núcleos de ebullición por milímetro cúbico y milisegundo". En estas condiciones, la velocidad de incremento del volumen es extraordinaria y la violencia de la explosión es muy elevada. Éste es, estrictamente hablando, el fenómeno asociado a la explosión BLEVE.

Estimación de los efectos

Radiación térmica

El impacto más importante de una explosión BLEVE que involucre a una sustancia inflamable es el debido a su intensa radiación térmica. La energía térmica es liberada en un período de tiempo relativamente corto, del orden de hasta 40 s; el fenómeno se caracteriza por una radiación intensa ya desde su inicio, de manera que no permite la huida de las personas que se encuentran en los alrededores (que, por otra parte, habrán sufrido también los efectos de la explosión mecánica).

Los parámetros que se deben evaluar para la predicción del peligro originado por una bola de fuego son su diámetro, su duración y la radiación térmica en puntos concretos

Energía liberada en el estallido

Cuando un recipiente a presión experimenta una explosión BLEVE se libera la energía que contiene (obsérvese que las unidades de la presión son energía por unidad de volumen). El incremento repentino de volumen que experimenta la sustancia contenida en el recipiente tiene dos contribuciones: la del vapor existente en el interior del recipiente en el momento de la explosión y la del líquido sobrecalentado que, al encontrarse bruscamente a presión atmosférica, experimenta una vaporización parcial prácticamente instantánea (*flash*).

La energía generada en una explosión BLEVE se distribuye esencialmente en los siguientes cuatro apartados:

- la energía de la onda de presión;
- la energía cinética de los fragmentos;
- la energía potencial de los fragmentos (energía plástica de deformación que los fragmentos han absorbido);
- el calentamiento del entorno.

La distribución relativa de la energía variará en función de las condiciones particulares de la explosión. Por ello resulta muy difícil determinar con exactitud la cantidad de energía que contribuirá a la onda de presión [CAPD94]. Se ha sugerido que en caso de una rotura frágil del recipiente, el 80% de la energía liberada se convierte en onda de presión, mientras que en caso de una rotura dúctil, de la que resultan proyectadas grandes secciones del depósito, la energía de la onda de presión es sólo del 40% respecto al total. En ambos casos, el resto de la energía se convierte en energía cinética de los fragmentos, ya que la contribución de los otros dos conceptos es casi despreciable.

En realidad, los materiales con los que están contruidos la mayoría de los depósitos o recipientes son dúctiles en condiciones normales de trabajo. La rotura frágil sólo se da en

circunstancias especiales, cuando la tensión a la que es sometido el material es muy superior a su límite plástico, y esto sólo llega a ocurrir en el caso del acero revenido y del vidrio. Las explosiones BLEVE suelen ser, pues, roturas dúctiles.

Onda de sobrepresión

El valor de la sobrepresión generada por la explosión se puede estimar a partir de la masa de TNT equivalente. Esto implica una relativa imprecisión a causa de que en la explosión BLEVE de un recipiente, la energía es liberada a una velocidad menor que en una explosión de TNT, y principalmente, porque el volumen del recipiente es comparativamente mucho más grande que el que ocuparía una cantidad equivalente de un explosivo convencional. Pese a estas distorsiones, este método es simple y permite efectuar estimaciones útiles.

Debido a que el volumen ocupado inicialmente por la energía que se libera en la explosión es mucho más elevado que el que ocuparía la masa equivalente de TNT, se debe realizar una corrección en la distancia desde el centro de la explosión hasta el lugar del que se quiere saber la sobrepresión.

Fragmentos proyectados

Los fragmentos lanzados por la energía de la explosión tienen una acción restringida y direccional, pero con un alcance mayor (en lo que se refiere a capacidad destructiva) que el de la onda de presión y que el de los efectos térmicos de la bola de fuego. Hay que tener en cuenta que en su trayectoria pueden provocar un efecto dominó y destruir otros depósitos o equipos: la velocidad requerida para que un fragmento pueda penetrar en un depósito o recipiente similar es del orden de 4-12 m s⁻¹, y la velocidad máxima que pueden alcanzar los fragmentos de una explosión BLEVE (función de las condiciones de la explosión, del volumen de vapor inicialmente contenido en el depósito y de la forma del mismo) es del orden de 150-200 m s⁻¹.

El número de fragmentos y su distribución en el espacio dependen del tipo de rotura que experimenta el recipiente y de la forma del mismo. El mecanismo por el que se propaga la grieta y la velocidad de propagación son factores importantes. Las grietas en fracturas frágiles se propagan rápidamente y tienen tendencia a ramificarse, de forma que se pueden generar muchas fracturas en el mismo recipiente con una gran cantidad de fragmentos.

En cambio, las grietas en fracturas dúctiles se propagan a velocidades menores y no se ramifican; el recipiente se parte en una cantidad relativamente pequeña de fragmentos, a menudo entre 2 y 15. En el caso más típico de BLEVE (un recipiente sometido a la acción de las llamas) la rotura será generalmente dúctil.

En caso de recipientes cilíndricos, la grieta inicial tiende a seguir en dirección axial, normal al esfuerzo tangencial. Para que se produzcan "misiles" la fractura axial tiene que cambiar de dirección para propagarse en circunferencia, rodeando el recipiente, y finalmente romperlo en dos partes, el fondo y el resto.

Los análisis de numerosos accidentes han mostrado que se forma un misil de la parte del fondo del recipiente incluso en aquellos casos en los que la rotura es frágil, ya que en este tipo de recipientes siempre se acaba formando una grieta circunferencial. En cualquier caso, la probabilidad de que se produzca una proyección de fragmentos es muy elevada.

La tabla 6.7 muestra el resultado de un análisis efectuado sobre una muestra de 130 BLEVE, ocurridos mayoritariamente en recipientes cilíndricos horizontales de almacenamiento o de transporte.

En cuanto al número de fragmentos en este tipo de recipiente, lo más corriente es que sean 2 o 3. Si se producen 2, suele tratarse del fondo y el resto del recipiente. Si se forman tres

fragmentos, pueden proceder de dos tipos de rotura distintos. El depósito se puede dividir en dos: el fondo y la parte central (es el caso de un cilindro con el fondo soldado a la parte central); o bien puede experimentar un primer fraccionamiento en dos partes y un nuevo fraccionamiento de una de ellas (la que no es el fondo) por la línea imaginaria que separa los espacios de vapor y de líquido (Fig. 6.3). El fondo suele romperse por la soldadura; si no hay soldadura, es de suponer que se romperá a una distancia del extremo del 10% de la longitud total del recipiente.



Figura 6.3 Esquema de las roturas más habituales de un recipiente cilíndrico

Respecto a la dirección, lo más probable es que los fragmentos salgan proyectados en la dirección del eje del cilindro. Datos recogidos en 15 accidentes [HOLD85] así lo confirman; considerando sectores de 45° a lado y lado del eje del cilindro. En principio, la proyección del fondo debería tener la misma probabilidad por ambos lados; de todas maneras, es más probable que se produzca por el lado donde incide con más intensidad la llama del incendio, si bien también puede depender de la construcción del recipiente. Finalmente, la trayectoria de los fragmentos de depósitos cilíndricos es mayor que la de recipientes esféricos.

Tradicionalmente se consideraba que podían alcanzar unos 500 m como máximo, pero en el accidente de Ciudad de México un fragmento de depósito cilíndrico alcanzó los 1.100 m. Ésta es, pues, la distancia que se debe respetar en emergencias, donde la distancia aconsejable de evacuación será de unos 1.100 m.

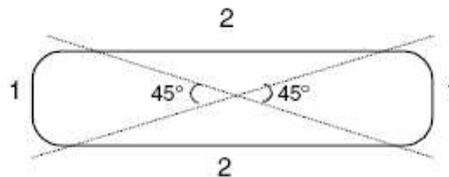


Fig. 6.4 Esquema direccional de la distribución de los fragmentos de un recipiente cilíndrico

En el caso de recipientes esféricos, la cantidad de fragmentos es mucho más difícil de predecir. Un estudio basado en un número relativamente pequeño de casos reales [PIET85] da una media de 8,3 fragmentos por accidente, pero con una cierta tendencia a que se produzcan más fragmentos cuanto mayor sea el depósito.

En cuanto a la dirección, es prácticamente imprevisible. El estudio de algunos casos muestra que la distribución no es simétrica, como cabría esperar por la forma del recipiente; esto debe atribuirse probablemente a la posición particular del contacto entre la llama y el recipiente en cada caso, y también pueden influir detalles de tipo constructivo.

Finalmente, respecto al alcance, un estudio llevado a cabo sobre 58 fragmentos procedentes de 7 accidentes mostró que un 70% de los fragmentos alcanzaron distancias inferiores a 200 m. No obstante, fragmentos de recipientes esféricos han alcanzado distancias de 600 m (Ciudad de México) e incluso de 700 m. La distancia recorrida es normalmente inferior que en el caso de fragmentos de recipientes cilíndricos, ya que la forma de estos suele ser más aerodinámica. Han sido propuestos modelos teóricos para la predicción del alcance de los

fragmentos, pero en la práctica resultan poco útiles ya que para aplicarlos se tiene que saber la masa y la forma del fragmento.

Medidas de prevención

Si se produce una emergencia que puede conducir a un accidente del tipo BLEVE-bola de fuego, resulta muy difícil improvisar acciones adecuadas para controlar la situación; cualquier actuación que requiera la presencia humana será muy arriesgada, porque no se puede prever en qué momento se producirá la explosión. Las acciones deben ser, pues, preventivas, y tienen que tomarse a priori [BEST91]. El riesgo de BLEVE se puede reducir a niveles tolerables si se adoptan una serie de medidas que se comentan brevemente a continuación.

- **Terreno en pendiente.** Cualquier escape de líquido (por ejemplo, gas licuado de petróleo) tiene que poder ser retirado inmediatamente de la zona adyacente al tanque que se quiere proteger. Para ello es necesario que el terreno donde está situado el depósito sea liso y tenga una pendiente del orden del 2,5% (como mínimo 1,5%); un sistema de drenaje tiene que conducir el líquido hacia una cuba de retención situada a suficiente distancia como para que, si se incendia, las llamas no logren alcanzar el tanque (habría que recordar aquí que las llamas pueden llegar a tener una inclinación de 45% y que su longitud puede llegar a ser de aproximadamente dos veces el diámetro de la cubeta) [KLET77].

- **Aislamiento térmico.** El recubrimiento exterior de las paredes del depósito con un producto resistente al fuego y de baja conductividad térmica (por ejemplo, hormigones especiales, fibra de vidrio o pinturas intumescentes) retrasa notablemente el calentamiento del material y, por consiguiente, el aumento de la presión dentro del recipiente en los casos en los que éste se ve sometido a la acción de un incendio.

Por otra parte, en emergencias persistentes, el aislamiento reduce la cantidad de calor que entra en el sistema y permite que la válvula de seguridad pueda evitar la explosión. Hay que tener en cuenta que las válvulas de seguridad no se diseñan para afrontar (por sí mismas) este tipo de emergencias ya que la sección de paso que se requeriría sería excesiva.

Hay que tener en cuenta, en todo caso, que el aislamiento térmico debe ser sólo un complemento, y que se tienen que prever, además, otros sistemas (como por ejemplo, la refrigeración del depósito). Es importante también aislar los elementos estructurales (pilares o patas de soporte) para evitar que, al calentarse excesivamente por el fuego, pierdan resistencia mecánica y cedan, provocando la caída del depósito (esto es lo que ocurrió con las dos esferas más grandes sometidas al fuego en el accidente de Ciudad de México; si bien cayeron, sorprendentemente no llegaron a explotar).

El aislamiento tiene que ser instalado de manera que garantice su integridad en caso de incendio y que permita una inspección periódica del estado de la superficie del depósito y de los elementos estructurales.

- **Refrigeración con agua.** La utilidad de los surtidores de agua en la protección de recipientes sometidos a la acción directa del fuego ha sido demostrada durante más de cincuenta años. Es importante que el agua sea utilizada desde los primeros momentos y que una película con un mínimo grosor cubra totalmente la superficie del recipiente (especialmente las zonas en las que hay un contacto directo con la llama), con el fin de evitar la aparición de áreas calientes.

El caudal de agua requerido se tiene que mantener constante (y evitar que, como ha pasado más de una vez, la intervención de los bomberos y el consiguiente incremento del consumo de agua reduzca la presión en la red y el caudal) con unos valores mínimos, que dependen de las circunstancias. El criterio más general es que reducir el caudal de agua por

debajo de $7,5 \text{ l m}^{-2}\text{min}^{-1}$ es peligroso si hay contacto directo con la llama, ya que pueden aparecer áreas calientes; se ha recomendado, como criterio universal, un caudal de $10 \text{ l m}^{-2}\text{min}^{-1}$ [MADD89]; si sólo se produce el efecto de la radiación (sin contacto con la llama) se pueden aplicar caudales más pequeños.

En caso de contacto directo de la llama con la superficie, el flujo calorífico variará con el tipo de llama (para un incendio de balsa puede ser del orden de 100 kW m^{-2} , mientras que para una llama altamente turbulenta puede llegar a ser del orden de 350 kW m^{-2}). En esta situación, para la superficie que queda por encima del nivel del líquido contenido en el depósito se pueden requerir caudales de más de $25 \text{ l min}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Un aspecto que se debe tener en cuenta es que todos los elementos de seguridad (válvulas, tuberías, etc.) tienen que ser resistentes al fuego y a las elevadas temperaturas que tendrán que soportar durante la emergencia; en caso contrario, quedarán anuladas en los momentos iniciales, principalmente si entran en contacto directo con las llamas.

- **Reducción de la presión.** De esta manera disminuye la tensión a la que se encuentra sometido el material con el que está construido el recipiente y, ante un aumento de temperatura, se reduce el peligro de explosión. La API recomienda como criterio general la instalación de dispositivos capaces de reducir la presión hasta aproximadamente 7 bar (rel.) o hasta la mitad de la presión de diseño en 15 min. Si el terreno es empinado y el recipiente está protegido con aislamiento térmico, este tiempo puede ser superior.

La despresurización puede requerir la instalación de una válvula con control remoto además de la válvula de seguridad (instrumentación del tipo "fallo en posición segura").

El material descargado tiene que eliminarse en condiciones de seguridad, por ejemplo mediante una antorcha. Hay que tener en cuenta también que en algunos casos, una fuerte despresurización puede producir temperaturas extremadamente bajas en el depósito, y llegar a condiciones de fragilización del acero.

- **Soterramiento.** La posibilidad de enterrar totalmente o parcialmente (en taludes artificiales) los depósitos ha sido sugerida repetidamente. Sin embargo, esta medida ha tenido muchos detractores debido principalmente a la imposibilidad de inspeccionar la posible corrosión del depósito.

- **Barreras de agua.** En el capítulo 3 ya se ha tratado sobre este método, relativamente nuevo, que permite retener los vapores desprendidos durante el vertido (con la reducción consiguiente de la posibilidad de ignición de los mismos) y dispersarlos en la atmósfera.

- **Prevención de daños mecánicos.** Los depósitos que contienen materiales almacenados a temperaturas superiores a la ebullición a presión atmosférica, tienen que estar protegidos de los posibles impactos de grúas o torres que puedan caerse, o de choques provocados por vehículos en maniobras. Un caso especial, que aquí no se trata, es el de la protección de vagones o camiones cisterna.

- **Prevención del sobrellenado.** Éste es un aspecto que ha ocasionado numerosos BLEVE, pese a que cada vez es menos frecuente y se tienen más en cuenta las causas más reiteradas (falta u obturación de válvulas de seguridad).

- **Distancias mínimas de separación.** Estas distancias suelen estar establecidas en la legislación, y no se discutirán aquí. Tienen razón de ser por lo que respecta a la radiación térmica y, principalmente, para evitar el contacto de las llamas del incendio de una instalación sobre las paredes de otro depósito, pero no tienen mucho sentido como protección ante una explosión (onda de sobrepresión, fragmentos).

- **Actuación sobre los mecanismos iniciadores.** Han sido propuestos diversos sistemas para evitar la ebullición en masa (introducción de mallas de aluminio en el depósito, adición de núcleos iniciadores de la ebullición). Sin embargo, estos sistemas están aún en fase de investigación, excepto para algunas aplicaciones muy puntuales. En todo caso, es importante remarcar el interés que tiene la adopción de diversas medidas complementarias simultáneas (terreno en pendiente, recubrimiento de la cubeta con espuma, aislamiento térmico, surtidores de agua, etc.)

Dispersión de nubes tóxicas o inflamables

En la industria química un gran número de accidentes se producen por la pérdida de contención en depósitos y tuberías que almacenan y transportan productos en forma gaseosa o líquida. En la mayoría de los casos estas sustancias son peligrosas para la salud y el medio ambiente.

Cuando las sustancias son susceptibles de formar nubes de gas (como sucedió en el accidente de Bhopal en el año 1984, el más grave de la industria química), conocer su evolución es importante.

El conocimiento de su evolución tiene que servir, para poder calcular de forma razonada los efectos y las consecuencias de los accidentes que involucran nubes de gases tóxicos o inflamables.

Este capítulo contiene la información básica para poder modelizar la evolución de nubes de gas provocadas por escapes accidentales. Los datos que se presentan, sin embargo, no son adecuados para calcular la dispersión de contaminantes generados por emisiones con gran extensión territorial, o para problemas locales de calidad del aire producidos por emisiones periódicas o crónicas de chimeneas, tubos de escape, pequeñas purgas y escapes, etc.

Conceptos previos

El término *dispersión* es utilizado en la modelización de accidentes para describir la evolución de una nube de gas tóxica o inflamable en la atmósfera. La dispersión de una nube de gas sigue una difusión, o transporte de su masa, producida por el movimiento molecular del aire mientras se va diluyendo a medida que va disminuyendo su concentración, a causa de la entrada de nuevas moléculas de aire dentro de la nube. La dispersión incluye el desplazamiento de la masa en la dirección del viento y su expansión en sentido transversal al viento, tanto vertical como horizontal. En el caso de gases pesados, como se verá más adelante (apartado 7.4), la dispersión se produce incluso en dirección contraria al viento.

Las distintas variables meteorológicas afectan en mayor o menor grado la dispersión atmosférica de contaminantes. Así pues, la velocidad y la dirección del viento, junto con la estabilidad atmosférica, condicionan especialmente la dispersión de nubes de gas; la humedad y la temperatura tienen efectos menores, mientras que la inversión térmica sólo influye en casos concretos.

Todas las variables meteorológicas presentan una gran variabilidad estacional y diaria. Para posibilitar la modelización de la dispersión de manera representativa, se suelen tomar valores medios específicos del área de estudio. A continuación se describen las variables meteorológicas principales que afectan a la dispersión de nubes contaminantes.

El viento

El viento tiene un efecto de arrastre que provoca la dispersión de nubes por desplazamiento de la masa de gas. El viento influye también en la estabilidad atmosférica, que es el otro factor principal para determinar la dispersión de gases.

En general, la velocidad del viento registrada por los servicios meteorológicos se refiere a una altura de 10 m. Éste es el valor que suele utilizarse en los modelos de dispersión. La utilización de este valor se basa en el hecho de que los escapes accidentales de gases susceptibles de formar nubes tóxicas o inflamables se producen al nivel del suelo; por tanto, para la modelización de accidentes se necesitan datos relativos a la situación cerca del suelo.

Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica es una variable que se establece para caracterizar la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante; en realidad, lo que representa es el grado de turbulencia existente en un momento determinado.

El tipo de estabilidad atmosférica es, pues, una estimación del estado de la atmósfera, que no se puede medir directamente como la temperatura, la presión, la velocidad del viento, etc. La estabilidad se estima en función de la velocidad del viento y la radiación solar. La radiación solar es, en última instancia, una función del ángulo de incidencia de los rayos de sol sobre la superficie, de la estación del año y de la cantidad de nubes presentes en el momento de su determinación.

Durante el día, la temperatura del aire disminuye con la altura. Así, si una masa de aire se eleva verticalmente se enfría de manera adiabática por efecto de la disminución de presión. Este enfriamiento, para aire seco, es de aproximadamente 1°C por cada 100 metros. Este comportamiento del aire provoca que el aire caliente, de menor densidad, tenga tendencia a subir y el frío a bajar, y que se produzca una mezcla en sentido vertical.

Una condición atmosférica inestable se caracteriza por la existencia de un movimiento vertical importante de la masa de aire, un gradiente vertical de temperatura negativo (la temperatura disminuye con la altura), fluctuaciones frecuentes en la dirección del viento, una fuerte insolación, etc. En cambio, una condición estable se caracteriza por un flujo laminar de las capas del aire (ausencia de turbulencia), un gradiente vertical de temperatura positivo (inversión térmica), fluctuaciones mínimas en la dirección del viento, un bajo nivel de insolación, etc.

Un ejemplo de inestabilidad atmosférica sería un día de verano muy soleado en el que la radiación solar calienta la superficie de la tierra y ésta las capas bajas de la atmósfera, lo que genera corrientes verticales de aire ("térmicas"); o sea, existe una elevada turbulencia a ras de suelo. Un ejemplo de estabilidad atmosférica sería una noche clara de verano en la que la tierra se enfría rápidamente por radiación con el espacio exterior y produce un enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera; esto genera ligeras brisas de aire de componente horizontal que no producen turbulencias.

La temperatura y la humedad relativa

La temperatura y la humedad relativa (básicamente consecuencia de la estación del año), el nivel de insolación y el viento tienen efectos menores sobre la dispersión atmosférica de un gas neutro y, en cambio, tienen un efecto significativo en la dispersión de gases pesados. La humedad y la temperatura se utilizan para el cálculo de la velocidad de evaporación de un líquido (término fuente o modo de escape) en este caso y, como se verá más adelante, se utilizarán en las ecuaciones de dispersión de gases pesados (apartado 7.4).

La humedad del aire sólo tiene efectos significativos sobre la dispersión de un contaminante si existe reactividad entre el producto y el vapor de agua contenido en la atmósfera (es el caso del ácido fluorhídrico (HF), comentado en el apartado 7.4). La humedad tiene también otro efecto significativo si el gas que se tiene que dispersar está a una temperatura más baja que la ambiente. En este último caso, la humedad afecta al balance energético de las masas de gas y aire implicadas en la dispersión y provoca problemas de condensación de vapor de agua (las nubes de gases licuados de petróleo (GLP), por ejemplo, se ven blancas porque condensan la humedad del aire).

La inversión térmica

La inversión térmica se caracteriza por un aumento anómalo de temperatura en las capas altas atmosféricas; es decir, a cierta altura (en general, alrededor de 100 m) la temperatura es superior a la de las capas de aire de cotas más bajas.

Desde el punto de vista de la dispersión de gases, éste es un efecto muy importante ya que impide la dispersión en altura y provoca su reflexión hacia las capas bajas atmosféricas. En el caso que nos ocupa, accidentes de corta duración a nivel del suelo, la inversión térmica es un efecto que generalmente no llega a influir en la dispersión del contaminante.

Modelos de dispersión

Definición y tipos

Los modelos de dispersión son modelos matemáticos (conjuntos de ecuaciones) que permiten prever, dadas unas condiciones iniciales (básicamente el escenario accidental y las condiciones meteorológicas) y según las características físicas y químicas del producto, la evolución de una nube contaminante en función de la posición y del tiempo.

Un primer paso para el cálculo de la dispersión consiste en establecer las condiciones de escape de producto, especialmente su duración en el tiempo. Según el tiempo de escape de producto las emisiones pueden clasificarse en:

- Emisión instantánea: cuando el tiempo necesario para que la nube llegue a un punto determinado es mayor que el tiempo de descarga del producto. Un ejemplo puede ser la explosión de un recipiente que contiene gas a presión.
- Emisión continua: cuando el tiempo de emisión es mayor que el tiempo necesario para que la nube alcance un determinado punto. Un ejemplo sería el penacho de una chimenea.

La emisión instantánea (soplo) forma una nube que se va dispersando con el tiempo. Gráficamente se puede asimilar a una nube casi esférica que se dispersa trasladando su centro de emisión en la dirección del viento

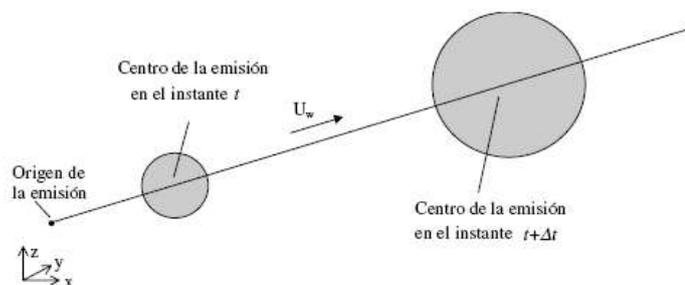


Fig. 7.3 Representación gráfica de la evolución de una nube de gas (soplo) procedente de un escape instantáneo

La emisión continua produce una nube en forma alargada (en penacho) que alcanza un régimen estacionario cuando la cantidad de gas suministrada al interior de la nube desde el punto de escape, es igual a la masa de contaminante dispersada en el ambiente. En la práctica, la división en emisión continua o discontinua es relativamente artificial y subjetiva.

En realidad, la mayoría de emisiones presentan un estado intermedio: el tiempo de escape es finito, se alcanza un estado estacionario durante un cierto tiempo y finalmente se dispersa la nube. Además de lo expuesto, hay otros aspectos que dificultan todavía más esta distinción: mientras que para un observador cercano al punto de escape la emisión puede ser continua, para otro observador alejado del mismo puede ser considerada instantánea; en la mayor parte de los accidentes se involucran otros parámetros, como la disminución del caudal y de la concentración del escape, etc

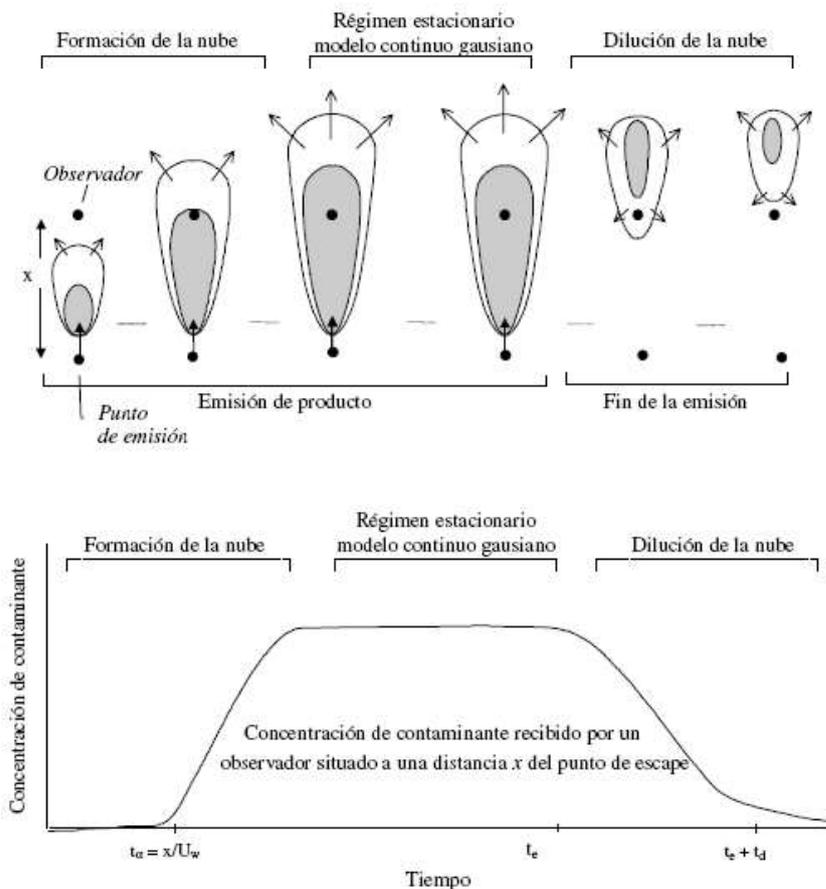


Fig. 7.4 Representación gráfica de la evolución de una nube de gas procedente de un escape continuo

Bibliografia

- Análisis de Riesgo en Instalaciones Industriales Joaquim Casal - Helena Montiel
Eulàlia Planas - Juan A. Vilchez
- [AICH85] AIChE. Guidelines for hazard evaluation procedures. Nueva York, 1985.
- [CERT93] CERTEC (Centre d'Estudis de Risc Tecnològic). Manual del usuario del banco de datos de accidentes ESTRALL.
- [CIA85] CHEMICAL INDUSTRY ASSOCIATION. A Guide to Hazard and Operability Analysis. 1985.
- [COX91] COX, S. J. & TAIL, N.R.S. Reliability, Safety & Risk Management. An integrated approach. Butterworth-Heinemann Ltd. Inglaterra, 1991.
- [CCPS92] CCPS. Hazard Evaluation Procedures. American Institute of Chemical Engineers. Nueva York, 1992.
- [GOYA93] GOYAL, R. K. "FMEA, the alternative process hazard method". Hydrocarbon Processing, pp. 95-99. Mayo 1993.
- [GROS91] GROSSMAN, G. & FROMM, D. "HAZOP-Proof Ammonia Plant: A New Way of Defining a Safe and Reliable Design". Plant/Operations Progress. Vol. 10, núm. 4, pp. 223-227. Octubre 1991.
- [ATOM75] ATOMIC ENERGY COMMISSION. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plant. Rep. WASH 1400. Washington DC, 1975.
- [CASA87] CASAL, J. "Relationships between availability, reliability and safety. EnReData Seminar on Case Studies on Availability Assessment". Special Publication nI. 87.64, PER 1414/87 (ed. A. Amendola). Commission of the European Communities. Joint Research Centre. Ispra, 1987.
- [CASA95] CASAL, J. "Tolerabilitat del risc tecnològic". Arxius de la Secció de Ciències, 100, pp. 565-584. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona, 1995.
- [HASE78] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. Canvey: an Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/Thurrock Area. HMSO. Londres, 1978.
- [HASE88] HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations. HMSO. Londres, 1988.
- [PICC85] PICCININI, N. Affidabilità e Sicurezza nella Industria Chimica. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona, 1985.
- [PUJA82] PUJADES, I. "La població a Catalunya: anàlisi espacial de les interrelacions entre els moviments migratoris i les estructures demogràfiques". Tesis doctoral. Facultat de Geografia e Historia. Universidad de Barcelona. Barcelona, 1982.
- [SLOV87] SLOVIC, P. "Perception of Risk". Science, 236, pp. 280-285. 1987.
- [SMET91] SMETS, H. "Social constraints of tolerable risks near a hazardous installation". Proc. 3rd. Conference of SRA, pp. 583-596. P. Hubert and M. Poumadère Ed. París, 1991.
- [STEE90] STEEL, J. "Risk Estimation", The Safety and Health Practitioner. 20 de junio, 1990.
- [VILC95] VILCHEZ, J.A.; SEVILLA, S.; MONTIEL, H.; CASAL, J. "Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials". J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 8, núm. 2, pp. 87-96. 1995.
- [ASTM83] ASTM STP 825. "A guide to the safe handling of hazardous materials accidents". American Society of Testing and Materials. Philadelphia, 1983.
- [BAGS89] BAGSTER, D. F.; PITBLADO, R. M. "Thermal hazards in the process industry". Chem. Eng. Prog., pp. 69-75. Julio, 1989.
- [BEST91] BESTRATÉN, M.; TURMO, E. Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica. Notas técnica de prevención NTP-293. Inst Nac. Seg. Hig. Trab., pp. 1-6. Barcelona, 1991.
- [BEST91] BESTRATÉN, M.; TURMO, E. Explosiones BLEVE (II): medidas preventivas. INSHT, NTP-294. Barcelona, 1991.
- [CALP89] CALPE, J.; CASAL, J. "BLEVE-bola de foc. Estudi comparatiu de models de predicció d'efectes". PROC. Conferència sobre seguretat ambiental, pp. 389-404. Reus, 1989.
- [CAPD94] CAPDEVILA, J. Programa de càlcul per a l'estimació d'efectes i conseqüències de l'accident BLEVE/bola de foc. ETSEIB, Barcelona, 1994.
- [FAY77] FAY, J. A., LEWIS, D. H. "Unsteady burning of unconfined fuel vapor clouds". 16th Int. Symp. Combustion, pp. 1397-1405. 1977.
- [FERN90] FERNÁNDEZ-CÁMARA, A. "Explosión de recipientes. Teoría y cálculo aproximado de las consecuencias de la radiación térmica". Prevención, núm. 114, pp. 48-56. 1990.
- [HASE78] HASEGAWA, K., KATO, K. "Study of the fireball following steam explosion of n-pentane". 2nd. Int. Symp. Loss Prevention, pp. 297-305. Heidelberg, 1978.
- [HOLD85] HOLDEN, P. L., REEVES, A. B. "Fragment hazards from failures of pressurized liquefied gas vessels". Chem. Eng. Symp. Ser., núm. 93, pp. 205-217. 1985.
- [KAYE85] KAYES, P.J. Manual of industrial hazard assessment techniques. Technica, pp. 70-75. Londres, 1985.

- [KLET77] KLETZ, T. "Protect pressure vessels from fire". *Hydrocarbon Proc.*, pp. 98-102. Agosto, 1977.
- [LEES86] LEES, F.P., *Loss Prevention in the process industries*, vol. 1, pp. 519-528. Butterworth, UK, 1986.
- [LEFI93] LEFIN, Y., MAVROTHALASSITIS, G., PINEAU, J. P. "Knowledge gained from hazard studies on accident investigations". *Chemical Industry and Environment*, vol. 1, pp. 93-106 (J. Casal, ed.). Girona, 1993.
- [LIHO82] LIHO, D. A.; MAUNDE, J. K., *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.*, núm. 71, pp. 191-224. 1982.
- [LOND95] LONDICHE, H., GUILLEMET, R. "Comparison of three protective devices for BLEVE prevention". *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, vol. 1, pp. 551-564. 1991.
- [MADD89] MADDISON, T. E. "The fire protection of LPG storage vessels. The design of water spray systems". *LPGITA Seminar. UK*, 24 de octubre 1989.
- [MAÑA82] MAÑAS, J. L. "Las explosiones BLEVE". *Fuego*, núm. 88, pp. 27-30 y núm. 89, pp. 12-16. 1982.
- [MAÑA84] MAÑAS, J. L. "BLEVEs, their nature and prevention". *Fire*, junio, pp. 27-39. 1984.
- [MONT87] MONTENEGRO, L. "Las explosiones BLEVE y el gas natural licuado". *XIII Asamblea Nacional del Gas*, 14-87, pp. 1-18. 1987.
- [NAZA88] NAZARIO, F. N. "Preventing or surviving explosions". *Chem. Eng.* pp. 102-109. Agosto, 1988.
- [PIET85] PIETERSEN, C. M., CENDEJAS, S. "Analysis of the LPG accident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City". *TNO, Report 85-0222. La Haya, Holanda*, 1985.
- [PRUG91] PRUGH, R. W. "Quantify BLEVE hazards". *Chem. Eng. Progr.*, pp. 66-72. Febrero, 1991.
- [REID79] REID, R. C. "Possible mechanism for pressurized-liquid tank explosions or BLEVEs". *Science*, vol. 203, p. 1263. 1979.
- [ROBE82] ROBERTS, A. F. J. *Fire Safety Studies*, vol. 4, p. 197. 1982.
- [SATY91] SATYANARAYANA, K.; BORAH, M.; RAO, P. G. "Prediction of thermal hazards from fireballs". *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 4, pp. 344-347. 1991.
- [WALL58] WALLS, W. L. "Just what is a BLEVE?". *Fire J.*, vol. 72, p. 46. 1978.