

Procedimiento de evaluación de riesgos tecnológicos en el entorno

Servicio de Protección Civil

Barcelona, 2002

Índice

1. Objetivo	1
2. Riesgos admisibles según la OMAIA	3
3. Consideraciones sobre el entorno de las actividades con riesgo potencial en el Término Municipal de Barcelona	5
4. Determinación grado de afectación de la actividad por el RD. 1254/1999	7
4.1. Primer paso	8
4.2. Segundo paso	8
4.3. Tercer paso	10
4.4. Regla de la adición de sustancias peligrosas	14
4.5. Ejemplo de aplicación del método para la determinación del grado de afectación de una actividad industrial química según el RD 1254/99	17
5. Identificación de peligros	20
5.1. Checklists	24
5.1.1. Descripción	24
5.1.2. Aplicación	24
5.1.3. Consideraciones	24
5.1.4. Experiencia necesaria	25
5.1.5. Recursos necesarios	25
5.1.6. Ventajas e inconvenientes	25
5.2. Análisis histórico	26
5.2.1. Descripción y objetivos	26
5.2.2. Bancos de datos de accidentes	26
5.2.3. Metodología del análisis	27
5.2.4. Advertencias y limitaciones	28
5.2.5. Resultados y aplicabilidad	28
5.3. HAZOP	28
5.3.1. Descripción y objetivo	28
5.3.2. Metodología del análisis	29
5.3.3. Organización del estudio	32
5.3.4. Requisitos y limitaciones	33
5.3.5. Resultados y aplicabilidad	33

6. Análisis de riesgo determinista (ARd)	35
6.1. Identificación del riesgo	36
6.2. Análisis de consecuencias en el interior del subpolígono. Zonas de riesgo según valores umbral (radios de intervención y alerta)	36
7. Análisis cuantitativo de riesgo probabilista (ACRp)	41
7.1. Identificación del peligro	45
7.2. Cálculo de efectos	45
7.3. Análisis de consecuencias	45
7.3.1. Consecuencias de incendios	47
7.3.2. Consecuencias de explosiones	48
7.3.3. Consecuencias de nubes tóxicas	54
7.4. Cálculo de frecuencias y probabilidades	56
7.4.1. Método del árbol de fallos	57
7.4.1.1. Descripción y objetivo	57
7.4.1.2. Definiciones	58
7.4.1.3. Elaboración	59
7.4.1.4. Análisis	61
7.4.1.5. Requisitos y limitaciones	62
7.4.1.6. Resultados y aplicabilidad	62
7.4.2. Método del árbol de sucesos	63
7.4.2.1. Descripción	63
7.4.2.2. Construcción del árbol	63
7.4.2.3. Evaluación del árbol	64
7.4.2.4. Ventajas e inconvenientes	65
7.5. Cuantificación del riesgo	66
7.5.1. Definición de la malla	66
7.5.2. Cálculo del riesgo individual	67
8. Efecto dominó	70
9. Riesgo social	73
9.1. Cálculo de la densidad de población	74
9.2. Cálculo del riesgo social	77
10. Bibliografía	79

Anexo I. Ejemplos de aplicación de métodos de identificación de peligros	I.1
I.1. Ejemplo de aplicación de una Checklist	I.2
I.2. Ejemplo de aplicación de un análisis histórico de accidentes	I.4
I.3. Ejemplo de aplicación de un análisis HAZOP	I.7
I.3.1. Descripción de la instalación que se quiere estudiar	I.7
I.3.2. Consideraciones previas al análisis	I.8
I.3.3. Estudio preliminar	I.8
I.3.4. Análisis HAZOP	I.9
Anexo II. Cálculo de efectos	II.1
II.1. Fugas	II.2
II.1.1. Fugas de gases comprimidos	II.4
II.1.1.1. Fugas de gas en el interior de recipientes por pequeños escapes	II.4
II.1.1.2. Fuga a través de una abertura en la pared del recipiente	II.6
II.1.1.3. Fuga por rotura de una tubería	II.7
II.1.1.4. Fuga en tuberías por rotura total	II.9
II.1.1.5. Fuga en tuberías por pequeños escapes	II.11
II.1.2. Fugas de gases licuados a presión	II.14
II.1.2.1. Fugas de recipientes por pequeños escapes	II.18
II.1.2.2. Fuga a través de una abertura en la pared del recipiente	II.25
II.1.2.3. Fuga por rotura de una tubería	II.26
II.1.3. Fugas de líquidos	II.31
II.1.3.1. Fugas de recipientes por pequeños escapes	II.31
II.1.3.2. Fuga a través de una abertura en la pared del recipiente	II.33
II.1.3.3. Fuga por rotura de una tubería	II.34
II.2. Evaporaciones de charcos	II.35
II.2.1. Introducción	II.35
II.2.2. GASP para charcos de líquido en subsuelo y flotando en agua	II.35
II.2.2.1. Introducción	II.35
II.2.2.2. Estructura del modelo	II.36
II.2.2.3. Escape y evaporación	II.37
II.2.2.4. Expansión del charco líquido en una superficie	II.38
II.2.2.5. Evaporación	II.45

II.2.3. Evaporación de criogénicos en subsuelo y flotando en agua	II.54
II.2.3.1. Evaporación de un criogénico en subsuelo seco y poroso	II.55
II.2.3.2. Evaporación de criogénico en subsuelo húmedo y poroso	II.55
II.2.3.3. Evaporación de un criogénico en un lecho de grava	II.57
II.2.3.4. Evaporación de líquidos en lecho de grava	II.58
II.2.4. Ebullición de película y nucleada en superficies acuáticas	II.58
II.2.5. Evaporación en cubetos	II.61
II.2.5.1. Líquidos en ebullición	II.61
II.2.5.2. Líquidos	II.62
II.2.6. HACS-R válido para líquidos volátiles en agua	II.62
II.2.6.1. Introducción	II.66
II.2.6.2. Descripción del modelo	II.66
II.3. Dispersiones de nubes de vapor	II.67
II.3.1. Introducción a la sección II.3	II.77
II.3.2. Modelos para el cálculo de la estabilidad atmosférica y la variación vertical de la velocidad del viento	II.78
II.3.2.1. Cálculo de la variación vertical de la velocidad y la temperatura	II.78
II.3.2.2. Cálculo de la longitud de Monin-Obukhov a partir de datos meteorológicos habituales	II.80
II.3.2.3. Cálculo de la longitud de Monin-Obukhov a partir de las categorías de estabilidad de Pasquill	II.83
II.3.2.4. Altura de la capa de mezcla	II.84
II.3.2.5. Desviación estándar de las velocidades turbulentas	II.85
II.3.3. Dispersión pasiva	II.85
II.3.3.1. Dispersión lateral	II.86
II.3.3.2. Dispersión vertical	II.88
II.3.3.3. Dispersión a favor del viento	II.90
II.3.3.4. Fuentes con dimensiones finitas	II.92
II.3.3.5. Fuentes con fugas dependientes del tiempo	II.93
II.3.3.6. Cálculo de la masa total de contaminante entre el límite inferior y superior de inflamabilidad	II.93

II.3.4. Modelos para chorros, penachos y elevaciones de penachos	II.96
II.3.4.1. Modelo del chorro turbulento libre	II.96
II.3.4.2. Modelo HMP	II.99
II.3.5. Modelos de dispersión de gas denso	II.103
II.3.5.1. El modelo de Britter y McQuaid	II.103
II.4. Explosiones de nubes de vapor	II.108
II.4.1. Introducción al concepto de multienergía	II.108
II.4.2. Discusión	II.110
II.4.3. Procedimiento de división del área en zonas obstruidas y no obstruidas	II.115
II.4.4. Procedimiento para la aplicación del método de multienergía	II.118
II.5. Flujo de calor de incendios	II.123
II.5.1. Introducción	II.123
II.5.2. Poder emisor superficial	II.123
II.5.2.1. Calor liberado en la combustión	II.123
II.5.2.2. Fracción del calor radiado	II.124
II.5.2.3. Factor de vista	II.125
II.5.2.4. Transmisividad atmosférica	II.126
II.5.3. Incendios de dardo	II.129
II.5.3.1. Cálculo de la velocidad de salida del chorro en expansión	II.129
II.5.3.2. Cálculo de la dimensión de la llama	II.131
II.5.3.3. Cálculo del poder emisor superficial	II.136
II.5.3.4. Cálculo del factor de vista	II.136
II.5.3.5. Cálculo del flujo de calor a una cierta distancia	II.138
II.5.4. Incendios de charco en el suelo	II.138
II.5.4.1. Cálculo del diámetro del charco	II.139
II.5.4.2. Cálculo de la tasa de combustión	II.140
II.5.4.3. Cálculo de las dimensiones de las llamas	II.141
II.5.4.4. Cálculo del poder emisor superficial	II.143
II.5.4.5. Cálculo del flujo de calor a una cierta distancia	II.147

II.5.5. Incendios de charco en la tierra (no confinados)	II.149
II.5.5.1. Descripción del modelo	II.149
II.5.5.2. Cálculo del diámetro del charco	II.151
II.5.5.3. Cálculo de las dimensiones de la llama	II.154
II.5.5.4. Cálculo del poder emisor superficial	II.157
II.5.5.5. Cálculo del flujo de calor a una determinada distancia	II.157
II.5.6. Incendios de charco en el agua	II.158
II.5.6.1. Cálculo del diámetro del charco de líquido	II.159
II.5.6.2. Cálculo de la tasa de combustión	II.159
II.5.6.3. Cálculo de las dimensiones de la llama	II.161
II.5.6.4. Cálculo del flujo de calor a una determinada distancia	II.161
II.5.7. Bolas de fuego	II.161
II.5.7.1. Cálculo de las dimensiones, duración y altura	II.162
II.5.7.2. Cálculo del flujo de calor a una determinada distancia	II.162
II.6. Rotura de depósitos	II.168
II.6.1. Introducción	II.168
II.6.2. Métodos para el cálculo de efectos de explosiones	II.168
II.6.3. Métodos para el cálculo de los efectos de fragmentos	II.181
II.7. Símbolos y abreviaturas	II.195
II.7.1. Apartado II.1.	II.195
II.7.2. Apartado II.2.	II.198
II.7.3. Apartado II.3.	II.203
II.7.4. Apartado II.4.	II.206
II.7.5. Apartado II.5.	II.207
II.7.6. Apartado II.6.	II.211
Anexo III. Ejemplos de aplicación de árboles de fallos y de sucesos	III.1
III.1. Ejemplo de aplicación de un árbol de fallos	III.2
III.1.1. Descripción de la instalación que se quiere estudiar	III.2
III.1.2. Descripción del análisis realizado	III.3
III.1.3. Resultados y conclusiones	III.4
III.1.4. Ejemplo de análisis cuantitativo	III.6
III.1.4.1. Resolución analítica	III.7
III.1.4.2. Resolución matricial	III.8

III.2. Ejemplo de aplicación de un árbol de sucesos	III.9
III.2.1. Construcción del árbol de sucesos	III.9
III.2.2. Evaluación del árbol de sucesos	III.11
Anexo IV. Estimación de probabilidades y frecuencias	IV.1
IV.1. Frecuencia de sucesos de pérdida de contención	IV.2
IV.1.1. Tanques y depósitos estacionarios presurizados	IV.2
IV.1.2. Tanques y depósitos estacionarios atmosféricos	IV.3
IV.1.3. Tuberías	IV.4
IV.1.4. Bombas	IV.5
IV.1.5. Intercambiadores de calor	IV.6
IV.1.6. Dispositivos de alivio de presión	IV.7
IV.1.7. Almacenaje en depósitos	IV.7
IV.1.8. Almacenaje de explosivos	IV.8
IV.1.9. Camiones cisterna y vagones-contenedor dentro de un establecimiento	IV.8
IV.1.10. Embarcaciones dentro de establecimientos	IV.9
IV.2. Base de datos de fallo de componentes genéricos	IV.10
IV.3. Probabilidades de ignición	IV.13
IV.3.1. Ignición directa	IV.13
IV.3.2. Ignición retardada	IV.15
IV.4. Probabilidad de muerte y fracción de muertes	IV.17
IV.4.1. Probabilidad de muerte y fracción de muertes para sustancias tóxicas	IV.17
IV.4.2. Probabilidad de muerte y fracción de muertes para sustancias inflamables y explosivas	IV.20
Anexo V. Líneas vitales de la ciudad	V.1

1. Objetivo

1. Objetivo

En los últimos tiempos se está viviendo un proceso de constante crecimiento y expansión de las ciudades. Esta expansión hace que, en determinados casos, se vean obligadas a convivir industrias de elevado riesgo potencial hacia el entorno, junto a poblaciones, lo que origina una problemática de difícil gestión. La convivencia dentro de las ciudades requiere la compatibilización de la actividad industrial y la vida habitual de los ciudadanos.

Con la clara intención de dar respuesta a estas nuevas necesidades de los ciudadanos, el Ayuntamiento de Barcelona ha redactado una Ordenanza (Ordenança Municipal d'Activitats i d'Intervenció Integral de l'Administració Ambiental de Barcelona (OMAIA) [1]), que establece unos criterios de aceptabilidad del riesgo, compatibles con la reglamentación vigente y adaptados a las características urbanísticas propias, en el ámbito de la seguridad y protección civil de las personas y el normal funcionamiento de la ciudad. Dicha Ordenanza es muy ambiciosa y puntera en sus planteamientos, estableciendo criterios actualizados, cuya aplicación en ciertos casos puede resultar compleja. De ahí surge la necesidad de redactar una metodología clara, que ayude a una correcta evaluación y ejecución de los estudios que se deben realizar sobre el riesgo de las actividades.

Este procedimiento tiene como objetivo, por tanto, facilitar a las empresas, ingenierías y consultorías, u otros agentes que estén relacionados con los aspectos de la seguridad industrial, una metodología sistematizada para conocer y evaluar los riesgos potenciales de las actividades y su aceptabilidad en el ámbito municipal de la ciudad de Barcelona.

2. Riesgos admisibles según la OMAIA

2. Riesgos admisibles según la OMAIA

La OMAIA establece en su artículo 33 los siguientes requisitos:

- a) Las zonas de intervención y alerta que se determinan en el análisis del riesgo determinista (ARd) no han de afectar en ningún caso a áreas de población permanentes ni líneas vitales de la ciudad.
- b) El valor del riesgo individual en el entorno no debe superar el valor de 10^{-6} víctimas/año, o la existencia de riesgo grave para el medio ambiente o los bienes. Se considera en todos los casos no superar el 1% del riesgo de fondo. (*)
- c) Para las consecuencias del efecto dominó se aplican los mismos criterios del punto anterior.
- d) El índice de riesgo social deberá estar dentro del intervalo de aceptabilidad establecido por la reglamentación de aplicación. (**)

(*) Se considera que el riesgo admisible por la actividad puede ser, como máximo, el riesgo de fondo más un 1%. Así, para un riesgo de fondo de 10^{-6} , el riesgo admisible de la actividad sería $10^{-6} + 0.01 \cdot 10^{-6} = 1.01 \cdot 10^{-6}$.

(**) El índice de riesgo social se calculará sólo en los casos en los que la actividad incumpla el apartado b), es decir, que sus curvas de isorriesgo individual de 10^{-6} superen su propio perímetro.

Riesgo Individual. La probabilidad de muerte que aparece como consecuencia de un accidente en una planta, instalación o transporte, expresada como una función de la distancia al lugar del accidente. El riesgo individual se puede ilustrar con la ayuda de curvas de riesgo o contornos de isorriesgo.

Riesgo social o colectivo. Es la probabilidad de un cierto número de víctimas por año. A la hora de calcular el riesgo colectivo son necesarios datos relacionados con la demografía de la zona.

3. Consideraciones sobre el entorno de las actividades con riesgo potencial en el Término Municipal de Barcelona

3. Consideraciones sobre el entorno de las actividades con riesgo potencial en el Término Municipal de Barcelona

Se considera como:

- a) Población permanente a aquellas zonas donde existen viviendas o residencias continuamente habitadas.

- b) Puntos críticos o vitales de la ciudad:
 - Escuelas o establecimientos educativos.
 - Estaciones de bomberos, policías o similares.
 - Hospitales o centros hospitalarios.
 - Centros cívicos o residencias de ancianos.

- c) Líneas vitales de la ciudad:
 - Rondas, autovías, autopistas.
 - Líneas ferroviarias de superficie.
 - Líneas de servicios básicos (gas, agua, electricidad, comunicaciones).

En el Anexo V se indican las líneas vitales de tránsito de vehículos de la ciudad de Barcelona.

4. Determinación del grado de afectación de la actividad por el RD 1254/1999

4. Determinación del grado de afectación de la actividad por el RD 1254/1999

El método consiste en seguir tres pasos, que son los siguientes [2]:

4.1. Primer paso

Inicialmente hay que determinar si la actividad pertenece o no al listado de actividades no afectadas por el Real Decreto 1254/1999 [3], listado que se encuentra concretamente en el artículo 4 del citado RD. Las actividades no afectadas son:

- Almacenes militares.
- Radiaciones ionizantes.
- Transportes.
- Minas y canteras.
- Vertederos de residuos.
- Pólvoras y municiones.

Si se da el caso de que la actividad pertenece a una de las anteriores, se concluye directamente que **No está afectada** por la normativa de riesgos graves, RD 1254/1999. En caso contrario, se pasa al punto siguiente del método.

4.2. Segundo paso

En base a la información relativa a las sustancias y/o preparados peligrosos que las empresas proporcionen, y teniendo en cuenta los criterios de clasificación de sustancias peligrosas que se describen tanto en el anexo del RD 1254/1999 como en el RD 363/1995 [4], o consultando las fichas de seguridad (sólo para las sustancias que pertenecen a la parte 1 del anexo I del RD 1254/99), se comprueba a qué listado pertenecen cada una de las sustancias, al de la parte 1 o al de la parte 2 del anexo I del RD 1254/99. Sea cual sea la parte a la que pertenezcan, se le asigna la categoría o categorías

que le corresponda según la parte 2. Estas categorías son, según la parte 2 del anexo I del RD 1254/99:

- Categoría 1: Muy tóxica.
- Categoría 2: Tóxica.
- Categoría 3: Comburente.
- Categoría 4: Explosiva tipo a.
- Categoría 5: Explosiva tipo b.
- Categoría 6: Inflamable.
- Categoría 7: 7a: muy inflamable tipo a.
7b muy inflamable tipo b.
- Categoría 8: Extremadamente inflamable.
- Categoría 9: Sustancias peligrosas para el medio ambiente.
 - R50 muy peligrosa para los organismos acuáticos.
 - R51 tóxica para los organismos acuáticos.
 - R53 puede provocar a largo plazo efectos negativos al medio acuático.
- Categoría 10: Cualquier clasificación diferente de las anteriores en combinación con los siguientes enunciados de riesgos:
 - R14/R15 reacciona violentamente con el agua.
 - R29 en contacto con agua libera gases tóxicos.

Para poder emplear el método de determinación del grado de afectación, cada una de las sustancias peligrosas ha de tener asociada la siguiente información:

- Identificación de la sustancia.
- Cantidad máxima estimada.
- Pertenencia a la parte 1 o 2 del anexo I del RD 1254/99.
- Categoría o categorías a las que pertenece la misma (tanto si pertenece a la parte 1 como a la 2).
- Cantidad umbral inferior (columna 2 de los listados del anexo I del RD 1254/99), dependiendo de si se trata de sustancias pertenecientes a la parte 1 o 2.
- Cantidad umbral superior (columna 3 de los listados del anexo I del RD 1254/99), dependiendo de si se trata de sustancias pertenecientes a la parte 1 o 2.

A continuación, es conveniente elaborar una tabla que ordene la información existente para cada sustancia. Un modelo de tabla podría ser el siguiente:

Tabla 4.1. Modelo de tabla.

Sustancias	Cantidades máximas estimadas (Tm)	Anexo I Parte 1 / Parte 2	Propiedades, frases de peligro. Categorías	Umbrales	
				inferior	superior
Cloro	2	Parte 1	Tóxico (cat. 2) Peligroso medio ambiente. R50 (cat. 9)	10	25

Las cantidades máximas que se han de tener en cuenta son las máximas que estén presentes o puedan estarlo en un momento dado.

No se han de tener en cuenta, en la determinación del grado de afectación, las sustancias peligrosas existentes en un establecimiento únicamente en una cantidad igual o inferior al 2% de las cantidades indicadas como umbral inferior (columna 2) de las partes 1 o 2 del anexo I del RD 1254/1999, siempre que su situación dentro del establecimiento sea tal que no pueda llegar a provocar un accidente grave en ningún otro lugar del establecimiento.

4.3. Tercer paso

Una vez rellenada correctamente la tabla 4.1, se procede a la revisión de la información. Esta revisión consiste, en primer término, en comparar, para cada sustancia peligrosa tabulada, la cantidad máxima estimada con las cantidades señaladas para la misma como umbral inferior (columna 2 tanto de la parte 1 como de la 2) y como umbral superior (columna 3 tanto de la parte 1 como de la 2). Del resultado de esta evaluación se pueden producir diferentes situaciones, las cuales se describen a continuación:

- 1) No se ha encontrado ninguna sustancia que pertenezca ni al apartado 1 ni al 2 del anexo I del RD 1254/99. Obviamente, en este caso, se concluye que la actividad no está afectada por el RD 1254/99.

Las hipótesis siguientes presuponen que sí se encuentran una o más sustancias incluidas en las clasificaciones del anexo I del RD 1254/99, y, en adelante, el término sustancias hace referencia únicamente a estas últimas. También hay que indicar que se tratan conjuntamente las sustancias clasificadas según la parte 1 y las clasificadas según la parte 2 del anexo, ya que el discriminante es el hecho de que superen o no los umbrales que tienen asociadas. Es en estos umbrales donde se hace patente la influencia de la pertenencia a una u otra parte del anexo.

- 2) Se han encontrado una o más sustancias que sobrepasan el umbral superior. En este caso, independientemente de que otras sustancias superen o no el umbral inferior, se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado superior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 9 del mismo.
- 3) Se ha encontrado sólo una sustancia, y no supera el umbral inferior. En este caso se concluye que la actividad no está afectada por el RD 1254/99.
- 4) Ninguna de las sustancias supera el umbral inferior. En este caso se concluye que hay que aplicar la regla de la adición, que se describe en el apartado 4.4 de esta metodología, utilizando los umbrales inferiores. Como resultado global de esta regla se pueden tener dos situaciones, que son:
 - a. La regla de la adición da como resultado global un número inferior a 1. En este caso se concluye que la actividad no está afectada por el RD 1254/99.
 - b. La regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada como mínimo de grado inferior. Se hace necesario comprobar que no esté afectada de grado superior. Para comprobarlo, se vuelve a aplicar la regla de la adición, pero en este caso utilizando los umbrales superiores. El

resultado de esta nueva aplicación de la regla de la adición puede dar lugar a dos situaciones:

- c. La regla de la adición da como resultado global un número inferior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7 del mismo.
 - d. La regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado superior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 9.
- 5) Se ha encontrado sólo una sustancia, y supera el umbral inferior pero no llega a sobrepasar el umbral superior. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de nivel inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7.
- 6) Todas las sustancias superan el umbral inferior pero no llegan a sobrepasar el umbral superior. En este caso se concluye que la actividad está afectada como mínimo en grado inferior por el RD 1254/99. Se hace necesario comprobar que no esté afectada en grado superior. Para comprobarlo se emplea la regla de la adición descrita en el apartado 4.4. Como resultado final de la aplicación de esta regla se pueden obtener dos conclusiones, que son:
- a. La regla de la adición da como resultado global un número inferior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7.
 - b. La regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado superior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 9.
- 7) Se producen simultáneamente las hipótesis 3 y 5, es decir se han encontrado únicamente dos sustancias, y una no supera el umbral inferior y la otra supera dicho umbral pero no llega a sobrepasar el umbral superior. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7.
- 8) Se producen simultáneamente las hipótesis 4 y 5, es decir, se ha encontrado más de una sustancia que no supera el umbral inferior y una

única que supera el umbral inferior pero no sobrepasa el umbral superior. En este caso se concluye que la actividad está afectada como mínimo por el RD 1254/99 de grado inferior, pero se hace necesario comprobar que no esté afectada de grado superior. Para comprobarlo se aplica la regla de la adición a todas las sustancias (tanto las que están por encima como por debajo del umbral inferior) utilizando el umbral superior. El resultado puede dar lugar a dos situaciones:

- a. La regla de la adición da como resultado global un número inferior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7.
 - b. La regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado superior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 9.
- 9) Se producen simultáneamente las hipótesis 3 y 6, es decir, se ha encontrado más de una sustancia que supera el umbral inferior pero no llegan a sobrepasar el umbral superior, y únicamente una sustancia que no supera el umbral inferior. En este caso se concluye que la actividad está afectada como mínimo por el RD 1254/99 de grado inferior. Se hace necesario comprobar que no lo esté de grado superior. Para comprobarlo se aplica la regla de la adición a todas las sustancias (tanto las que están por arriba como por debajo del umbral inferior) utilizando el umbral superior. Como resultado de la aplicación de la regla se pueden obtener dos situaciones:
- a. La regla de la adición da como resultado global un número inferior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7.
 - b. La regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado superior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 9.
- 10) Se producen simultáneamente las hipótesis 4 y 6, es decir, se ha encontrado más de una sustancia que no supera el umbral inferior y más de una sustancia que supera el umbral inferior pero no llega a sobrepasar el umbral superior. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254 por lo menos en grado inferior, y se hace necesario

comprobar si lo está de grado superior. Para comprobarlo se aplica la regla de la adición a todas las sustancias (tanto las que están por encima como las que están por debajo del umbral inferior) utilizando el umbral superior. Como resultado de la aplicación de la regla de la adición se pueden obtener dos situaciones:

- a. La regla de la adición da como resultado global un número inferior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7.
- b. La regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En este caso se concluye que la actividad está afectada por el RD 1254/99 de grado superior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 9.

4.4. Regla de la adición de sustancias peligrosas

Para aplicar la regla de la adición hay que seguir los siguientes pasos:

- 1) En base a la información de la tabla 4.1 elaborada con anterioridad, se agrupan las sustancias según su pertenencia en uno u otro de los grupos que se describen a continuación, teniendo en cuenta la regla del 2% anteriormente mencionada:

Grupo A. Sustancias clasificadas en las categorías 1, 2 y 9.

Grupo B. Sustancias clasificadas en las categorías 3,4,5,6,7 y 8.

Grupo C. Sustancias clasificadas en la categoría 10.

- 2) Se aplica la fórmula siguiente a cada uno de los grupos de manera independiente:

$$\text{Resultado} = q_1/Q_1 + q_2/Q_2 + q_3/Q_3 + \dots + q_i/Q_i$$

Donde:

q = cantidad máxima estimada para cada sustancia clasificada dentro del anexo I, tanto en la parte 1 como en la 2.

Q = cantidad umbral establecida para cada sustancia, inferior o superior según convenga.

Se obtienen tres resultados, uno para cada grupo de sustancias. En el caso de que uno o más resultados sean superiores a 1, se considera que la regla de la adición da como resultado global un número superior a 1. En caso contrario, se considera que el resultado global de la regla de la adición es inferior a 1. La interpretación de los resultados globales de la regla de la adición ha quedado definida anteriormente en la enumeración de las hipótesis.

- 3) Con el fin de favorecer aún más la aplicación de la regla de la adición, es conveniente elaborar una nueva tabla que contenga la información siguiente:

Tabla 4.2. Regla de la adición.

	Sustancias	Cantidad máxima estimada	Umbrales		q_i / Q_i	
			inferior	superior	aplicación umbral inferior	aplicación umbral superior
Grupo A (categorías 1,2,9)						
Resultado del grupo A $\Sigma q_i / Q_i$						
Grupo B (categorías 3,4,5,6,7,8)						
Resultado del grupo B $\Sigma q_i / Q_i$						
Grupo C (categoría 10)						
Resultado del grupo C $\Sigma q_i / Q_i$						
Resultado global						

Aclaraciones a la regla de la adición de sustancias peligrosas:

1. En el caso de que una sustancia se haya clasificado simultáneamente en una de las categorías 1, 2 o 9 (grupo A) y también en una de las categorías 3, 4, 5, 6, 7, 8 (grupo B), se deberá incluir a la sustancia en los cálculos de los dos tipos de sustancias. Por ejemplo:

Un establecimiento que tenga metanol (que es una sustancia de la parte 1 que es simultáneamente tóxica (categoría 2) y muy inflamable (categoría 7b)) y otras sustancias de la parte 2; a la hora de aplicar la regla de la adición se tendrá que sumar, por una parte, la q/Q del metanol (empleando, como se ha indicado anteriormente, los umbrales de la parte 1) con los q_i/Q del resto de sustancias de la parte 2 de categorías 1, 2, 9 (empleando aquí los umbrales de la parte 2), y por otra, se tendrá que sumar también con los q_i/Q del resto de sustancias de la parte 2 de categorías 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

2. En el caso de que una sustancia se tenga que clasificar en más de una de las categorías 1, 2, 9 o en más de una categoría 3, 4, 5, 6, 7, 8, se tendrá que aplicar la regla de la adición sumando los q_i/Q de las sustancias únicamente una vez en la agrupación de categorías correspondiente. Si se trata de una sustancia de la parte 2 se utilizará, de los posibles umbrales asignados, el más bajo. Por ejemplo:

Un establecimiento que tenga cloro (que es una sustancia de la parte 1 que es simultáneamente tóxica (categoría 2) y peligrosa para el medio ambiente (categoría 9)), y otras sustancias de la parte 2 de categorías 1, 2 y 9; a la hora de aplicar la regla de la adición se tendrá que sumar la q_i/Q del cloro (siendo Q igual al umbral de cloro que le corresponde de la parte, teniendo en cuenta que el cloro es una sustancia clasificada de la parte 1).

3. La categoría 10 (grupo C) se tratará de forma independiente y se tendrán que sumar las sustancias de esta categoría entre sí, sin poder sumar dichas sustancias con otras de distintas categorías.

4.5. Ejemplo de aplicación del método para la determinación del grado de afectación de una actividad industrial química, según el RD 1254/99

El método descrito se aplica al siguiente establecimiento supuesto:

Se trata de un establecimiento que ha presentado la notificación de las sustancias peligrosas con las que trabaja, y en consecuencia ha debido de aportar la información necesaria para poder clasificar todas las sustancias en las categorías pertinentes, además de las cantidades máximas estimadas asociadas a cada una.

1. El primer paso consiste en comprobar si la actividad pertenece al listado de actividades no afectadas. Se ve que no, por lo que la actividad podría estar afectada por el RD 1254/99.
2. El segundo paso consiste en completar una tabla que contenga la siguiente información para cada sustancia:
 - Identificación de la sustancia.
 - Cantidad máxima estimada.
 - Pertenencia a la parte 1 o a la parte 2 del anexo I del RD 1254/99.
 - Categoría o categorías a las que pertenece la sustancia.
 - Cantidad umbral inferior (columna 2), dependiendo de si se trata de una sustancia de la parte 1 o 2.
 - Cantidad umbral superior (columna 3), dependiendo de si se trata de una sustancia de la parte 1 o 2.

La tabla 4.3 es un ejemplo de cómo recoger la información de que se dispone.

Tabla 4.3. Modelo para la recopilación de la información disponible.

Sustancias	Cantidad máxima estimada (Tm)	Anexo I Parte 1 Parte 2	Propiedades, frases de peligro. Categorías	Umbrales	
				inferior	superior
Cloro	2	Parte 1	Tóxica (cat. 2) Peligrosa medio ambiente. R50 (cat. 9)	10	25
Metanol	150	Parte 1	Tóxica (cat. 2) Muy inflamable (cat. 7b)	500	5000
X + Y	3	Parte 2	Muy tóxicas (cat. 1)	5	20
W	4	Parte 2	Muy tóxica (cat. 1) Muy inflamable (cat. 7a)	5 50	20 200
R + S + T	2000	Parte 2	Inflamables (cat. 6)	5000	50000
Z	1	Parte 2	Peligrosa medio ambiente R51 y R53 (cat. 9)	500	2000

3. El tercer punto consiste en revisar la información de la tabla 4.3 y determinar con qué hipótesis del método se identifica la situación del establecimiento. En este ejemplo, se comprueba que el establecimiento no tiene ninguna sustancia que supere su umbral inferior. En consecuencia, la hipótesis que le corresponde es la número 4). Por lo tanto, hay que aplicar una primera vez la regla de la adición utilizando los umbrales inferiores. Si el resultado es superior a 1, entonces habrá que emplear la regla de nuevo utilizando los umbrales superiores. A continuación se presenta una tabla donde se resumen los diferentes resultados obtenidos en la aplicación de la regla de la adición:

Tabla 4.4. Resultados de la regla de la adición.

	Sustancias	Cantidad máxima estimada	Umbrales		q _i / Q _i	
			inferior	superior	aplicación umbral inferior	aplicación umbral superior
Grupo A (categorías 1,2,9)	Cloro	2	10	25	0.2	0.08
	Metanol	150	500	5000	0.3	0.03
	X + Y	3	5	20	0.6	0.15
	W	4	5	20	0.8	0.20
Resultado del grupo A $\Sigma q_i/Q_i$					1.9 > 1	0.46 < 1
Grupo B (categorías 3,4,5,6,7,8)	Metanol	150	500	5000	0.3	0.03
	W	4	50	200	0.08	0.02
	R + S + T	2000	5000	50000	0.40	0.04
Resultado del grupo B $\Sigma q_i/Q_i$					0.78 < 1	0.09 < 1
Resultado global					> 1	< 1

Comentarios

- La sustancia Z no se ha incluido en ninguno de los dos cálculos, dado que la cantidad máxima estimada para la misma está por debajo del 2% del umbral inferior
- El cloro sólo se tiene en cuenta una vez en el cálculo del grupo A, tal y como se describe en la aclaración 2 de la regla de la adición
- El metanol y W se tienen en cuenta en el cálculo de ambos grupos, tal y como se especifica en la aclaración 1 de la regla de la adición

Conclusiones

Se comprueba que el resultado global de la primera aplicación de la regla de la adición es superior a 1, y por tanto la actividad está afectada, como mínimo, de grado inferior. Para comprobar que no lo está de grado superior se aplica de nuevo la regla, siendo el resultado global de la misma inferior a 1. La conclusión final es que la actividad está afectada por el RD 1254/99 en grado inferior, y por tanto afectada por los artículos 6 y 7 del mismo RD.

5. Identificación de peligros

5. Identificación de peligros

5.1. Checklists

5.2. Análisis histórico

5.3. Hazop

El primer paso en cualquier análisis de riesgos consiste en la identificación de los posibles sucesos no deseados que pueden ocurrir en la instalación. Este primer paso es fundamental, y de él depende el éxito posterior de todo el estudio. Una buena identificación, rigurosa y detallada, de todos los posibles peligros que pueden suceder en la actividad en estudio, es un requisito indispensable y básico para llegar a buen fin en el análisis de riesgos.

Aunque los análisis de riesgos se centran principalmente en los accidentes que finalmente involucren productos químicos, también deberían de contemplar todos aquellos otros accidentes que puedan causar daño.

Básicamente el análisis de riesgos debería reflejar los siguientes riesgos químicos [5]:

- a) Riesgos químicos provocados por causas internas. Entre estos destacan:
 - Fallo de servicios (suministro eléctrico, agua de refrigeración, corte de vapor de calefacción...).
 - Fallo de operación (sobrellenado, vaciado, sobrepresurizado, entrada en vacío...).
 - Pérdida de contención (fugas, colapsos, roturas...).
 - Fallos humanos (error en un procedimiento...).

- b) Riesgos químicos provocados por causas externas:
 - Causas naturales: inundaciones, seísmos, lluvias torrenciales, incendios forestales, vendavales...
 - Tecnológicos: actos de sabotaje, accidentes en instalaciones vecinas...

- c) Efectos sinérgicos y dominó.

- d) Otros.

Existe una amplia gama de métodos para la identificación de riesgos. Los principales son los siguientes:

a) Métodos cualitativos.

Se caracterizan por no recurrir a cálculos numéricos. Suelen estar basados en técnicas de análisis crítico en las que intervienen distintos expertos de la planta. Su eficacia depende de la calidad de la información disponible y de su exhaustividad. Destacan los siguientes:

Análisis histórico. Consiste en un estudio lo más amplio posible sobre accidentes ocurridos en el pasado en instalaciones y/o con productos similares a los estudiados.

HAZOP (o AFO, Análisis Funcional de Operabilidad). Técnica inductiva de análisis crítica realizada por un equipo pluridisciplinar para identificar desviaciones de proceso que pueden conducir a accidentes.

Análisis del modo, efecto y criticidad de los fallos (FMEAC). Método inductivo de reflexión sobre las causas/consecuencias de fallos de componentes en un sistema.

Análisis preliminar de riesgos. Método inductivo en el que se analiza de forma sistemática las causas, efectos principales y medidas preventivas/correctivas asociadas.

Checklist. Constituyen listas exhaustivas de posibles iniciadores/accidentes a contemplar en la identificación de riesgos.

What if... Método inductivo en el cual se analiza sistemáticamente las consecuencias de determinados sucesos.

Pueden considerarse también en su raíz como métodos cualitativos, los métodos de Árboles de Fallos y Árboles de Sucesos, siempre que no se les aplique el Cálculo de Frecuencias.

b) Métodos semicualitativos.

Estos métodos se caracterizan por recurrir a una clasificación de las áreas de una instalación en base a una serie de índices que miden su potencial para ocasionar un daño en función de una serie de magnitudes y criterios (cantidad de producto, características de peligrosidad etc). Entre estos destacan:

Índice Mond de fuego, explosión y toxicidad

Índice Dow de fuego, explosión y toxicidad

c) Otros métodos de apoyo.

Básicamente se incluyen aquí las **auditorías de seguridad** que suelen responder a otros objetivos (relativos a la organización de seguridad, el cumplimiento de una legislación, etc), pero que pueden constituir una base para la identificación de riesgos.

Según diversos autores de reconocido prestigio [6,7], los métodos principales y básicos de identificación de sucesos no deseados son el análisis histórico, checklist y HAZOP.

Estos tres métodos antes señalados son fundamentales en cualquier identificación de peligros. La correcta aplicación de ellos conduce a una identificación adecuada y rigurosa. Complementariamente, y con el fin de ampliar el conocimiento de posibles riesgos de la actividad, se pueden aplicar otras técnicas, como las señaladas anteriormente.

La identificación se hace en dos fases:

1ª) detectar posibles accidentes.

2ª) caracterización de sus causas, o sea, suceso o cadena de sucesos que provocan el incidente no deseado.

El primer paso para una identificación correcta del peligro potencial de una instalación industrial, independientemente de los métodos aplicados, es la identificación y caracterización de las sustancias involucradas en el proceso.

En las siguientes páginas se describen detalladamente las tres técnicas de identificación de peligros que debe contemplar todo análisis de riesgo.

En el Anexo I se indica un ejemplo de aplicación de cada una de ellas.

5.1. Checklists

Las checklists o listas de comprobación son utilizadas usualmente para determinar la adecuación a un determinado procedimiento o reglamento [8].

5.1.1. Descripción

Una checklist es una lista escrita de detalles o pasos procedimentales, que tiene como fin el verificar el estado de un sistema. Las checklists contienen posibles fallos y causas de sucesos peligrosos. Están basadas en la experiencia en la operación, y son muy empleadas en los análisis de riesgos. Tradicionalmente las checklists varían mucho en su nivel de detalle, y se usan frecuentemente para comprobar la adecuación a estándares y prácticas empleadas.

5.1.2. Aplicación

El propósito de una checklist es proporcionar un estímulo en la valoración crítica de todos los aspectos del sistema, más que determinar requerimientos concretos. Como mínimo, una checklist puede ser usada para asegurar que el diseño cumple con los estándares. En general, una checklist es enormemente útil para identificar peligros habituales y conocidos.

5.1.3. Consideraciones

La aplicación de una checklist está limitada exclusivamente por la experiencia del autor. Por lo tanto, estas listas deben ser realizadas por equipos multidisciplinarios que tengan amplia experiencia en el sistema o la actividad que están analizando. Frecuentemente, las checklists se realizan simplemente organizando la información que se tiene de códigos, estándares y

regulaciones. Son documentos vivos, que deben ser auditados y actualizados regularmente.

5.1.4. Experiencia necesaria

El análisis con checklists es fácil de realizar. Pero ha de estar claro que el uso de estas listas de comprobación depende de manera crítica de la experiencia y saber hacer de la persona que selecciona y aplica la lista adecuada.

5.1.5. Recursos necesarios

Las listas de inspección deben ser preparadas por personas de gran experiencia. Es necesario disponer de las normas o estándares de referencia, así como de un conocimiento del sistema o planta a analizar.

5.1.6. Ventajas e inconvenientes

Es un método que permite comprobar con detalle la adecuación de las instalaciones. Constituye una buena base de partida para complementarlo con otros métodos de identificación que tienen un alcance superior al cubierto por los reglamentos e instrucciones técnicas. Sin embargo, es un método que examina la instalación solamente desde el punto de vista de cumplimiento de un reglamento o procedimiento determinado.

En el Anexo I se comenta un ejemplo de aplicación de este método.

5.2. Análisis histórico

5.2.1. Descripción y objetivos

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

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

En bastantes casos, el número de accidentes registrados es suficientemente elevado como para permitir una deducción de información significativa. En estas condiciones es posible observar una determinada “pauta” presente en el origen de un determinado porcentaje de incidentes (por ejemplo, en la operación de carga y descarga de fluidos o por la acumulación de un líquido inflamable derramado cerca de un depósito que también lo contiene). En otras ocasiones es posible simplemente identificar un cierto número de situaciones, operaciones o errores que han favorecido el inicio de un accidente en un tipo de instalación concreto. En todos estos casos, el conocimiento de la información adecuada permite, de alguna manera, el establecimiento de “puntos débiles” en el sistema cuya seguridad quiere estudiarse.

5.2.2. Bancos de datos de accidentes

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

Tabla 5.1. Principales bases de datos existentes.

MHIDAS	Con más de 7000 accidentes de todo el mundo, comercializado en formato CD ROM Más información en: http://www.hse.gov.uk/infoserv/mhidas.htm
FACTS	Con los 15000 accidentes más graves de los últimos 60 años, disponible en disquettes Más información en: http://www.mep.tno.nl/software/Downloads/FACTS%20brochure.pdf
SONATA	Con un número inferior de accidentes, es menos detallado que el MHIDAS, pero más que el FACTS en aspectos descriptivos
MARS	Con accidentes ocurridos en países de la comunidad europea y con información muy detallada procedente de las empresas implicadas Más información en: http://mahbsrv.jrc.it/mars/Default.html

El inconveniente de esta metodología es la necesidad de tener acceso a bases de datos. Algunas de las bases de datos mencionadas están comercializadas, es decir, que es posible adquirir la información deseada pagando previamente la licencia correspondiente para su utilización.

5.2.3. Metodología del análisis

El método de análisis empleado no está excesivamente estructurado. El acceso a las bases de datos suele realizarse mediante palabras clave. La concurrencia de diferentes palabras clave permite acotar la información y llegar a la identificación de los accidentes que pueden ser interesantes para el estudio. Después de una evaluación de la información, esta se ordena, y si los datos lo permiten, se procesa estadísticamente para obtener resultados numéricos que faciliten su interpretación.

5.2.4. Advertencias y limitaciones

Las principales limitaciones del análisis histórico de accidentes son:

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

5.2.5. Resultados y aplicabilidad

El resultado principal de los análisis históricos de accidentes es una lista de accidentes que efectivamente han sucedido, por lo que el riesgo identificado es indudablemente real y permite el establecimiento de puntos débiles y operaciones críticas en instalaciones similares. Los resultados permiten dar una idea general del riesgo potencial de la instalación y verificar los modelos de predicción de efectos y consecuencias de accidentes con datos reales.

En el Anexo I se indica un ejemplo de la aplicación de este método.

5.3. HAZOP

5.3.1. Descripción y objetivo

[7] El análisis de peligros y operabilidad (Hazard and Operability Analysis), conocido también como análisis de riesgo y operabilidad o análisis funcional de operabilidad (AFO) o análisis operativo (AO), es una técnica deductiva para la

identificación, evaluación cualitativa y prevención del riesgo potencial y de los problemas de operación derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema técnico. El análisis pretende, mediante un protocolo relativamente sencillo, estimular la creatividad de un equipo de expertos con diferente formación para encontrar posibles problemas operativos. El método tiene como finalidad identificar cualitativamente los posibles riesgos asociados a una determinada instalación en base a la investigación sistemática de las posibles desviaciones respecto a las condiciones normales, que pueden producirse en el proceso. Una gran ventaja de la técnica es el hecho de que es capaz de detectar situaciones menos obvias que las que proporciona la revisión mecánica de una lista de comprobación.

La técnica se fundamenta en el hecho de que las desviaciones en el funcionamiento de las condiciones normales de operación y diseño suelen conducir a un fallo del sistema. La identificación de estas desviaciones se realiza mediante una metodología rigurosa y sistemática. El fallo del sistema puede provocar desde una parada sin importancia del proceso hasta un accidente mayor de graves consecuencias.

5.3.2. Metodología del análisis

El paso previo para el desarrollo del análisis es la definición del objetivo y el alcance del estudio, de los límites físicos de la instalación o el proceso que se quiera estudiar y de la información requerida. Además debe estudiarse el sistema o proceso ya definido para conocer la información disponible, prepararla y organizar el equipo de estudio, y planear la secuencia de actuación y las sesiones de trabajo.

Después del estudio previo se puede comenzar el análisis propiamente dicho. El primer paso es la selección de los elementos críticos que deben estudiarse (depósitos, reactores, separadores, etc.). A continuación, sobre cada nodo de estudio, que corresponde a cada línea de fluido de cada elemento seleccionado, y de forma secuencial y repetitiva, se aplican las palabras guía (no, más, menos, otro, parte de, además de, inversa, otra, etc.) a cada una de las condiciones de operación del proceso, las sustancias y las

variables que intervienen (flujo, presión, temperatura, nivel, viscosidad, reacción, composición, velocidad, tiempo, voltaje, pH, etc.). Operando de esta manera se generan las desviaciones significativas de las condiciones normales de operación y se realiza un repaso exhaustivo de los posibles funcionamientos anómalos.

Las principales palabras guía y los parámetros de proceso a los que se aplican se muestran en la tabla 5.2. Un caso particular es el estudio de procesos discontinuos y manuales operativos, donde se toman las operaciones propiamente (carga, descarga, etc.) como parámetros sobre los cuales aplicar las palabras guía.

Tabla 5.2. Resumen de palabras guía y variables de proceso utilizadas en los análisis HAZOP.

Palabra guía	Significado	Parámetro de proceso	Ejemplos de desviación
NO	Negación de la intención de diseño	Temperatura	NO+Caudal = falta de caudal
MENOS	Disminución cuantitativa	Presión	Menos+Nivel = bajo nivel
MÁS	Aumento cuantitativo	Nivel	Más+Presión = presión excesiva
OTRO	Sustitución parcial o total	Reacción	Otra+Composición = Impurezas presentes
INVERSA	Función opuesta a la intención de diseño	Composición	Inverso+Caudal = Flujo inverso
		Caudal	
		Velocidad	
		Tiempo	
		Viscosidad	
		Mezcla	
		Voltaje	
		Adición	
		Separación	
		pH	

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

medios protectores del sistema. Toda la información del análisis es documentada ordenadamente en forma de tabla (tabla 5.3), hecho que permite la evaluación cualitativa de las medidas de control y seguridad. A partir de esta información es relativamente sencillo implementar nuevas medidas para la mejora de la seguridad y fiabilidad del sistema.

Tabla 5.3. Ejemplo orientativo de tabla HAZOP.

SOCIEDAD: LOCALIDAD: INSTALACIÓN:				FECHA: Revisión: Plano num:	
Variable	Palabra guía	Desviación	Posibles causas	Posibles consecuencias	Medidas correctoras
Temperatura	MÁS	Aumento de temperatura	Fallo de la válvula de paso de refrigerante	- Desactivación del catalizador - Reacción fuera de control	- Doble circuito de refrigeración
Flujo	NO	No hay flujo de la mezcla A reactiva	Fallo del sistema de bombeo	- Pérdida de rendimiento de la reacción	- Alarma de falta de flujo de A
	ADEMÁS DE	La mezcla A está contaminada con B	Control de calidad de materiales poco riguroso	- Subproductos no deseados - Disminución de la conversión	- Mejora del control de calidad

Notas:

a) En el apartado de Posibles causas cabe indicar que se consideran de tres tipos: error humano, fallos de equipos y sucesos externos (provocados por instalaciones próximas o asociados a causas naturales como seísmos, meteorología etc).

b) En el apartado de Posibles consecuencias hay que indicar que es importante centrarse en las relacionadas con los posibles sucesos iniciadores de accidentes, aunque, obviamente, también puede hacerse referencia a otras con enfoques distintos, que sin duda serán también de utilidad.

c) En el apartado de Medidas correctoras hay que indicar que se consideran de tres tipos: de prevención, de detección y de mitigación.

En la figura 5.1. se puede ver un esquema general con los pasos a seguir a la hora de efectuar un HAZOP.

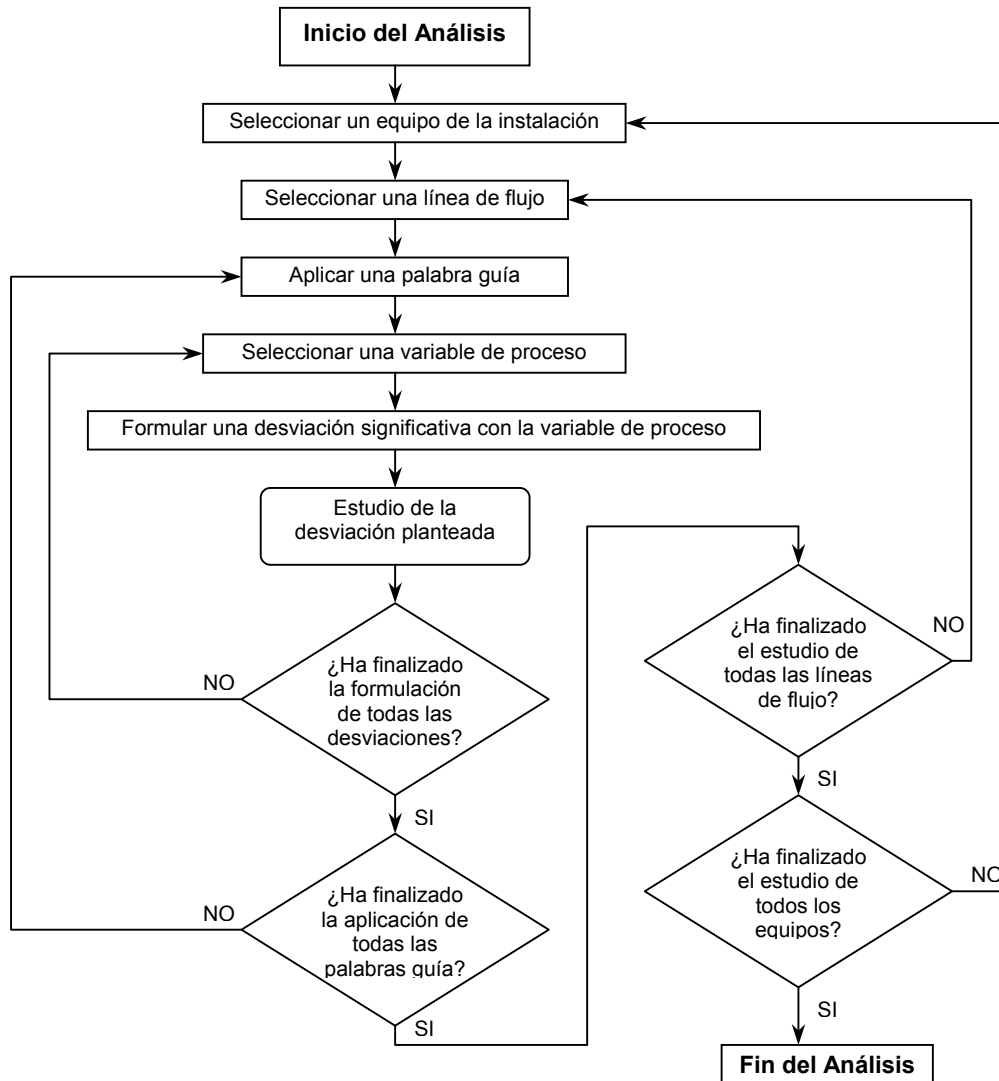


Figura 5.1. Diagrama lógico de ejecución del análisis HAZOP.

5.3.3. Organización del estudio

Los análisis HAZOP son, en general, estudios multidisciplinares. La ejecución del estudio HAZOP requiere un conocimiento detallado del sistema

que se quiere auditar y del protocolo de análisis. Esta característica condiciona que el trabajo se realice en equipo, donde debe haber representantes de las distintas áreas de conocimiento implicadas en el proceso.

5.3.4. Requisitos y limitaciones

El método de análisis HAZOP presupone tres hipótesis:

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

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

5.3.5. Resultados y aplicabilidad

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

El análisis HAZOP es un instrumento de estudio muy indicado para procesos en fase de diseño y construcción, donde la documentación está totalmente actualizada y las recomendaciones del análisis no suponen modificaciones costosas ni paros en la planta.

En el Anexo I se indica un ejemplo de aplicación del análisis HAZOP.

6. Análisis de riesgo determinista (ARd)

6. Análisis de riesgo determinista (ARd)

En este capítulo se establece:

- El cálculo del riesgo de acuerdo con la Directiva Seveso [9].
- La determinación de los radios de intervención y alerta.

Según la Resolución de 30 de enero de 1991, por la que se aprueba la Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico [10], un análisis cuantitativo de riesgo determinista deberá de presentar, entre otras cosas, el siguiente contenido, que sirve de índice para el presente capítulo:

6.1. Identificación del riesgo

6.2. Análisis de consecuencias en el interior del subpolígono. Zonas de riesgo según valores umbral (radios de intervención y alerta)

6.1. Identificación del riesgo

La identificación del riesgo ha sido comentada y expuesta en el capítulo 5.

Una vez realizada esta identificación, hay que escoger los fenómenos peligrosos con carácter catastrófico. En estos momentos no importa la probabilidad de ocurrencia, sino los fenómenos que puedan dar lugar a las consecuencias más severas.

6.2. Análisis de consecuencias en el interior del subpolígono. Zonas de riesgo según valores umbral (radios de intervención y alerta)

Una vez identificados los posibles accidentes que se pueden producir en la instalación, es necesario definir las zonas vulnerables asociadas a dichos accidentes.

Se distinguen dos tipos de áreas vulnerables distintas:

- Las áreas a considerar para la planificación de emergencia y dimensionamiento de recursos. Son las definidas como zonas de intervención y alerta, y se determinan a partir de unos valores umbrales.
- Las áreas en las cuales se produce un daño determinado a personas, bienes y medio ambiente. Según el caso, la vulnerabilidad puede evaluarse a través de unas ecuaciones de PROBIT (PROBability unIT) o valores de referencia. Se entiende por elemento vulnerable a las personas, el medio ambiente y los bienes, que puedan sufrir daños como consecuencia de los accidentes mayores. Estas áreas serán definidas y evaluadas en el capítulo 7.

Naturaleza del daño:

Los diversos tipos de accidentes mayores a considerar en las instalaciones químicas, pueden producir los siguientes fenómenos peligrosos para personas, el medio ambiente y los bienes:

De tipo mecánico: Ondas de presión y proyectiles.

De tipo térmico: Radiación térmica.

De tipo químico: Fuga o vertido incontrolado de sustancias contaminantes o muy tóxicas.

Estos fenómenos pueden ocurrir aislada, simultánea o secuencialmente.

Variables y valores umbral para personas y bienes:

Para cada uno de los fenómenos peligrosos, relacionados en el apartado anterior, se establecen unas variables físicas cuyas magnitudes son suficientemente representativas para evaluar el alcance del fenómeno peligroso considerado. Las zonas potencialmente afectadas por los fenómenos peligrosos se determinan en base a la distancia a la que determinadas variables físicas representativas alcanzan unos determinados valores umbral. En este sentido, en el Anexo II se recoge la metodología y modelos de cálculo recomendados para la determinación de los efectos de los accidentes.

Las variables y valores umbral a considerar son:

Valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la zona de intervención:

- Un valor local integrado del impulso debido a la onda de presión de 150 mbar·s.
- Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 mbar.
- El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar·s en una cuantía del 95%, producidos por explosión o estallido de continentes (depósitos a presión, tanques atmosféricos, conducciones y cualquier otro tipo de instalaciones susceptibles de originar proyectiles primarios).
- Un flujo de radiación térmica superior a 5 kW/m² independientemente del espectro de emisión con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos.
- Concentraciones de sustancias tóxicas en aire superiores al equivalente al Límite Inmediatamente Peligroso para la Vida y la Salud (IPVS).

Asimismo, para la delimitación de la zona de alerta se considerarán los siguientes valores umbrales o circunstancias:

- Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 mbar·s.
- Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 50 mbar.
- El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar·s en una cuantía del 99.9%, producidos por explosión o estallido de continentes, depósitos a presión, tanques atmosféricos, conducciones y cualquier otro tipo de instalaciones susceptibles de originar proyectiles primarios.
- Un flujo de radiación térmica de 3 kW/m².
- Para concentraciones de sustancias tóxicas en aire, un cuarto del límite inmediatamente peligroso para la vida y la salud ($\frac{1}{4}$ IPVS).

Todos estos valores se pueden recoger a modo de resumen en la tabla 6.1:

Tabla 6.1. Zonas de intervención y de alerta.

	Tipo de fenómeno peligroso			
	Flujo de radiación térmica (kW/m ²)	Concentración tóxica (ppm)	Sobrepresión local estática (mbar)	Impulso de los proyectiles (mbar·s)
Zona de intervención	5	IPVS	125	150
Zona de alerta	3	¼ IPVS	50	100

Variables y valores umbral para el medio ambiente:

Se considera el medio ambiente como el conjunto de recursos que condicionan y sustentan la vida del hombre: el aire, el agua, el suelo, el clima, las especies de flora y fauna, las materias primas, el hábitat y el patrimonio natural y cultural.

La liberación incontrolada de productos contaminantes, conlleva riesgos asociados cuyas consecuencias son diferidas en la mayoría de las ocasiones. Es por ello que a la hora de delimitar las zonas afectadas por estos sucesos, es preciso el conocimiento de las circunstancias, en su más amplio sentido, bajo las que se desarrolla el accidente, así como la naturaleza del producto fijado en lo que a su capacidad contaminante se refiere.

Se pueden producir alteraciones del medio ambiente por distintos sucesos, que son consecuencia de un desarrollo incontrolado de una actividad industrial. Entre tales sucesos se pueden incluir:

- Vertido de productos contaminantes en aguas superficiales, pudiéndose derivar de ello la contaminación de aguas potables o graves perjuicios para el medio ambiente y las personas.
- Filtración de productos contaminantes en el terreno y aguas subterráneas dejándolos inservibles para su explotación agrícola, ganadera y de consumo.

- Emisión de contaminantes a la atmósfera que determinan la calidad del aire provocando graves perturbaciones en los ecosistemas receptores con posible posterior incorporación a la cadena trófica.

Por lo tanto, una vez seleccionados los accidentes mayores, hay que determinar su alcance, el efecto que tienen sobre el terreno. En el Anexo II se reproducen todas las ecuaciones y modelos matemáticos necesarios para el cálculo de las sobrepresiones, radiaciones térmicas de los incendios y concentraciones de fugas y escapes tóxicos. En dicho Anexo también se sugieren algunos programas matemáticos empleados con profusión en este tipo de cálculos.

Una vez determinadas las magnitudes peligrosas (radiación térmica, sobrepresión, concentración de tóxico) en función de la distancia, ya se pueden obtener los radios de intervención y alerta, o lo que es lo mismo, la distancia desde la fuente originaria del accidente a la que esas magnitudes peligrosas (kW/m^2 , ppm, mbar) alcanzan los valores límite reglamentarios indicados en la tabla 6.1.

La OMAIA [1] especifica, en el punto 3 apartado a) del artículo 33, que “las zonas de intervención y alerta que se determinen en el análisis de riesgo determinista no deben afectar en ningún caso áreas de población permanente ni líneas vitales de la ciudad”. Por lo tanto, una vez obtenidas estas zonas o radios de intervención y alerta, tal y como se ha explicado anteriormente, se deberán contrastar en un mapa y comprobar que no afectan a zonas permanentemente pobladas, puntos críticos ni a las líneas vitales de la ciudad indicadas en el Anexo V.

7. Análisis cuantitativo de riesgo probabilista (ACRp)

7. Análisis cuantitativo de riesgo probabilista (ACRp)

- Procedimiento y cálculo.

El Análisis Cuantitativo de Riesgo tiene como objetivo identificar y evaluar las condiciones de seguridad de las instalaciones de almacenamiento y/o proceso de productos peligrosos, así como identificar los posibles riesgos y las consecuencias de los accidentes que se pueden derivar de sus actividades.

Tradicionalmente los estudios deterministas tienen como objetivo la determinación de los accidentes más graves postulables en una instalación para así definir la envolvente máxima de daños (peores condiciones posibles, máximo grado de llenado, meteorología adversa...). Sin embargo, en los análisis probabilistas entra en consideración otra característica de los accidentes, que es su probabilidad de ocurrencia. Así, mientras que en un análisis determinista se tratan exclusivamente aquellos accidentes que causan mayores efectos negativos, en el análisis probabilista se analizan otros accidentes, que, aunque con menores consecuencias sobre el entorno, tienen mayor probabilidad de ocurrir, y deben ser por tanto bien estudiados y previstos.

Según C.M. Pietersen y B.F.P. van het Veld, [6], las etapas de un análisis de riesgo probabilista son las que se indican en la figura 7.1. En dicha figura se expresan los pasos generales que hay que realizar.

En la figura 7.2, propuesta por Casal et. al. [7], además de reflejar los pasos, de forma muy similar a lo propuesto en la primera figura, se indica qué técnica se emplea para ejecutar cada uno de ellos.

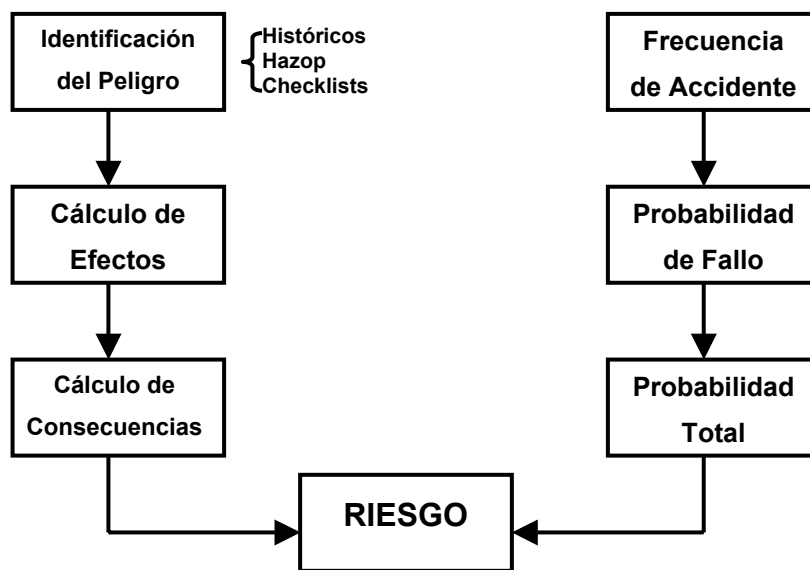


Figura 7.1. Etapas de un análisis de riesgo probabilista.

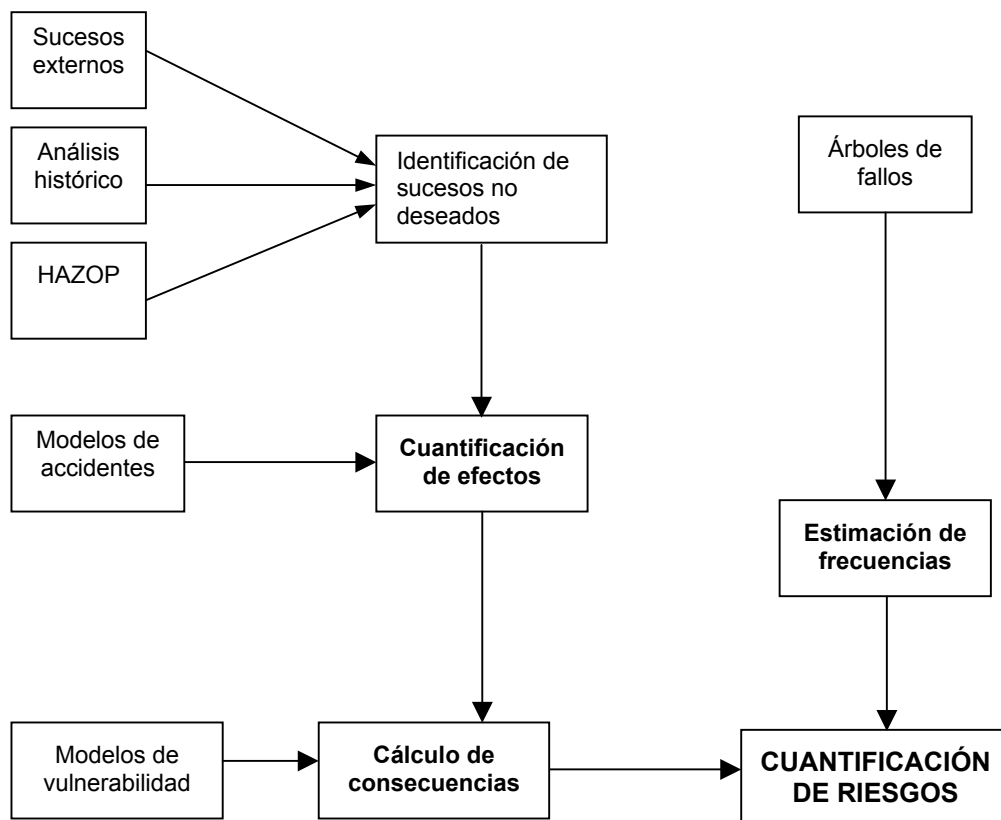


Figura 7.2. Etapas y herramientas a emplear en un análisis probabilista.

A partir de estas dos figuras se puede definir el índice de este capítulo:

- 7.1. Identificación del peligro
- 7.2. Cálculo de efectos
- 7.3. Análisis de consecuencias
- 7.4. Cálculo de frecuencias y probabilidades
- 7.5. Cuantificación del riesgo

Con el fin de clarificar el contenido que se propone para el análisis cuantitativo, a continuación se describe brevemente el contenido de cada apartado. La información que se debe sacar en cada bloque es importante, ya que se convierte en punto de partida del bloque siguiente.

En el apartado 7.1 se deben identificar los posibles escenarios accidentales. Anteriormente, en el capítulo 5, se indicó la importancia y relevancia de este apartado.

En el apartado 7.2 se debe hacer una estimación de los efectos que pueden causar en el entorno de la actividad los accidentes identificados previamente (consultar el Anexo II).

El análisis de consecuencias, punto 7.3, tiene como objetivo el de traducir los efectos calculados anteriormente en consecuencias sobre las personas, los bienes y el medio ambiente. Es decir, una vez calculados los valores de las magnitudes peligrosas en función de la distancia (cálculo de efectos), hay que determinar qué tipo de daños y lesiones causan en el entorno (consecuencias). De este apartado se obtiene un determinado valor de muertes por accidente.

A partir del listado de accidentes que pueden suceder en una actividad, el apartado 7.4 tiene como objetivo determinar la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los sucesos iniciadores, en años⁻¹, así como la frecuencia de que, una vez se produce el accidente, este pueda desencadenar una serie de escenarios determinados (formación de una nube tóxica, incendio de charco, dispersión en la atmósfera etc). De este apartado se debe obtener un resultado de años⁻¹ para cada accidente considerado.

Por último, haciendo uso de las consecuencias de cada accidente, y de la frecuencia de ocurrencia del mismo, se calcula el riesgo asociado a la actividad en estudio, en muertes/año.

7.1. Identificación del peligro

Este apartado se ha descrito en el capítulo 5 de la guía. Como se trata de un análisis probabilista, todos y cada uno de los peligros identificados en esta fase deben ser tenidos en cuenta.

7.2. Cálculo de efectos

En el Anexo II de esta guía están recopilados los modelos matemáticos y las ecuaciones más empleadas para el cálculo de efectos de los fenómenos peligrosos, así como los programas matemáticos de empleo mayoritario.

El resultado de estos cálculos es la magnitud peligrosa que describe al accidente (radiación térmica, sobrepresión, concentración del tóxico) en función de la distancia.

7.3. Análisis de consecuencias

Se entiende por análisis de consecuencias la evaluación cuantitativa de la evolución espacial y temporal de las variables físicas representativas de los fenómenos peligrosos, y sus posibles efectos sobre las personas, el medio ambiente y los bienes, con el fin de estimar la naturaleza y magnitud del daño.

Así, el objetivo principal del análisis de consecuencias es la delimitación de las áreas, en torno al origen de cada accidente, en las cuales se produce un determinado nivel de daño a las personas. Se trata pues de valorar la agresión que el accidente provoca sobre el medio que lo rodea.

Para acometer este objetivo, hay que recurrir a los criterios de letalidad. Existen unas ecuaciones, denominadas Probit, que relacionan las dosis (acumuladas al cabo de un determinado tiempo de exposición) con probabilidades de daño, normalmente muerte.

Así, inicialmente hay que determinar, por medio de una ecuación, el valor de la variable Probit, en función del tipo y magnitud el efecto físico ocasionado por el accidente y del tipo de daño. Posteriormente, a este valor de la variable

Probit se le asocia una determinada probabilidad de que se produzca el daño determinado en la fase anterior. Las ecuaciones y metodología a emplear son las propuestas por TNO [11] y por [7].

La ecuación Probit tiene la forma general: $\text{Probit} = a + b \ln V$

donde:

a, b = constantes que dependen del tipo de lesión y efecto físico causante del daño.

V = medida de la intensidad del efecto que causa el daño.

Una vez obtenido el valor de la variable Probit, es posible determinar el porcentaje de población expuesta que se verá afectada por el tipo de daño para el que se ha calculado la variable.

Para ello se hace uso de la siguiente tabla:

Tabla 7.1. Relación entre el porcentaje y el valor de la función Probit.

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	--	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.97	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
--	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

7.3.1. Consecuencias de incendios

En los análisis cuantitativos, la magnitud del daño se emplea para expresar la gravedad de una situación determinada. Para lesiones provocadas por radiación térmica, esto significa que es necesario un modelo en el que, en base a los cálculos de la radiación térmica recibida (intensidad y duración) permita determinar la naturaleza y magnitud de las lesiones que provoque, establecer la relación dosis-respuesta.

Para incendios, estas lesiones son quemaduras de primer, segundo y tercer grado, y muerte.

En base a los cálculos de la radiación térmica incidente, se emplean las funciones Probit para estimar la magnitud de los daños.

Las ecuaciones Probit de aplicación son las siguientes:

- Quemaduras de primer grado:

$$\text{Probit} = -39.83 + 3.0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}) \quad (7.1)$$

- Quemaduras de segundo grado:

$$\text{Probit} = -43.14 + 3.0186 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}) \quad (7.2)$$

- Mortalidad (sin protección):

$$\text{Probit} = -36.38 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}) \quad (7.3)$$

En estas ecuaciones, la variable t , que es el tiempo de exposición, debe ir expresado en segundos. La variable q , que es el flujo térmico, en W/m^2 . Es difícil establecer un tiempo de exposición determinado, ya que cada accidente supone unas condiciones específicas. Sin embargo, habitualmente se recomienda utilizar el valor de 30 segundos como promedio aproximado a la realidad.

En la práctica totalidad de los casos, las personas que están expuestas a la radiación térmica están vestidas. Las ropas tienen una influencia positiva a la hora de reducir la extensión de las quemaduras debidas al flujo de calor. Por

tanto, existe otra ecuación Probit para la mortalidad teniendo en cuenta la protección de la ropa:

- Mortalidad (con protección):

$$\text{Probit} = -37.23 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}) \quad (7.4)$$

A modo de ejemplo, se describe la siguiente situación:

Supongamos una dosis recibida por un individuo de $5 \cdot 10^6 \text{ s} \cdot (\text{W}/\text{m}^2)^{4/3}$

Aplicando la ecuación (7.1) se obtiene un valor de 6.73. Con este valor y a partir de la tabla 7.1 se tiene un porcentaje afectado del 96%.

Procediendo de igual forma, para las quemaduras de segundo grado (ecuación 7.2) se obtiene un porcentaje del 5%.

Para las quemaduras mortales sin protección (ecuación 7.3) se obtiene un porcentaje del 3%.

Se observa que la suma de los tres es mayor del 100%. Esto es debido a que en el porcentaje de quemaduras de primer grado, también están incluidos los que posteriormente sufrirán quemaduras de segundo y muerte. Así, del 96% de los afectados por quemaduras de primer grado, el $3\% + 5\% = 8\%$ fueron afectados posteriormente por segundo grado o muerte, por lo que el verdadero porcentaje de afectados exclusivamente por quemaduras de primer grado es $96 - 8 = 88\%$. Igualmente, del 5% afectado por quemaduras de segundo grado, el 3 muere, por lo que sólo el 2% sufre realmente nada más que quemaduras de segundo grado.

7.3.2. Consecuencias de explosiones

Las consecuencias de las explosiones representan un peligro potencial para las personas. Usualmente se dividen los efectos de las explosiones en un número de categorías. Una clasificación básica consiste en diferenciar entre efectos directos y efectos indirectos.

a) Efectos directos o primarios.

Son los causados por las ondas de sobrepresión que se generan en una explosión. Causan lesiones en órganos vitales del cuerpo humano.

b) Efectos indirectos.

Este tipo de efectos se subdividen en secundarios y terciarios:

- Secundarios.

Son los originados por los fragmentos y escombros que se desprenden en la explosión. Estos fragmentos pueden ser producidos directamente por la fuente de la explosión, o bien por otros objetos situados en los alrededores de la fuente que, debido a la sobrepresión, son expulsados con fuerza.

- Terciarios.

Como consecuencia de la onda de sobrepresión que causa la explosión, las personas pueden sufrir desplazamientos de todo el cuerpo y colisionar con objetos estacionarios o estructuras (impacto total del cuerpo).

El interés de realizar esta distinción de los efectos radica en el hecho de que los efectos directos afectan siempre a todas las personas situadas dentro del radio de acción de la sobrepresión. Por contra, en los efectos indirectos entra el factor de la probabilidad de que las personas sean afectadas.

Un efecto que no se clasifica en los grupos anteriores, pero que tiene que ser tenido en cuenta, es el de las lesiones que pueden sufrir las personas dentro de edificaciones cuando la estructura se derrumba parcial o totalmente como consecuencia de la explosión.

a) Efectos directos o primarios.

Las peores situaciones son aquellas en las que el cuerpo se encuentra cerca de una superficie plana, perpendicular a la dirección de propagación de la onda de sobrepresión, que se ve reflejada. En estas condiciones, lo que prevalece es la sobrepresión reflejada. Sin embargo, en muchas ocasiones estas condiciones no se darán, por lo que no se van a suponer sistemáticamente en los estudios.

La posición más probable, y que por tanto se tiene en cuenta en el cálculo de efectos directos, es cuando el cuerpo humano tiene su eje longitudinal perpendicular a la dirección de propagación de la sobrepresión (sin efecto de reflexión). El impacto es menor cuando el eje longitudinal del cuerpo está en la misma dirección que la propagación de la onda de choque.

- Mortalidad por hemorragia pulmonar.

La mortalidad por hemorragia pulmonar provocada por el aplastamiento de la caja torácica puede estimarse a través de la correspondiente ecuación Probit:

$$\text{Probit} = -77.1 + 6.91 \ln \Delta P \quad (7.5)$$

Siendo ΔP la sobrepresión en pascales (Pa).

- Rotura de los tímpanos.

Otro efecto directo es la rotura del tímpano. La ecuación Probit en este caso es:

$$\text{Probit} = -12.6 + 1.524 \ln \Delta P \quad (7.6)$$

b) Efectos indirectos.

- Secundarios

Efectos de fragmentos

Normalmente se consideran dos tipos de fragmentos: los que pueden cortar y punzar (por ejemplo, fragmentos de cristal) y los que sólo golpean (por ejemplo, fragmentos de escombros, ladrillos). Hay relativamente pocos datos fiables y significativos. Algunos de los valores que se han propuesto se recogen en las tablas 7.2 y 7.3.

Tabla 7.2. Criterio para el impacto de objetos no penetrantes de 4.5 kg contra la cabeza o contra la columna vertebral.

Velocidad del impacto (m/s)	Criterio
3	umbral de seguridad
4.5	daño probable
7	daño seguro

Tabla 7.3. Criterio para impactos de fragmentos de vidrio (10 g).

Velocidad del impacto (m/s)	Criterio
15	umbral para heridas en la piel
30	umbral para heridas graves
55	heridas graves (50%)
90	heridas graves (100%)

Las funciones Probit para la determinación de la probabilidad de muerte para efectos secundarios son las siguientes:

- Para fragmentos con masas mayores de 4.5 kg:

$$\text{Probit} = -13.19 + 10.54 \ln v_0 \quad (7.7)$$

siendo v_0 la velocidad de los fragmentos, en m/s.

- Para fragmentos con masas entre 0.1 y 4.5 kg:

$$\text{Probit} = -17.56 + 5.30 \ln S \quad (7.8)$$

donde:

$$S = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (7.9)$$

- Para fragmentos con masas entre 0.001 y 0.1 kg:

$$\text{Probit} = -29.15 + 2.10 \ln S \quad (7.10)$$

donde:

$$S = m v_0^{5.115} \quad (7.11)$$

- Efectos terciarios

Desplazamiento del cuerpo

La sobrepresión puede provocar que el cuerpo sea desplazado y posteriormente colisione contra el suelo o contra algún obstáculo. En este choque se pueden producir daños.

Está generalmente aceptado que en caso de colisión el cráneo es la parte más vulnerable del cuerpo. Por lo tanto se han buscado criterios para determinar la probabilidad de supervivencia cuando el cráneo choca contra un obstáculo rígido. En la tabla siguiente se exponen unos criterios de velocidad de impacto frente a probabilidad de fractura del cráneo.

Tabla 7.4. Probabilidad de fractura de cráneo.

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3.0	Seguridad
4.0	Umbral
5.5	50%
7.0	casi el 100%

También existen criterios para la determinación de la probabilidad de supervivencia en el caso de que todo el cuerpo colisione contra un obstáculo rígido.

Tabla 7.5. Probabilidad de muerte en caso de impacto total del cuerpo.

Velocidad de colisión (m/s)	Criterio
3.0	Seguridad
6.5	Umbral
16.5	50%
42.0	casi el 100%

A continuación se exponen las ecuaciones Probit recomendadas:

- Determinación de la probabilidad de muerte tras el impacto de la cabeza:

$$\text{Probit} = 5.0 - 8.49 \ln S \quad (7.12)$$

siendo:

$$S = \frac{2430}{\Delta P} + \frac{4 \cdot 10^8}{\Delta P \cdot i_s} \quad (7.13)$$

donde:

ΔP = sobrepresión en Pa

i_s = impulso de la onda de presión (Pa·s)

El impulso de la onda de presión se puede calcular, de forma simplificada, como sigue:

$$i_s = \frac{1}{2} \Delta P \cdot t_p \quad (7.14)$$

En esta última ecuación, ΔP es la sobrepresión, y t_p es el tiempo de duración de fase positiva de la onda de sobrepresión.

- La función Probit para la determinación de la probabilidad de muerte tras un impacto con el cuerpo es:

$$\text{Probit} = 5.0 - 2.44 \ln S \quad (7.15)$$

siendo:

$$S = \frac{7380}{\Delta P} + \frac{1.3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot i_s} \quad (7.16)$$

7.3.3. Consecuencias de nubes tóxicas

La vulnerabilidad de las personas a la inhalación de sustancias tóxicas está relacionada con la naturaleza de la sustancia y su dosis, o sea, depende de la concentración y del tiempo durante el cual la sustancia es inhalada.

En general, en los accidentes que liberan sustancias tóxicas, la concentración en un punto determinado varía en función del tiempo; por otra parte, la posición en que se encuentra el individuo también puede ser variable, especialmente si este se encuentra en el exterior (posibilidades de huida). La dosis inhalada puede expresarse por lo tanto mediante una función del tipo:

$$D = \int_0^t c(t)^n dt \quad (7.17)$$

La ecuación Probit para casos de muerte por inhalación de una sustancia tóxica tiene, por lo tanto, la forma siguiente:

$$\text{Probit} = a + b \cdot \ln \int_0^t c(t)^n dt \quad (7.18)$$

siendo:

a, b, n = constantes que dependen de la sustancia

t = tiempo de exposición, en segundos

c(t) = concentración del tóxico en función del tiempo, en ppm (volumétricas)

Los modelos de dispersión suelen dar las concentraciones tóxicas en mg/m^3 . El paso a ppm se puede realizar con la siguiente expresión:

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \frac{24.45}{M} \quad (7.19)$$

Según sea el grado de precisión con que se trabaja, la integral de esta expresión puede sustituirse por un sumatorio, cosa que en general es perfectamente aceptable; la ecuación Probit queda, pues, de la siguiente forma:

$$\text{Probit} = a + b \cdot \ln \sum (c^n \cdot t) \quad (7.20)$$

En la tabla 7.6 pueden observarse los valores que tienen las constantes a, b y n para distintas sustancias.

Tabla 7.6. Constantes para las ecuaciones Probit en la toxicidad letal.

Sustancia	a	b	n
Acroleína	-9.931	2.0488	1
Acrilonitrilo	-24.422	3.008	1.43
Amoníaco	-35.90	1.85	2
<i>Benceno</i>	-109.78	5.3	2
Bromo	-9.04	0.92	2
Monóxido de carbono	-37.98	3.7	1
Tetracloruro de carbono	-6.29	0.408	2.50
Cloro	-8.29	0.92	2
Formaldehido	-12.24	1.3	2
Ácido clorhídrico	-16.85	2.00	1.00
Ácido cianhídrico	-29.422	3.008	1.43
Ácido fluorhídrico	-35.868	3.354	1.00
Ácido sulfhídrico	-31.42	3.008	1.43
Bromuro de metilo	-56.81	5.27	1.00
Isocianato de metilo	-5.642	1.637	0.653
Dióxido de nitrógeno	-13.79	1.4	2
Fosgeno	-19.274	3.686	1
Óxido de propileno	-7.415	0.509	2.00
Dióxido de azufre	-15.67	2.10	1.00
Tolueno	-6.794	0.408	2.50

El tiempo de exposición para una nube tóxica varía en relación al tipo de fuga que la origina. Así, si la fuga es instantánea, el tiempo de exposición es el que la nube tarda en pasar por la posición en la que se encuentre el individuo. Se puede hacer una estimación bastante acertada a partir de la velocidad del viento y el tamaño de la nube. Para fugas continuas, existen grandes diferencias entre la situación de que se produzca evacuación o que no se produzca, u órdenes de confinamiento. En caso de evacuación, la exposición depende del tiempo que se emplee en activar el plan de emergencia y proceder a desplazar a la población del lugar afectado. Si no hay evacuación, la exposición puede ser muy prolongada, incluso con tiempos de más de una hora, aunque puede haber confinamiento en las viviendas con la consiguiente reducción de la concentración en el aire. En cualquier caso, cada situación debe ser contemplada y analizada de forma individual.

7.4. Cálculo de frecuencias y probabilidades

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

- **Iniciadores:** en esta categoría se incluyen sucesos externos, fallos de operación, humanos o pérdida de inventario. Estos sucesos tienen una determinada frecuencia de ocurrencia en el tiempo, generalmente expresada en ocasiones por año.
- **Los sucesos que condicionan la evolución de un suceso iniciador:** en esta categoría se incluyen indisponibilidades del sistema de seguridad, fenómenos físicos (ignición, explosión, etc). Estos sucesos se caracterizan por su probabilidad de ocurrencia.

Un accidente se provoca cuando concurren una serie de factores o fenómenos básicos. Esta serie de fenómenos básicos concatenados dan lugar al accidente.

La frecuencia de un accidente concreto, por ejemplo la rotura de un depósito, se puede determinar acudiendo a bibliografía especializada, en la que existen listas de frecuencias de todo tipo de accidentes, basados en estudios estadísticos y bases de datos de accidentes pasados. En el Anexo IV se proporciona una amplia base de datos de frecuencias de accidentes y fallos de componentes. Alternativamente, un determinado accidente (por ejemplo, la explosión de un reactor) puede ser descompuesto en sucesos intermedios, hasta llegar a los sucesos básicos. Esta descomposición es útil ya que indica la cadena de eventos que tiene que ocurrir para provocar el accidente. Los pilares de esta descomposición son los sucesos básicos, que de nuevo se estiman a partir de bases de datos (Anexo IV). Esta forma de calcular la frecuencia de un accidente recibe el nombre de árbol de fallos, que a continuación se describe.

En caso de sucesos complejos, como la rotura de un reactor, los árboles de fallos son buenos para desengranar la cadena de sucesos, desde los iniciales, que llevan al suceso complejo. Para sucesos de naturaleza más simple, como la rotura de una tubería con producto tóxico, o el fallo de una válvula, los árboles de fallos no son necesarios, ya que las frecuencias de ocurrencia de estos sucesos simples se encuentran perfectamente recogidas en el Anexo IV.

Bien sea a través de un árbol de fallos, o bien mediante datos bibliográficos, la información que se tiene que obtener de este apartado es la frecuencia de ocurrencia de un determinado suceso, como la ya citada rotura de un depósito.

7.4.1. Método del árbol de fallos [7]

7.4.1.1. Descripción y objetivo

La elaboración de árboles de fallos (Fault Tree, FT) es una técnica de análisis creada por Bell Telephone Laboratories al inicio de la década de los sesenta.

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

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

La ventaja principal de esta técnica es su representación gráfica, que facilita la comprensión de la causalidad; de hecho, un árbol de fallos como tal es un modelo gráfico en forma de árbol invertido que ilustra la combinación lógica de fallos parciales que conducen al fallo del sistema. La relación lógica entre dos sucesos es representada por los operadores lógicos Y, O, INH (el operador condicional) utilizados en el álgebra booleana.

7.4.1.2. Definiciones

Accidente o fallo del sistema (denominado también suceso no deseado o top event): son situaciones excepcionales objeto de estudio mediante la elaboración y análisis de árboles de fallos.

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

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

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

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

- La intervención operativa es la última intervención del operador para evitar que se produzca el suceso no deseado.

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

La figura 7.3 muestra la simbología de los sucesos y las puertas u operadores lógicos utilizados en los árboles de fallos.

La metodología de elaboración y de análisis del árbol es la siguiente:

7.4.1.3. Elaboración

El primer paso para la elaboración de un árbol de fallos es un estudio previo del sistema o proceso que se quiere analizar con el fin de determinar los incidentes susceptibles de ser analizados y evaluados. Este estudio suele realizarse con otras técnicas de identificación, como el análisis histórico, checklists o el análisis HAZOP. Una vez determinados los accidentes que se quieren desarrollar, deben establecerse los límites de la instalación: límites físicos, nivel de detalle de la resolución, condiciones iniciales de funcionamiento y otros supuestos.

Seguidamente, y de manera secuencial, es necesario identificar los fallos de los elementos y las relaciones lógicas que conducen al accidente. La identificación de los sucesos y las cadenas de sucesos se hace partiendo de la eventualidad no deseada y deduciendo la combinación lógica de incidentes que lo pueden desencadenar de forma recurrente. El primer paso es la determinación de los sucesos más inmediatos necesarios y suficientes para que se produzca el fallo del sistema. Con esta forma de operar, para cada nuevo hecho planteado, se generan los árboles de fallos. El proceso finaliza cuando todos los fallos identificados son primarios y no es posible determinar sus causas.

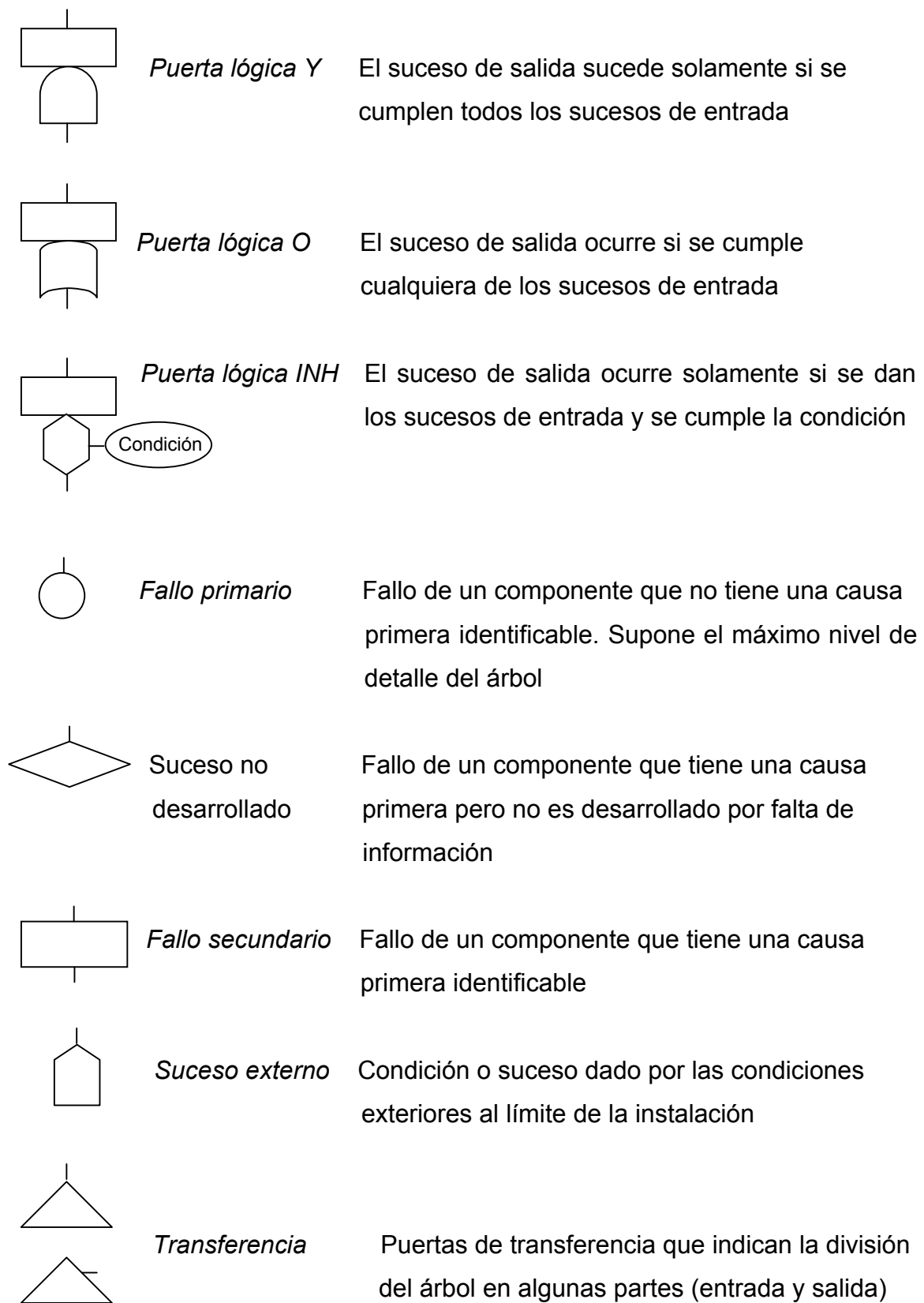


Figura 7.3. Simbología utilizada en los árboles de fallos.

7.4.1.4. Análisis

Los árboles de fallos contienen la información de cómo la concatenación de diferentes fallos conduce al fallo global del sistema. Desgraciadamente, esta información no resulta muy evidente en árboles de fallos de tamaño considerable y debe, pues, resolverse el modelo lógico que representa el árbol. Esta resolución se denomina análisis del árbol y consiste principalmente en encontrar la combinación de fallos primarios que pueden producir el accidente estudiado. El proceso de resolución implica la aplicación del álgebra de Boole y permite, pues, el análisis cualitativo y cuantitativo. Esta información permite implementar y priorizar medidas para la mejora de la seguridad y la fiabilidad del sistema.

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

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

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

Actualmente, la resolución de los árboles de fallos se hace habitualmente mediante programas de ordenador. Hay una variada oferta de programas comerciales para la resolución de árboles de fallos; entre los más extendidos

en Europa destacan el SALP-PC y el ISPRA-FTA, elaborados por el Joint Research Centre de la Comisión Europea, y el PSAPACK, elaborado por la International Atomic Energy Agency.

7.4.1.5. Requisitos y limitaciones

La elaboración de árboles de fallos requiere una elevada formación técnica, junto con un conocimiento detallado del sistema o proceso y de sus modos de fallo. Además, se requiere que por lo menos la información sobre el proceso sea completa en las partes más esenciales. El nivel de detalle de la información disponible condiciona el nivel de detalle del análisis; el desarrollo progresivo del árbol requiere aún más nivel de detalle.

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

7.4.1.6. Resultados y aplicabilidad

El interés de los árboles de fallos para la identificación de riesgos reside en la capacidad de identificar la combinación de fallos críticos del sistema que produce el accidente, es decir, los conjuntos mínimos de corte. Esto permite priorizar las medidas correctivas para evitar el desarrollo del accidente. Normalmente, los árboles de fallos se utilizan para estudiar situaciones particulares que requieren de un estudio más detallado y que otras técnicas de identificación han señalado como críticas.

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

En el Anexo III se indica un ejemplo de resolución cuantitativa de un árbol de fallos.

Ya se dispone, bien a partir de un árbol de fallos, bien con datos bibliográficos (Anexo IV) de la frecuencia de ocurrencia del accidente en estudio, en años⁻¹ (en el ejemplo, una rotura catastrófica de un reactor).

Una vez se tiene esta frecuencia, hay que determinar la probabilidad de que se desarrolle un accidente u otro (por ejemplo, la rotura del reactor puede haber sido provocada por una explosión, o puede haber producido la fuga de un componente que puede incendiarse, formar una nube tóxica, dispersarse en la atmósfera etc). La herramienta empleada para la determinación de la evolución de un accidente, una vez este se ha producido, es el árbol de sucesos.

7.4.2. Método del árbol de sucesos [5]

7.4.2.1. Descripción

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

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

7.4.2.2. Construcción del árbol

La construcción del árbol comienza por la identificación de los N factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantean sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el

éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo (figura 7.4).

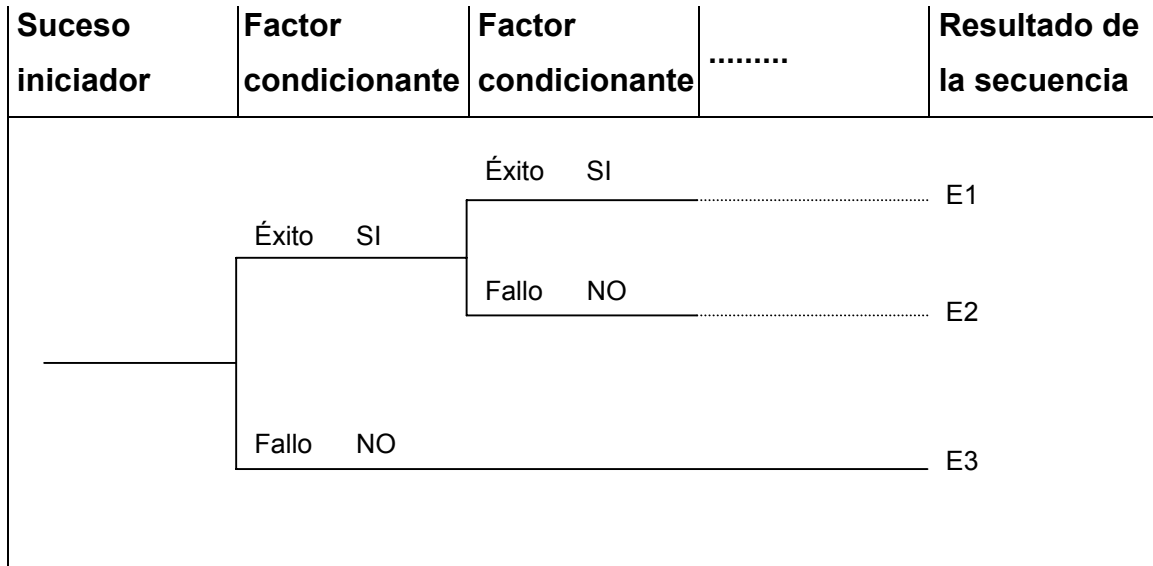


Figura 7.4. Esquema general de un árbol de sucesos.

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

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

7.4.2.3. Evaluación del árbol

El árbol de sucesos así definido tiene las siguientes características:

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

- Los sucesos complementarios de estos tienen asociados una probabilidad de $1-p_i$, $i=1,N$.

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

$$f_s = f \cdot \prod_{i,j} p_i \cdot (1-p_j) \quad \text{con} \quad i=1,N_i \quad j=1,N_j \quad (7.20)$$

siendo:

N_i = número de sucesos de éxito de la secuencia s .

N_j = número de sucesos de fallo de la secuencia s .

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

$$\sum f_s = f$$

Los valores de las probabilidades p_i de los sucesos condicionantes (como ignición directa o no, formación de nube tóxica o no, etc) se pueden obtener a partir del Anexo IV.

7.4.2.4. Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

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

Inconvenientes:

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

En el Anexo III se indica un ejemplo de resolución cuantitativa de un árbol de sucesos.

7.5. Cuantificación del riesgo

Hay diversas definiciones de riesgo. La Dirección General de Protección Civil, en su guía “Metodologías para el análisis del riesgo, visión general” [5] proporciona la siguiente definición:

Riesgo individual: frecuencia anual de daño como consecuencia de un accidente, para una persona situada permanentemente en un punto determinado del entorno.

La OMAIA [1] especifica, en el punto 3 apartado b) del artículo 33, que el riesgo individual existente en el entorno no debe superar el valor de 10^{-6} víctimas/año.

La cuantificación del riesgo debe proporcionar como resultado unas curvas de isorriesgo, que consisten en unir puntos del espacio con igual nivel de riesgo individual. Una vez obtenidas estas curvas, se deberá cumplir que el valor de 10^{-6} víctimas/año quede dentro de los límites de la actividad. Por lo tanto, el objetivo principal de esta fase consiste en combinar los resultados obtenidos en las anteriores etapas calculando el riesgo asociado a cada una de las hipótesis accidentales contempladas.

A continuación se describe el procedimiento para determinar el riesgo de la actividad en estudio [12].

7.5.1. Definición de la malla

El cálculo del riesgo individual comienza con la definición de una malla en todo el área de interés, que se llama malla de cálculo. El centro de cada celda de la malla se llama punto de malla, y el riesgo individual se calcula en cada uno de los puntos de malla separadamente. El tamaño de las celdas de la malla debe ser suficientemente pequeño como para no influir en los resultados, es decir, el riesgo individual no debe variar mucho dentro de la celda. Como orientación, si las distancias a las que se manifiestan los efectos de cada escenario son menores o del orden de 300 m, el tamaño de la celda no debe ser mayor que 25 x 25 m. Para distancias de los efectos mayores de 300 m, se

pueden utilizar celdas de 100 x 100 m. También se puede usar una combinación de celdas de 25 x 25 hasta los 300 m, y a continuación de 100 x 100 m.

A continuación, se debe determinar la población existente en cada una de las celdas. La localización de la población se realiza siguiendo las bases indicadas en el capítulo 9. Cada punto de localización de personas (por ejemplo, una casa o un grupo de casas) se asigna a una celda, y la población se distribuye uniformemente a lo largo de toda la celda, de forma tal que se tenga densidad de población uniforme en todo el cuadrante. Puede ocurrir que haya grupos de viviendas que ocupen varias celdas. En estos casos, se recomienda la distribución de la población a lo largo de un número representativo de celdas.

Finalmente se debe asociar una probabilidad de ignición a cada celda. Todas las fuentes de ignición dentro de una misma celda se combinan en una sola fuente localizada en el centro de la celda correspondiente.

7.5.2. Cálculo del riesgo individual

La definición más ampliamente aceptada y empleada por muchos profesionales del riesgo es la que lo define como la frecuencia prevista para un determinado suceso por la magnitud de las consecuencias probables del mismo:

Riesgo = frecuencia · magnitud consecuencias

siendo:

frecuencia = frecuencia de ocurrencia del accidente en estudio, en años⁻¹.

magnitud consecuencias = daño esperado por el accidente estudiado, en muertes/accidente.

Así, si un accidente ocurre una vez cada 50 años, y cuando sucede se producen 20 muertos, su riesgo será:

$$\text{Riesgo} = \left[\frac{1 \text{ accidente}}{50 \text{ año}} \right] \cdot \left[20 \frac{\text{muertos}}{\text{accidente}} \right] = 0.4 \frac{\text{muertos}}{\text{año}}$$

Los pasos que hay que realizar para el cálculo del riesgo individual, RI, en un punto de malla, son:

1. Seleccionar un suceso accidental S. La frecuencia de que se produzca este suceso viene expresada en años⁻¹, y se calcula de acuerdo a lo expuesto en el apartado 7.4.
2. Seleccionar una clase de estabilidad, K (ver el cálculo de efectos, apartado II.3.2.3. del Anexo II), con probabilidad P_K. Seleccionar una dirección del viento, φ, con probabilidad condicional P_φ. Esta probabilidad condicional es la probabilidad de obtener la dirección del viento φ dada la clase de estabilidad K. Con frecuencia se puede obtener el producto P_K · P_φ, disponiendo de la probabilidad de que se tenga estabilidad K con dirección del viento φ simultáneamente.
3. En el caso de que se produzcan fugas de sustancias inflamables, se debe seleccionar un tipo de ignición, i, con probabilidad de ignición P_i. Las probabilidades de ignición están descritas en el Anexo IV.
4. Calcular la probabilidad de muerte en el punto de malla, P_d, dado el suceso no deseado S, el tipo de estabilidad atmosférica K, la dirección del viento φ y el tipo de ignición, i (para sustancias inflamables). El cálculo de la probabilidad de muerte P_d está indicado en el Anexo IV.
5. Calcular la contribución de todos los factores anteriores al riesgo individual en el punto de malla, $\Delta RI_{S,K,\varphi,i} = f_S \cdot P_K \cdot P_\varphi \cdot P_i$ año⁻¹ siendo f_S la frecuencia en años⁻¹ del suceso no deseado.
6. Repetir los pasos 3-5 para todos los tipos de ignición, pasos 2-5 para todas las estabilidades atmosféricas y direcciones del viento, y pasos 1-5 para todos los sucesos no deseados. El riesgo individual total, IR, en el punto de malla se calcula como:

$$RI_{TOT} = \sum_S \sum_K \sum_\varphi \sum_i \Delta RI_{S,K,\varphi,i} \cdot P_d \quad \text{muertes/año}$$

Tal y como indica la OMAIA [1], el valor de riesgo individual resultante no puede exceder de 10⁻⁶ muertes/año en el entorno. Por lo tanto, una vez

calculado el riesgo individual en cada punto de malla, se deben unir todos los puntos con el mismo nivel de riesgo. De esta forma se obtienen las curvas de isorriesgo. Si la curva correspondiente a 10^{-6} muertes/año sobrepasa los límites de la actividad, no se están cumpliendo los requisitos marcados por dicha Ordenanza.

8. Efecto dominó

8. Efecto dominó

El efecto dominó representa la concatenación de posibles accidentes, hecho que puede suponer una multiplicación de las consecuencias previstas.

Para todos los escenarios accidentales identificados en el capítulo 5, se deben considerar las consecuencias que aquellos puedan provocar sobre otros equipos de la instalación. Se considerará como efecto dominó cualquier fenómeno que provoque la propagación de la siniestralidad o consecuencias de un escenario accidental más allá de los límites o efectos que se tendrían en consideración si este escenario se produjera de forma aislada, dadas las mismas condiciones.

Según el Instituto Químico de Sarriá [13], en el efecto dominó se definen dos tipos básicos de escenarios accidentales:

- Escenario propagador. Es aquel escenario que puede provocar un efecto dominó, es decir, las consecuencias del escenario propagador provocan daños a las instalaciones cercanas en una magnitud suficiente como para que se puedan considerar los equipos afectados como nuevos escenarios accidentales con consecuencias propias.
- Escenario receptor. Cualquier escenario que reciba las consecuencias de otro escenario accidental y origine consecuencias nuevas. Un escenario receptor puede actuar al mismo tiempo como propagador. Al escenario receptor no propagador se le denomina escenario final.

Se pueden definir tres tipos de sucesos iniciadores:

1. Incendio
2. Explosión
3. proyectiles

Estos sucesos iniciadores pueden generar efectos de alcance suficientemente grande como para producir consecuencias de daños en otras unidades o equipos y provocar el efecto dominó. Se consideran los siguientes efectos:

- a. Efecto de la temperatura sobre objetos. Este fenómeno se produce en el caso del cálculo de la radiación térmica. Se puede calcular el alcance de la

llama así como la potencia de la misma a lo largo del tiempo, para ver los efectos que tiene sobre los equipos cercanos. Tras este estudio, quizás se compruebe la necesidad de instalar cortinas de agua o sprinklers.

- b. Efectos físicos y tecnológicos. Las ondas de choque o sobrepresión que aparecen en caso de detonación o deflagración, así como las consecuencias que un accidente puede tener sobre la red de distribución eléctrica de otras instalaciones o sistemas de control centralizado se han de tener en cuenta a la hora de detectar posibles efectos dominó.
- c. Impacto de proyectiles. Este fenómeno se produce en escenarios en los que se pueden generar sobrepresiones, dado que implica la proyección de objetos a cierta distancia del lugar del accidente. Debido a los proyectiles, se puede plantear la necesidad de instalar pantallas protectoras en los sistemas críticos.

Se han consensuado los siguientes valores límite para la consideración de estos efectos:

Tabla 8.1. Valores límite para la evaluación del efecto dominó.

Tipo de efecto físico peligroso	Zona dominó 1		Zona dominó 2	
	Consecuencias	Valor límite	Consecuencias	Valor límite
Radiación térmica	Fallo de recipientes y equipos protegidos	37 kW/m ²	Fallo de recipientes y equipos no protegidos	12 kW/m ²
Sobrepresión	Fallo de recipientes y equipos a presión	350 mbar	Fallo de recipientes y equipos atmosféricos o a baja presión	160 mbar
Proyectiles	Impacto con daños	100% alcance de fragmentos		

9. Riesgo social

9. Riesgo social

- Procedimiento y cálculo

El riesgo social representa la frecuencia con la que se produce un accidente que cause la muerte de N o más seres humanos simultáneamente. También puede definirse como la probabilidad por año de que un grupo de personas sea víctima de un determinado accidente al mismo tiempo. Se supone que las personas involucradas en el accidente tienen algún tipo de protección en el momento del accidente. El resultado de un análisis de riesgo social se representa en curvas FN, donde N es el número de muertes y F es la frecuencia acumulada de accidentes con N o más muertes.

Para calcular el riesgo social, inicialmente hay que conocer la distribución de la población en los alrededores del punto donde se produce el accidente.

9.1. Cálculo de la densidad de población

Para la determinación del nivel de lesiones que se producen en la población, es necesario disponer de datos sobre la presencia de personas en los alrededores, y sobre su permanencia y movilidad.

Con el fin de determinar el número de personas afectadas, es necesario pues disponer de datos de la densidad de población en los alrededores de la actividad. Para realizar estimaciones, se realiza una distinción en función de la zona de estudio:

- Áreas industriales, subdivididas en instalaciones industriales y oficinas.
- Áreas residenciales: subdivididas en escasamente pobladas y densamente pobladas.
- Áreas de recreo.

Al mismo tiempo, se deben hacer estimaciones de la presencia de personas dentro y fuera de las casas, así como la distribución de día y de noche.

A la hora de realizar los cálculos, es aconsejable disponer de los datos precisos de densidad de población de la zona en estudio. Si por cualquier eventualidad no se puede disponer de estos datos, a continuación se muestran unas tablas que pueden orientar sobre estos valores.

Tabla 9.1. Densidades de población según el tipo de área industrial.

Tipo de área	Extensión del establecimiento (ha)	Número de trabajadores por establecimiento	Densidad de población (personas/ha)
Agricultura y pesca	2	6	3
Minería	10	30	3
Industria	0.6	25	40
Servicios públicos	9	50	6
Construcción	0.16	12	75
Comercio	0.1	4	40
Hoteles y restaurantes	0.4	3	8
Talleres de reparación	0.1	5	50
Transporte y almacenamiento	0.7	11	15
Bancos y seguros	0.1	8	85
Otros servicios (exceptuado educación y hospitales)	0.1	3.5	35

Tabla 9.2. Densidades de población según el tipo de área residencial.

Tipo de área	Densidad de población (personas/ha): valores medios recomendados
Natural (bosques, agua, páramo, etc)	0
Agrícola	1
Casas esparcidas	5
Zonas residenciales tranquilas (0% de edificios altos)	25
Áreas residenciales activas (25% de edificios altos)	70
Áreas urbanas (85% de edificios altos)	120

El número de personas presentes en áreas de recreo es muy difícil de estimar. Las personas no siempre están presentes en este tipo de áreas, por lo que hay que estimar probabilidades de presencia/ausencia. Esta presencia está fuertemente condicionada por la estación del año, condiciones climatológicas y día de la semana.

A la hora de calcular la presencia de personas dentro y fuera de las viviendas, y la distribución día/noche, TNO [11] emplea los siguientes valores:

Durante el día: 80% dentro de la vivienda, 20% fuera.

Durante la noche: 95% dentro de la vivienda, 5% fuera.

Según diversos estudios, una persona, de forma media, distribuye su tiempo a lo largo del día de la siguiente manera:

En casa, dentro de la vivienda: 69% del día.

En otros lugares, en el interior: 24% del día.

En el exterior, incluyendo desplazamientos: 7% del día.

9.2. Cálculo del riesgo social

A continuación se describe el procedimiento de cálculo del riesgo social.

Para este procedimiento es válido el punto 7.5.1 de definición de la malla, expuesto anteriormente en el apartado de cálculo del riesgo individual. Una vez definida la malla, y para una combinación determinada de suceso no deseado, clase de estabilidad atmosférica, dirección del viento y tipo de ignición, se calcula el número esperado de muertes para cada punto de malla. A continuación, se calcula el número de muertes esperadas N para cada combinación de suceso, clase de estabilidad y dirección del viento separadamente. Por último, se determina la frecuencia acumulada de tener más de N muertes [12].

Los pasos concretos que se deben realizar para el cálculo del riesgo social son:

1. Seleccionar:

- Un suceso no deseado S , con frecuencia de ocurrencia f_s (año⁻¹).
- Una clase de estabilidad K , con probabilidad P_K .
- Una dirección del viento φ , con probabilidad condicional P_φ .
- Un tipo de ignición i , con probabilidad condicionada P_i (para inflamables, ver Anexo IV).

La probabilidad de la clase de estabilidad K con dirección del viento φ simultáneamente se obtiene con el producto: $P_K \cdot P_\varphi$.

2. Seleccionar una celda de la malla. El número de personas en esa celda es N_{celda} .
3. Calcular la fracción de muertes, F_d , en la celda, dado el suceso no deseado S , el tipo de estabilidad atmosférica K , la dirección del viento φ y el tipo de ignición i . Este cálculo está desarrollado en el Anexo IV, y se divide en sustancias tóxicas y sustancias inflamables.
4. Calcular el número esperado de muertes en la celda, $\Delta N_{S,K,\varphi}$, dado el suceso S , la estabilidad K , la dirección del viento φ y el tipo de ignición i .

$$\Delta N_{S,K,\varphi,i} = F_d \cdot N_{\text{celda}}$$

El número de muertes esperadas en la celda no tiene por qué ser un número entero.

5. Repetir los pasos 2-4 para todas las celdas de la malla. Calcular la contribución de todas las celdas al número total de muertos, $N_{S,K,\varphi,i}$:

$$N_{S,K,\varphi,i} = \sum_{\text{todas las celdas}} \Delta N_{S,K,\varphi,i}$$

6. Calcular la frecuencia $f_{S,K,\varphi,i}$ de la combinación de suceso no deseado S, clase atmosférica K, dirección del viento φ y tipo de ignición i:

$$f_{S,K,\varphi,i} = f_s \cdot P_K \cdot P_\varphi \cdot P_i$$

7. Repetir los pasos 1-6 para todos los sucesos no deseados S, estabilidades K, direcciones del viento φ y tipos de ignición i. La curva FN se construye acumulando todas las frecuencias $f_{S,K,\varphi,i}$ para las cuales $N_{S,K,\varphi,i}$ es igual o mayor que N:

$$F_N = \sum_{S,K,\varphi} f_{S,K,\varphi} \quad \text{con } N_{S,K,\varphi} \geq N$$

En la representación de estas curvas, el eje x es el número de muertes, N, en escala logarítmica, con un valor mínimo de 1. El eje y representa la frecuencia acumulada de los accidentes con número de muertes N o mayor. La frecuencia acumulada se indica en escala logarítmica, con un valor mínimo de 10^{-9} años⁻¹.

10. Bibliografía

10. Bibliografia

- [1] *Ordenança Municipal d'Activitats i d'Intervenció Integral de l'Administració Ambiental de Barcelona (OMAIA), de 29 de març de 2001.*
- [2] Guia per a l'elaboració de la documentació tècnica referent a riscos greus. Euro Geotècnia, S.A. 2002.
- [3] RD 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.
- [4] RD 363/1995, por el que se aprueba el reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas.
- [5] Dirección General de Protección civil. Ministerio de Justicia e Interior. 1994, Guías Técnicas:
- [5.1] Metodologías para el análisis de riesgos. Visión General.
 - [5.2] Métodos cualitativos para el análisis de riesgos.
 - [5.3] Métodos cuantitativos para el análisis de riesgos.
- [6] *C.M. Pietersen, B.F.P. van het Veld. "Risk assessment and risk contour mapping". J. Loss Prev. Process Ind., Vol 5, No 1. 1992.*
- [7] J. Casal, H. Montiel, E. Planas, J.A. Vílchez. "*Análisis del riesgo en instalaciones industriales*". Edicions UPC. 1999.
- [8] The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO). Committee for the Prevention of Disasters. "*Methods for determining and processing probabilities*". CPR 12E (Red Book). 1997.

- [9] Directiva 96/82/CE del Consejo, de 9 de diciembre de 1996, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. (Seveso II).
- [10] Resolución de 30 de enero de 1991, de la Subsecretaría por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la Directriz básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico (DBRQ).
- [11] The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO). Committee for the Prevention of Disasters. *“Methods for the determination of possible damage”*. CPR 16E (Green Book). 1992.
- [12] The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO). Committee for the Prevention of Disasters. *“Guidelines for quantitative risk assessment”*. CPR 18E (Purple Book). 1999.
- [13] Institut Químic de Sarrià. “Base de càlcul per a escenaris d’accident”. 2002.
- [14] The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO). Committee for the Prevention of Disasters. *“Methods for the calculation of physical effects”*. CPR 14E (Yellow Book). 1997.