

2. FACTORES DE RIESGO EN INSTALACIONES QUÍMICAS

2.1. 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 estándar, mediante el uso de unas listas de comprobación cuantificadas y más o menos detalladas 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 semicuantitativos (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 semicuantitativos 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].

Los índices de riesgo tecnológico contemplados en este estudio pueden estructurarse, 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 ($\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Magnitud}$). 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 Purt (de EURALARM), 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	

2.2. ÍNDICES BASADOS EN LA DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE RIESGO

2.2.1. 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:

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

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, dará como resultado un factor de justificación muy elevado.

2.2.2. 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:

Coefficiente 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.

Coefficiente 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).

Coefficiente 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].

2.2.3. 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).

$$HRN = E \times F \times M \times G \quad (2.6)$$

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).

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.

2.3. ÍNDICES BASADOS EN LA CARGA DE FUEGO

2.3.1. Índice MESERI

El método MESERI, acrónimo de Método Simplificado de Evaluación del Riesgo de Incendio, fue desarrollado en 1990 [MARTÍNEZ 1990] [DÍAZ 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:

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

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

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

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:

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

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% y 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 (NBE-CPI-96 Norma Básica de la Edificación. Condiciones de Protección contra Incendios [NBE-CPI-96 1996] y normas UNE 23093-81 “Ensayo de resistencia al fuego de las estructuras y elementos de la construcción” [UNE 23093-81 1981], UNE 23801-79 “Ensayo de resistencia al fuego de elementos de construcción vidriados” [UNE 23801-79 1979], UNE 23802-79 “Ensayo de resistencia al fuego de puertas y otros elementos de cierre de huecos” [UNE 23802-79 1979] y UNE 23806-81 “Ensayo de comportamiento al fuego. Ensayo de estabilidad al chorro de agua de los materiales protectores de estructuras metálicas” [UNE 23806-81 1981])².

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).

Este análisis de accesibilidad se basa en la Norma Básica de la Edificación NBE-CPI-96 y es un aspecto que otros índices (Gretener, Eric, Purt, etc.) no contemplan en su desarrollo.

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

¹ El porcentaje expresado se obtiene al evaluar $5x/129$ (que es la aportación del factor x a la Ec. (2.7)) y calcular el porcentaje que supone sobre el máximo valor de P (11,9). Para los factores activos y , se evalúa $5y/22$.

² Otras normas asociadas a las anteriores, relativas a la reacción y resistencia frente al fuego son las siguientes: UNE 23102-90, UNE 23721-90, UNE 23722-81, UNE 23723-90, UNE 23724-90, UNE 23725-90, UNE 23726-90, UNE 23727-90 y UNE 23730-90.

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 ($Q \geq 200 \text{ Mcal/m}^2$ ó $Q \geq 840 \text{ MJ/m}^2$), media ($100 \leq Q < 200 \text{ Mcal/m}^2$ ó $420 \leq Q < 840 \text{ MJ/m}^2$) o baja ($Q < 100 \text{ Mcal/m}^2$ ó $Q < 420 \text{ MJ/m}^2$).

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 pesetas/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 daño³.

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% y 6) Instalaciones fijas de extinción (CO₂ o similares): 7,63%.

³ La valoración en pesetas hace referencia al año 1990, fecha de publicación del método. Con el objeto de mantener actualizado el mismo, sería posible aplicar un índice de actualización de costes, tal como se describe en el Capítulo 6.

Valora los medios de intervención disponibles ante la emergencia causada por un incendio. Se remite a las reglas técnicas de CEPREVEN (RT2.EXT para extintores [CEPREVEN 1991], RT2.BIE para bocas de incendio equipadas [CEPREVEN 1989], RT2.ABA para abastecimientos de agua contra incendios [CEPREVEN 1989-2], RT2.CHE para instalaciones de columnas hidrantes exteriores [CEPREVEN 1990], RT2.DET para sistemas de detección automática de incendios [CEPREVEN 1990-2], RT2.ROC para instalaciones de rociadores automáticos de incendio [CEPREVEN 1990-3] y RT4.CO2 para instalaciones fijas de extinción por anhídrido carbónico [CEPREVEN 1993]).

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).

2.3.2. 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:

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

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

$$S = \prod_{i=1}^{i=6} s_i \quad (2.13)$$

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

A continuación se describen los parámetros P, N, S y F, indicando junto a cada uno de ellos el valor máximo que pueden adoptar⁴.

Peligro potencial: ($P_{\text{máx}}$: 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,

⁴ Se obtiene este valor como producto de los valores máximos de cada factor p_i , n_i , s_i o f_i .

mientras que en el método MESERI, el valor relativo de este factor 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: ($N_{\text{máx}}$: 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 del 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: ($S_{\text{máx}}$: 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: ($F_{\text{máx}}$: 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): ($A_{\text{mín}}$: 0,85; $A_{\text{máx}}$: 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 ($P_{H,E}$): 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:

$$\gamma = \frac{13 * P_{H,E}}{R} \quad (2.15)$$

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.

2.3.3. El índice “Evaluation du risc d’incendie par le calcul” (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:

R_1 : riesgo para las personas
 P_1 : peligro potencial para las personas
 M_1 : medidas de protección para las personas
 F_1 : 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:

R_2 : riesgo para los bienes
 P_2 : peligro potencial para los bienes
 M_2 : medidas de protección para los bienes
 F_2 : resistencia al fuego valorada para los bienes.

Para el cálculo de P_1 :

$$P_1 = t \times f \times i \times r \times c \quad (2.18)$$

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 P_2 :

$$P_2 = q \times e \times f \times g \times k \times a \times c \quad (2.19)$$

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 M_i :

$$M_i = S_i \times T_i \times E_i \times D_i \quad (2.20)$$

Con:

M: medidas de protección

S: coeficiente asociado a las posibilidades y medios de extinción

T: coeficiente relativo al tiempo de intervención

E: coeficiente asociado a los medios de extinción y la formación de los encargados de usarlos

D: coeficiente asociado a la instalación de evacuación de humos.

El cálculo de F_i , 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.

2.3.4. Índice de Purt

El método fue desarrollado por Gustav Purt para la empresa EURALARM [PURT 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:

$$IR = H \times D \times F \quad (2.22)$$

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 Purt 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.

2.3.5. Índice del cálculo de la carga de fuego ponderada

La última versión de este método aparece descrita en la Ordenanza Municipal contra Incendios del Ayuntamiento de Barcelona para el uso del mismo en establecimientos de uso industrial y para la evaluación exclusiva del riesgo de incendio [AYTO BCN 1997]. Este mismo método aparece reiteradamente en directrices técnicas y normas de protección contra incendio previas (NBE-CPI-82 ó 91, normativa de plan de autoprotección de edificios y normativa catalana de protección contra incendios).

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 Q_p (carga de fuego ponderada) y clasifica el riesgo en tres categorías: riesgo bajo para Q_p inferior a 200 Mcal/m² (840 MJ/m²), riesgo medio para Q_p entre 200 y 800 Mcal/m² (entre 840 y 3.340 MJ/m²) y riesgo alto para Q_p superior a 800 Mcal/m² (3.340 MJ/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:

- Q_p : carga de fuego ponderada (Mcal/m² o MJ/m²)
- P_i : masa de cada una de las sustancias combustibles (kg)
- H_i : poder calorífico de cada una de las sustancias en Mcal/kg o MJ/kg
- C_i : coeficiente adimensional que valora la peligrosidad de los productos
- A : superficie construida del local en m²
- R_a : 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 R_a , 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 R_a 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 R_a son un tanto arbitrarios y en particular la estimación de R_a 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).

2.3.6. Método de los coeficientes K

Es un método de evaluación con igual objetivo que el índice de G. Purt 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:

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

donde:

G: resistencia al fuego en minutos
 Q_r : 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 k_i 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.).

2.3.7 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:

$$V = \hat{a} * \sum \hat{a}_i \quad (2.26)$$

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.

2.4. ÍNDICES BASADOS EN LA PELIGROSIDAD DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

2.4.1. 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.

2.4.2. 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:

F_1 : coeficiente de riesgos generales del proceso
 F_2 : 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

C_1 : bonificación por control de proceso
 C_2 : bonificación por aislamiento del material
 C_3 : bonificación por protecciones contra incendios.

Cada factor C_i 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 N_f de incendio [NFPA 1986] (o St en el caso de polvos) y N_r 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 N_r 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 N_r 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 N_r .

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 (F_1): 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 F_1 que representa cada coeficiente máximo. Obviamente no suman 100, pues el cálculo de F_1 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	16,5
Accesos inadecuados para equipos de emergencia	0,35	6,4
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 F_1 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 (F_2): 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 N_h , también definido en el código NFPA 704 [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

⁵ El peso relativo se calcula como la relación entre el máximo valor que puede adoptar un factor y el máximo valor de F_1 (5,45), expresado en forma porcentual.

valor obtenido (los valores mínimos y máximos se indican en la Tabla 2.4 para el rango de presiones del gráfico).

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] [CCPS-AICHE 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 F_2 , 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 F_2 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 (C_1): 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 – 0,96
Instrucciones de operación escritas y detalladas	0,91 – 0,99
Revisiones bibliográficas	0,91 – 0,98

Factor de bonificación por aislamiento del material (C_2): Se recogen en este grupo C_2 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 C_1 , 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 (C_3): 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 $F_1 \cdot F_2 \cdot MF$), 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 (C_3)

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).

2.4.3. 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:

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

Índice global (MOND):

$$R_0 = D \times (1 + 0,2 \times E \times \sqrt{A \times F}) \quad (2.36)$$

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:

$$R = R_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \quad (2.37)$$

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

K_6 : protecciones contra incendios.

Los factores K_i pueden aplicarse tanto sobre el coeficiente R_0 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 R_{30}/R_1 donde R_{30} es el índice MOND para una planta con un factor de material $B=30$ y R_1 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

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

de donde se deduce que el factor B multiplica el resultado final, como mínimo, por 30. 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-

combustibilidad y a un peso similar que le asigna a estos factores el método Gretener. 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

Por manipulación y cambios físicos se agrupan una serie de operaciones que en el 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 cuanta 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 semilogarítmico 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	0,8 - 0,98
Protección física contra el fuego	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.

2.4.4. 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:

$$FS = \frac{30 \times \left[(0,0945 \times NG + 0,7275) - \frac{0,122}{NG} + 0,02971 \right]}{\sum_{i=1}^{i=2} \sum_{j=1}^{j=6} P_{ij} - 4,5} \quad (2.42)$$

donde:

NG : nivel de gravedad
P_{ij} : 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 y 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	23,35	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	11,63		

Por su parte los parámetros P_{ij} , se ponderan con los coeficientes indicados en la tabla 2.15.

Puede apreciarse que los parámetros P_{1j} hacen la descripción esencial de las instalaciones mientras que los P_{2j} 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	5,66
P_{25}	Medios de protección y prevención	1-4	7,54
P_{26}	Vibraciones	1-4	7,54

2.4.5. 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 [INSHT 1995].

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 N° 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:

Tabla 2.17. Aceptabilidad del riesgo INSHT	
$IR \leq 20$	Riesgo BAJO
$20 < IR \leq 40$	Riesgo MEDIO
$40 < IR \leq 80$	Riesgo ALTO
$80 < IR \leq 100$	Riesgo MUY ALTO

El límite superior se sitúa igual a 100 para cada IR. En general, cada riesgo se evalúa según la Ec. (2.43):

$$IR_j = \min \left[\left(1 - X_n \right) \sum_{i=1}^{i=n-1} x_i, 100 \right] \quad (2.43)$$

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 x Σ cantidad
IR212 - Reactividad (de una sustancia).	Σ peligrosidad x Σ cantidad
IR213 A - Toxicidad aguda (de una sustancia).	$(0,2 * \text{Factor de toxicidad en humanos} + 0,8 * \text{Factor de toxicidad en animales}) * \text{Cantidad} * \text{Factor de propiedades físico-químicas}$.
IR213 C - Toxicidad crónica.	Peligrosidad de la sustancia * Factor de propiedades físico-químicas.
IR214 - Corrosividad.	Σ peligrosidad x 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) * 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.	$0,25 * IR22 + 0,75 * IR23$
IRI - Riesgo de inflamabilidad de una sustancia en el proceso estudiado.	$0,4 * IR211 + 0,5 * IRP + 0,1 * IR215 I$
IRT - Riesgo de toxicidad de una sustancia en el proceso estudiado.	$0,4 * IR213 A + 0,5 * IRP + 0,1 * IR215 T$

2.4.6. 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.

2.5. 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 ignifugantes (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.

Como se verá en los capítulos siguientes esta información no está disponible, hoy por hoy, en los bancos de datos o en las referencias bibliográficas de los accidentes descritos. Ello limita enormemente la bondad de los resultados obtenidos en estudios basados en el análisis histórico.