

Análisis de consecuencias: incendios y explosiones

«¡Ánimo, amigos! ¡Éstas son las luminarias de la victoria!»

Gonzalo Fernández de Córdoba, llamado «El Gran Capitán», a sus tropas en la batalla de Ceriñola (1503), inmediatamente después de que un impacto de la artillería enemiga provocase una explosión en su polvorín.

Introducción

Basta una mirada a nuestro alrededor para caer en la cuenta de la gran cantidad de productos inflamables como plásticos, fibras textiles, papel, materiales de construcción, etc., que nos rodean. La mayor parte de ellos han sido fabricados por industrias de proceso, pero cuando se piensa en sus características de inflamabilidad se considera sólo su uso, no el proceso de fabricación previo. En este capítulo nos ocuparemos de la inflamabilidad de distintos materiales en tanto en cuanto intervienen en procesos de fabricación en la industria química. Nos interesa, por tanto, conocer los riesgos de incendio y explosión de los gases, líquidos y sus vapores, polvos, aerosoles, etc., que se usan en proceso. Otros elementos, como los materiales de construcción utilizados en la industria, que también requieren precauciones contra incendios, caen fuera del objeto de este libro.

Tanto incendios como explosiones, en ese orden, son los tipos de accidentes más frecuentes en la industria química, seguidos por las emisiones de sustancias tóxicas. Esto no es sorprendente si se considera la cantidad y características de las sustancias comúnmente procesadas. En la tabla 3.1 se muestra una distribución porcentual de los incendios industriales, según el tipo de material involucrado (1). Desde el punto de vista del análisis de riesgos, la evaluación de consecuencias de incendios y explosiones, de la que se trata en este capítulo, requiere el conocimiento de datos que definan el escenario en el que ocurre en incendio o la explosión. Necesitamos saber, por ejemplo, cuánto material dentro de

**Tabla 3.1. Tipo de material inflamado en incendios industriales
(% del número de casos)**

a) Industrias en general	
MATERIAL	(%)
Madera o papel	27,9
Líquidos inflamables o combustibles	22,1
Materias químicas, metales o plásticos	15,7
Textiles	10,3
Productos naturales	9,6
Gas	6,4
Sólidos volátiles	5,4
Materiales con aceite	2,2
Otros tipos indeterminados o no informados	0,4
b) Industria química	
SEGÚN EL ESTADO FÍSICO	
Gas	13
Vapor	20
Líquido	25
Sólido	29
Desconocido	13
SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL	
HIDROCARBUROS: 29,5	
Gas	4
Líquido/vapor	23
Sólido	2,5
OTROS PRODUCTOS: 70,5	
Líquido/vapor orgánico	20
Sólidos orgánicos	9
Sólidos celulósicos	8
Hidrógeno	9
Acero	2,5
Azufre	1
Desconocido	21

los límites de inflamabilidad existe en una nube en el momento de la explosión, o cuanto líquido inflamable existe en el derrame que se ha incendiado. Por ello es frecuente que los modelos para la determinación de efectos que se utilizan en este capítulo partan de los resultados de los modelos de emisiones descritos en el capítulo siguiente.

Un ingeniero químico, o cualquier técnico de la industria química, debe tener una formación que le permita:

- Conocer las características de los distintos materiales en cuanto a incendios y explosiones.
- Estimar las consecuencias de un incendio o de una explosión, en un escenario determinado.
- Proponer procedimientos para reducir el riesgo de incendios y explosiones o, en su caso, mitigar sus efectos.

La estructura general de este capítulo sigue el orden de los dos primeros apartados, mientras que algunos aspectos del tercero se tratan en los capítulos 7 a 9.

Características de inflamabilidad

El término «inflamabilidad» hace referencia a la mayor o menor facilidad con que una sustancia puede arder en aire o en algún otro gas que pueda servir como comburente. La combustión es una reacción química en la que se libera energía a partir de la oxidación de un material determinado, y el fuego es una consecuencia visible, en determinadas circunstancias, de esta combustión. Se admite con carácter general que la combustión convencional ocurre en la fase vapor, lo que significa que los líquidos deben evaporarse o los sólidos descomponerse y volatilizarse antes de entrar propiamente en combustión.

Los elementos necesarios y suficientes para que se produzca un incendio se esquematizan en el llamado «triángulo del fuego», que se representa en la figura 3.1. Si falta cualquiera de sus elementos, el incendio no puede producirse. Así, un incendio no puede ocurrir si no hay combustible, o si no está presente en la proporción y cantidad requerida, si no hay oxígeno u otro comburente en las cantidades adecuadas, o si no hay una fuente de ignición de suficiente potencia.

Incendios y explosiones presentan muchas características similares, siendo su principal diferencia la velocidad a la que se produce la liberación de energía durante la combustión del material, que es mucho menor en los fuegos que en las explosiones, ya sean estas deflagraciones o detonaciones. Existe, además, una relación práctica de causa a efecto, y es frecuente que un incendio dé origen a explosiones y viceversa.

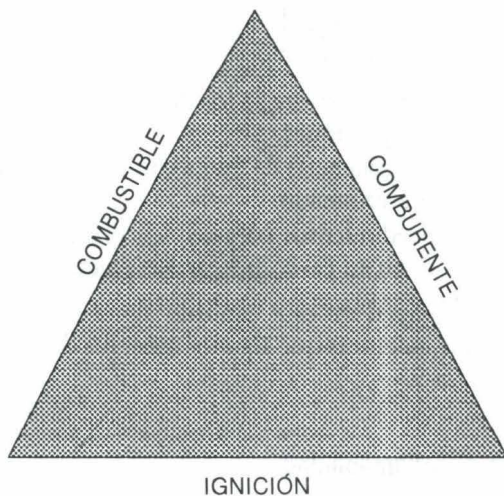


Figura 3.1. *Triángulo del fuego.*

El *punto de destello* o *punto de flash* (*flash point*) de una sustancia, t_f , es la temperatura mínima a la cual se produce el suficiente vapor como para formar, cerca de la superficie de un líquido combustible, una mezcla con aire que esté dentro de los límites de inflamabilidad. El término «punto de flash» sólo tiene sentido aplicado a líquidos estables en aire, o a sólidos que fundan antes de comenzar a arder. Existen métodos normalizados para la determinación de puntos de flash, que son diferentes dependiendo de las características del líquido a estudiar (ver la norma norteamericana ASTM E502). Por lo general, los métodos que utilizan recipientes cerrados (habitualmente empleados con sustancias de bajo punto de flash) proporcionan valores de t_f inferiores a los que se obtienen con recipientes abiertos, aunque las diferencias son pequeñas. En todos los casos el procedimiento involucra un calentamiento lento del líquido en contacto con aire, con aplicación de una fuente de ignición a intervalos predeterminados, registrándose el momento en el que se produce la inflamación. El punto de flash generalmente aumenta al aumentar la presión total. Se puede realizar una estimación grosera del valor del punto de flash de hidrocarburos mediante la ecuación (2):

$$t_f = 0,683 t_B - 71,7 \quad [3.1]$$

donde tanto t_f como la temperatura de ebullición t_B deben utilizarse en grados centígrados.

La *temperatura de autoignición*, t_a , es la temperatura a la cual una sustancia inflamable es capaz de quemarse en aire, sin una fuente de ignición «externa». La autoignición transcurre, por lo tanto, sin necesidad de llama o chispa, a partir del propio nivel térmico de la mezcla gaseosa, o bien por contacto con una superficie caliente. En este último caso la temperatura de autoignición es más difícil de caracterizar, ya que por la propia naturaleza de la superficie o por materiales depositados sobre la misma (polvo, etc.) puede producirse un efecto catalítico que rebaje la energía necesaria para iniciar el proceso. Como es lógico, esto introduce un riesgo suplementario cuando se trabaja con materiales de baja temperatura de autoignición, en cuyo caso no sólo hay que tratar de evitar superficies a temperatura más alta que ésta, sino también tratar de limitar los efectos catalíticos (que pueden rebajar la temperatura de autoignición en más de 100° C), asegurando la limpieza de las superficies.

La temperatura de autoignición depende de numerosas variables. Así, además de los posibles efectos catalíticos ya mencionados, se ha encontrado que un aumento en el volumen del sistema, en la presión total de operación, o en la concentración de oxígeno disminuyen el valor de t_a , mientras que la variación de la concentración de combustible tiene una influencia más compleja. Por ello es esencial determinar t_a en condiciones tan próximas a las de proceso como ello sea posible.

Los *límites de inflamabilidad* nos proporcionan el intervalo de concentraciones de combustible (normalmente en porcentaje de volumen), dentro del cual una mezcla gaseosa puede entrar en ignición y arder. Por debajo del *límite inferior de inflamabilidad* (L.I.I.), no existe suficiente combustible como para propagar la combustión. Así, por ejemplo, si una mezcla del 1 por 100 de metano en aire a presión atmosférica y temperatura ambiente se pone en contacto con una llama abierta el metano irá consumiéndose paulatinamente a medida que las moléculas atraviesan las regiones de alta temperatura en las inmediaciones de la llama, pero la combustión no se propagará al conjunto de la mezcla gaseosa, como ocurriría si la mezcla estuviera dentro del intervalo de inflamabilidad. De manera análoga, a concentraciones de combustible mayores que las del *límite superior de inflamabilidad* (L.S.I.), no hay

suficiente comburente como para que la reacción se propague lejos de la fuente de ignición. En la tabla 3.2 se listan los límites de inflamabilidad de varias sustancias, junto con sus temperaturas de autoignición y puntos de flash.

Tabla 3.2. Características de inflamabilidad de algunas sustancias seleccionadas

Sustancia	L.I.I. en aire (%)	L.S.I. en aire (%)	Temperatura de autoignición t_a (° C)	Punto de destello t_f (° C)
Acetaldehído	4,0	60,0	175	-38
Acetona	2,5	13,0	538	-18
Acetileno	2,5	80-100	305	—
Benceno	1,3	7,9	562	-11,1
Butano	1,6	8,4	405	-60
Estireno	1,1	6,1	490	31,1
Etano	3,0	12,5	515	-135
Etanol	3,3	19,0	423	12,8
Etileno	2,7	36,0	490	-121
Formaldehído	7,0	73,0	430	-67,2
Hexano	1,1	7,5	225	-26
Hidrógeno	4,0	75,0	400	—
Metano	5,0	15,0	538	-188
Propano	2,1	9,5	450	<-104
Propileno	2,4	11,0	460	-108
Tolueno	1,2	7,0	536	4,4

Nota: Los intervalos de inflamabilidad de la tabla corresponden a condiciones estándar en aire.

Es frecuente que la mezcla estequiométrica que contiene justo la cantidad de oxígeno (en aire) necesaria para la combustión completa del material combustible esté en torno a la media geométrica de los límites de inflamabilidad. También se cumple para un buen número de hidrocarburos que el cociente entre el L.S.I. y el L.I.I. está entre 3 y 5. Sin embargo, existen sustancias con intervalos de inflamabilidad excepcionalmente amplios, como ocurre con el hidrógeno o el acetileno. En este último caso, el límite superior es del 100 por 100, ya que el acetileno puede descomponerse explosivamente en ausencia de aire (aunque obviamente en este caso la explosión no proviene de la combustión del

acetileno). Una determinación precisa de los límites de inflamabilidad exige el uso de aparatos y condiciones estandarizadas (ver, por ejemplo, ASTM E681), a fin de eliminar la variabilidad debida a la geometría del aparato, potencia de la ignición, temperatura, grado de mezcla, etc.

En el caso de que los límites de inflamabilidad no puedan determinarse experimentalmente, existen ecuaciones empíricas para su estimación. Es de notar, sin embargo, que siempre debe intentarse la medida experimental, que es relativamente simple, lo más cerca posible de las condiciones de uso de las sustancias cuyos límites se determinan. Las estimaciones empíricas están sujetas a errores, a menudo considerables. Como ejemplo de ecuaciones para la estimación de los límites de inflamabilidad en aire cabe citar las de Jones, frecuentemente utilizadas (2), (5):

$$L.I.I. = 0,55 C_{est} \quad [3.2]$$

$$L.S.I. = 3,50 C_{est} \quad [3.3]$$

donde C_{est} es la concentración estequiométrica del producto inflamable para la combustión en una mezcla con aire. La estimación para un compuesto de fórmula general $C_nH_xO_y$ se hace ajustando la ecuación estequiométrica de combustión para dar dióxido de carbono y agua:



La concentración en aire se calcula corrigiendo el oxígeno requerido según la reacción anterior por el nitrógeno acompañante.

Otra relación empírica utilizada a menudo para la predicción del límite inferior de inflamabilidad en aire es la de Spakowski:

$$L.I.I. \times (-\Delta H_{comb}) = 4,354 \times 10^3 \quad [3.5]$$

donde $(-\Delta H_{comb})$ es el calor de combustión (superior) estándar, y debe expresarse en kJ/mol, mientras que L.I.I. se obtiene de la ecuación anterior como porcentaje en volumen.

Ejemplo 3.1:

Estimar los límites de inflamabilidad para metano, propano, etanol y benceno mediante las ecuaciones de Jones y Spakowski, y compararlos con los valores experimentales dados en la tabla 3.2.

La ecuación estequiométrica de combustión para el metano es



Por tanto, un mol de metano requiere para su combustión completa 2 moles de oxígeno, al que acompañan $2(79/21) = 7,52$ moles de nitrógeno. La concentración estequiométrica es, por lo tanto, $1/10,52 = 0,095$, ó 9,5 por 100. De acuerdo con las ecuaciones [3.2] y [3.3] anteriores, los límites de inflamabilidad serían respectivamente L.I.I. = 5,2 por 100, y L.S.I. = 33,2 por 100.

$-\Delta H_{\text{comb}} = 889,5 \text{ kJ/mol}^{27}$. Por tanto, de la ecuación [3.5] se obtiene que L.I.I. = 4,9 por 100.

El cálculo para los demás compuestos se realiza de forma análoga. Los resultados se muestran en la tabla adjunta:

Com- puesto	L.I.I. (%) (Ec. 3.2)	L.I.I. (%) (Ec. 3.5)	L.S.I. (%) (Ec. 3.3)	L.I.I. (%) Experi- mental	L.S.I. (%) Experi- mental
Metano	5,2	4,9	33,2	5,0	15,0
Propano	2,2	2,0	14,1	2,1	9,5
Etanol	3,6	3,5	22,9	3,3	19,0
Benceno	1,5	1,3	9,5	1,3	7,9

Los ejemplos anteriores muestran una mayor fiabilidad en la estimación del límite inferior, mientras que se observan errores importantes en los valores del L.S.I., lo que pone de manifiesto la necesidad de acudir a valores experimentales siempre que sea posible.

Modificaciones de los límites de inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad pueden modificarse por las condiciones ambientales. Especialmente importante es la dependencia con la tem-

peratura, cuyo aumento amplía el intervalo de inflamabilidad. Así, se estima que un aumento de temperatura de unos 100° C eleva el límite superior en aproximadamente un 8 por 100, y rebaja el interior en la misma cantidad. En la bibliografía (5), (9) suele citarse la ecuación de Burgess-Wheeler para la estimación de límites de inflamabilidad de vapores de hidrocarburos a temperaturas alejadas de la temperatura ambiente:

$$L.I.I._{(t)} = L.I.I._{(25^{\circ} \text{C})} [1 - 0,75(t-25)/(-\Delta H_{comb})] \quad [3.6]$$

$$L.S.I._{(t)} = L.S.I._{(25^{\circ} \text{C})} [1 + 0,75(t-25)/(-\Delta H_{comb})] \quad [3.7]$$

donde t es la temperatura en grados centígrados y $-\Delta H_{comb}$ es el calor estándar de combustión (inferior en este caso), dado en kcal/mol.

Las variaciones de presión afectan poco al L.I.I. hasta llegar a valores inferiores a 5 kPa, donde en todo caso los frentes de llama se propagan con dificultad. Por el contrario, el límite superior puede aumentar considerablemente al aumentar la presión, con el consiguiente ensanchamiento del intervalo de inflamabilidad. Zabetakis (6) proporciona la siguiente expresión empírica para esta dependencia:

$$L.S.I._{(P)} = L.S.I._{(1 \text{ atm})} + 20,6(\log P + 1) \quad [3.8]$$

En cuanto a la concentración de oxígeno es de señalar que los límites inferiores de inflamabilidad en oxígeno y en aire son aproximadamente iguales, ya que a las concentraciones correspondientes al L.I.I. el oxígeno está en exceso, mientras que el límite superior suele aumentar considerablemente al aumentar la concentración de oxígeno. Así, para el propano, el límite superior de inflamabilidad pasa de 9,5 a 55 por 100 cuando se determina en oxígeno en lugar de aire, mientras que el inferior prácticamente no varía (2,1 frente a 2,3 por 100) (2). Si en lugar de oxígeno se utilizan otros oxidantes, los límites cambian considerablemente. En la bibliografía pueden encontrarse datos sobre límites de inflamabilidad de distintas sustancias en cloro, en óxidos de nitrógeno, etc.

Oxígeno mínimo para la combustión

Anteriormente se han discutido los límites de inflamabilidad basados en la concentración de combustible en aire. Sin embargo, cualquiera

que sea la concentración del gas o del vapor combustible, la inflamación de la mezcla puede impedirse si la cantidad de oxígeno se disminuye hasta un nivel suficiente. Por debajo de la concentración de oxígeno (%) mínima para la combustión (O_{\min}), la reacción no genera suficiente energía como para elevar la temperatura de la mezcla (incluyendo a los inertes presentes), hasta un valor que permita la propagación de la llama. La utilidad de este concepto es evidente, ya que permite eliminar la posibilidad de explosiones independientemente de la concentración de combustible. Por tanto, O_{\min} es un parámetro fundamental a la hora de diseñar los sistemas de inertización de recipientes que puedan llegar a contener mezclas inflamables.

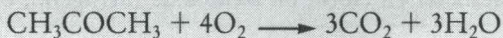
Si no pueden obtenerse valores experimentales referidos a un sistema determinado, Bodurtha (2) recomienda realizar una estimación grosera del valor de O_{\min} para inertización con nitrógeno, calculándolo como el oxígeno estequiométrico necesario para la combustión cuando la concentración de combustible es igual al límite inferior de inflamabilidad.

Si en lugar de nitrógeno se utiliza para la inertización un gas o vapor de mayor capacidad calorífica, como, por ejemplo, dióxido de carbono o vapor de agua (evitando condiciones en las que pueda producirse la condensación del mismo), los valores de O_{\min} aumentarán de manera correspondiente. Así, los valores de O_{\min} para inertización de mezclas de alcohol etílico-aire con nitrógeno, vapor de agua y dióxido de carbono son, respectivamente (2), 10,5, 12,3 y 13 por 100.

Ejemplo 3.2:

Estimar los valores de O_{\min} para inertizar con nitrógeno mezclas de acetona en aire y butano en aire, respectivamente. Compararlos con los valores experimentales (13,5 por 100 para la acetona y 12 por 100 para el butano).

Las correspondientes ecuaciones estequiométricas son



Como se refleja en la tabla 3.2, el límite inferior de inflamabilidad para acetona en aire es 2,5 por 100. Puesto que se re-

Ejemplo 3.2 (continuación):

quieren 4 moles de oxígeno por cada mol de acetona, O_{min} puede estimarse en torno al 10 por 100, inferior al valor experimental. Análogamente, el límite inferior del butano es 1,6 por 100, por lo que O_{min} resulta del 10,4 por 100, con lo que de nuevo se obtiene una estimación conservadora. Éste es un resultado frecuente, pero no puede generalizarse a todos los casos. Por ejemplo, el método predice un valor de O_{min} del 11 por 100 para el butadieno, superior al valor experimental del 10 por 100.

Diagramas de inflamabilidad

La figura 3.2 es una gráfica concentración-temperatura, en la que se han señalado los límites de inflamabilidad para una mezcla hipotética de gases. El punto A en dicha figura correspondería al punto de destello, es decir, a una mezcla saturada de vapor a una temperatura tal que la concentración resultante corresponde al límite inferior de inflamabilidad (L.I.I.). De manera análoga, en el punto B se tiene una mezcla saturada a la concentración correspondiente al punto superior de inflamabilidad (L.S.I.).

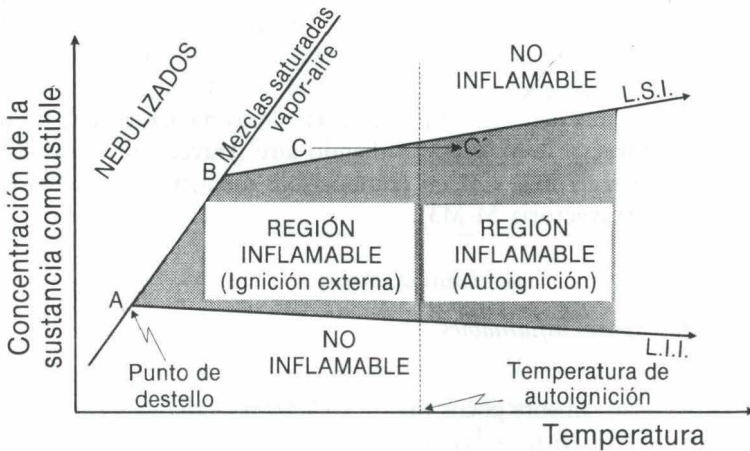


Figura 3.2. Diagrama concentración-temperatura, mostrando las características de inflamabilidad.

Como se ha dicho anteriormente, y como puede observarse en la gráfica 3.2, un aumento de la temperatura ensancha el intervalo de inflamabilidad. Como consecuencia, dependiendo de la posición inicial sobre el diagrama un aumento de temperatura puede trasladar una mezcla tal como la C, inicialmente no inflamable, dentro de la zona de inflamabilidad (C').

La diferencia entre las temperaturas correspondientes a los puntos A y B de la figura 3.2 nos proporciona el intervalo de temperaturas en que un sistema *en equilibrio* estaría entre los límites de inflamabilidad. Así, como señala King (3), en tanques atmosféricos de techo fijo venteados a la atmósfera pueden existir mezclas inflamables si la temperatura está entre los límites señalados, por lo que, siempre que sea posible, deben utilizarse tanques de techo flotante para este tipo de aplicaciones. La figura está dividida en dos zonas, a un lado y a otro de la temperatura de autoignición. Por debajo de esta temperatura la inflamación requiere una fuente externa de ignición. Por encima, las moléculas que constituyen la mezcla tienen ya la energía suficiente para iniciarla.

Otra manera de situar una mezcla fuera de los límites de inflamabilidad consiste en inertizarla. La figura 3.3 muestra el efecto de la adición de aire, combustible o inerte (nitrógeno) sobre la localización del punto que representa la mezcla gaseosa. En la línea AD de esta figura están todas las mezclas binarias posibles combustible-aire. La adición de combustible en B (L.I.I.), o la adición de aire en C (L.S.I.), introduce el sistema en la zona de inflamabilidad, mientras que la adición de nitrógeno, tanto en B como en C lo coloca fuera de ella. Si el punto que representa la mezcla global es tal como el M, el sistema puede situarse fuera de los límites de inflamabilidad inertizando mediante adición de nitrógeno (trayectoria M-M1), añadiendo aire (trayectoria M-M2), o haciendo la mezcla más rica en combustible mediante la adición de combustible (trayectoria M-M3).

Mezclas de vapores inflamables

Existen relativamente pocos valores en la bibliografía sobre intervalos de inflamabilidad en mezclas con varios productos combustibles. El valor del L.I.I., para mezclas de productos inflamables puede estimarse mediante la ecuación de Le Chatelier:

donde $Y_{i,comb}$ es la fracción en moles que cada uno de los componentes inflamables de la muestra representa en la cantidad total de combustible, y $L.I.I._i$, su límite inferior de inflamabilidad, expresado también como fracción molar. De lo anterior se deduce que una mezcla puede estar dentro de los límites de inflamabilidad, aunque cada uno de los componentes individualmente esté bajo el límite inferior. La regla de Le Chatelier es una relación empírica que tiene excepciones y debe aplicarse con precaución. Algunas limitaciones pueden encontrarse en la bibliografía (4).

Ejemplo 3.3:

Determinar si una mezcla constituida por un 4 por 100 de metano y un 1 por 100 de propano en aire (condiciones estándar) está dentro de los límites de inflamabilidad.

El metano representa un 80 por 100 del combustible de la mezcla, y el propano, el 20 por 100. Sus límites inferiores de inflamabilidad son, respectivamente, 5 y 2,1 por 100. Aplicando la regla de Le Chatelier, ecuación [3.9],

$$L.I.I. = \frac{1}{\frac{0,8}{0,05} + \frac{0,2}{0,021}} = 0,039$$

es decir, una concentración total de combustibles del 3,9 por 100. Por tanto, la mezcla está dentro del intervalo de inflamabilidad (5 por 100 > 3,9 por 100), aunque ninguno de sus componentes considerados individualmente rebasa el valor de su límite inferior de inflamabilidad.

Grado de inflamabilidad de los distintos materiales

No existe un único parámetro capaz de caracterizar la inflamabilidad de los distintos materiales, sino que intervienen varias propiedades en distintos grados de importancia. Entre ellas podríamos citar los ya vistos punto de flash (de gran importancia en cuanto a la inflamabilidad de líquidos combustibles), límites de inflamabilidad y temperatura de autoignición; pero también son de importancia la energía de ignición,

velocidad de combustión, calor de combustión, punto de fusión en sólidos, viscosidad, relación carbono/hidrógeno, etc. La NFPA (14) clasifica (NFPA 325M, NFPA 704) los distintos materiales, de acuerdo a sus características de inflamabilidad, dividiéndolos en cinco apartados:

Grado de inflamabilidad 0: Corresponde a materiales que no arden si están expuestos a temperaturas de 815°C en aire durante cinco minutos. Ejemplos de este tipo de materiales son el cloruro de aluminio o el nitrato amónico.

Grado de inflamabilidad 1: Se asigna a los materiales que necesitan un precalentamiento considerable para arder, cualesquiera que sean las condiciones ambientales. Dentro de este grupo entran materiales que arden antes de cinco minutos al exponerlos a aire a 815°C y líquidos, sólidos y semisólidos combustibles con un punto de flash más alto que $93,4^{\circ}\text{C}$. Como ejemplos pueden citarse el dietilenglicol o el alcohol bencílico.

Grado de inflamabilidad 2: Los materiales en este apartado no forman atmósferas peligrosas en contacto con aire bajo condiciones normales, pero sí pueden hacerlo tras un calentamiento moderado, o al ser expuestos a altas temperaturas. Dentro de este grupo están los líquidos con un punto de flash sobre $37,8^{\circ}\text{C}$ e inferior a $93,4^{\circ}\text{C}$, así como los sólidos y semisólidos que producen vapores inflamables con cierta facilidad. Ejemplos de este tipo de materiales son el ácido acético o la anilina.

Grado de inflamabilidad 3: Corresponde a líquidos y sólidos que, sometidos a ignición, pueden arder bajo condiciones ambientales o próximas a ellas. Los líquidos de grado 3 dan origen a atmósferas inflamables en aire, prácticamente en todas las condiciones habituales. En cuanto a sólidos, pertenecen a este grupo aquellos fibrosos (por ejemplo, algodón), o en su caso de granulometría relativamente gruesa que, aunque no forman habitualmente atmósferas explosivas en aire pueden arder fácilmente, así como otros sólidos que arden con gran facilidad por contener oxígeno en su molécula (por ejemplo, nitrocelulosa seca). Otros ejemplos de productos pertenecientes a este grupo son la acetona o la dietilamina.

Grado de inflamabilidad 4: Pertenecen a este grupo los materiales que se vaporizan rápidamente en condiciones ambientales y proporcionan una combustión rápida. Se incluyen aquí los gases, materiales criogénicos, líquidos inflamables con punto de flash inferior a $22,8^{\circ}\text{C}$ y materiales que a causa de su forma física o propiedades pueden dispersarse con facilidad en el aire, formando mezclas explosivas, tales como polvos

combustibles finamente divididos y nieblas de líquidos inflamables. El carbón, a pesar de su baja volatilidad, puede tener un índice NFPA de 3 o incluso 4, cuando se muele a un tamaño de partícula muy fino. Otros ejemplos de sustancias en este grupo son el acetaldehído o el butano.

Fuentes de ignición

Se ha indicado anteriormente que la presencia de una fuente de ignición es el tercer elemento indispensable del triángulo del fuego. La afirmación puede invertirse, en el sentido de que, si se evita la presencia de fuentes de ignición, se evita el fuego. Algunos de los procedimientos de eliminación de fuentes de ignición se discuten en el capítulo 7.

Para que ocurra la ignición es necesario suministrar la energía mínima de ignición, suficiente para iniciar la inflamación de la mezcla. Todos los materiales poseen su característica energía mínima de ignición, que varía con las condiciones ambientales como presión y composición de la mezcla combustible. Las energías mínimas de ignición típicas de hidrocarburos están en torno a 0,25 mJ, existiendo sustancias con energías considerablemente menores (por ejemplo, el hidrógeno, en torno a 0,03 mJ). Para tener una idea del orden de magnitud representado por estas energías, y de la facilidad con que pueden alcanzarse, baste señalar que la carga electrostática acumulada por una persona (por ejemplo, al caminar sobre una alfombra en un día seco) puede ser suficiente para una descarga de unos 22 mJ, y la chispa eléctrica de un interruptor ordinario suele estar en el intervalo de 20 a 30 mJ.

Las posibles fuentes de ignición son numerosas. La tabla 3.3 recoge una distribución porcentual de las fuentes de ignición. Anteriormente se ha mencionado la autoignición, que no requiere una fuente externa. Un caso relacionado, aunque de naturaleza diferente, lo constituye la autooxidación, un fenómeno de oxidación lenta que libera calor hasta que se llega a la temperatura de autoignición si el calor liberado no puede disiparse adecuadamente. Suele darse asociado a líquidos combustibles poco volátiles (ya que una volatilidad elevada disiparía una cantidad importante de energía como calor latente), y a aportes de aire moderados. Suele ocurrir en aislantes térmicos en los que se han derramado aceites o líquidos poliméricos.

Como se observa en la tabla 3.3, las fuentes de ignición más frecuentes en la industria química están relacionadas con superficies calientes y

Tabla 3.3. Distribución de las fuentes de ignición causantes de incendios en la industria química y petroquímica (8) (% del número de casos). Los datos proceden de un estudio de la Fire Protection Association durante el período 1971-73

Fuentes de ignición	%	% modificado
Superficies calientes	10,1	18,2
Llamas de quemadores	10,1	18,2
Equipo eléctrico	7,6	13,6
Ignición espontánea	7,6	13,6
Chispas y calor debidos a fricción	7,6	13,6
Llamas de oxicorte	5,1	9,1
Niños con fósforos	3,8	6,8
Ignición intencionada	2,5	4,5
Electricidad estática	1,3	2,3
Causa de ignición desconocida	44,3	—

Nota: El % modificado se ha calculado prescindiendo de los incendios con causa de ignición desconocida.

llamas abiertas. Esto es una característica específica relacionada con el tipo de actividad, y contrasta con las estadísticas para incendios en la industria en general, donde los primeros puestos en la lista de fuentes de calor causantes de ignición están ocupados por maquinaria de fabricación y equipos de distribución eléctrica (1) o bien por fumadores (5).

La ignición por causas de naturaleza eléctrica ocurre con gran frecuencia en la industria química, como también se muestra en la tabla 3.3. Aquí cabe considerar tanto la ignición debida al equipo o instalaciones eléctricas (13,6 por 100 de las causas de ignición identificadas), como la que procede de la acumulación de cargas electrostáticas (2,3 por 100). En el primer caso, el equipo eléctrico se utiliza ampliamente en las industrias de proceso, y puede ser una fuente de ignición a no ser que se ejerza un control estricto sobre sus características. Existe una amplia reglamentación sobre equipos eléctricos a utilizar en función del grado de peligrosidad de la atmósfera (ver capítulo 7).

No está ni mucho menos tan bien definida la manera de enfrentarse a la ignición causada por acumulación de cargas electrostáticas. La electricidad estática es una importante causa de ignición en plantas de proceso, con el agravante de ser un fenómeno no siempre bien comprendido ni considerado en todo su potencial. Su generación está asociada al contacto y separación de materiales de distinta naturaleza, lo que

ocasiona que tras la separación uno de los materiales resulte con un exceso de electrones. La carga acumulada puede eliminarse con facilidad si los cuerpos son conductores, pero si uno o ambos tienen baja conductividad eléctrica, se pueden llegar a originar diferencias de potencial de miles de voltios, lo que eventualmente produce una descarga eléctrica.

Los efectos de acumulación de carga estática son importantes en muchos sistemas en los que tiene lugar la secuencia antes mencionada: contacto, separación y acumulación de carga. Así, como ejemplos en sistemas sólido-fluido, podemos citar el flujo a través de tuberías o filtros, llenado de tanques, dispersión de líquidos a través de boquillas (sprays), etc., así como operaciones de fluidización y transporte neumático. En sistemas fluido-fluido la coexistencia de líquidos inmiscibles, sedimentación de gotas de una fase dispersa en otra continua, limpieza con vapor, fugas de vapor, etc. Por último, el importante grupo de generación de carga estática en sistemas sólido-sólido incluye entre otros ejemplos las cintas transportadoras, las correas de arrastre de rotores, el manejo de bobinas con papel o plásticos, la acumulación de carga en el cuerpo humano, etc.

También puede producirse la ignición de una mezcla inflamable cuando ésta se comprime utilizando relaciones de compresión elevadas sin eliminar calor adecuadamente. Es bien conocido, y utilizado en la práctica, que la ignición de los combustibles puede lograrse comprimiendo cuasiadiabáticamente la mezcla de combustible más aire hasta que la temperatura sea mayor que el valor correspondiente a la autoignición. El aumento de temperatura resultante de la compresión adiabática de un gas ideal puede calcularse a partir de

$$T_{final} = T_{inicial} \left[\frac{P_{final}}{P_{inicial}} \right]^{\frac{k-1}{k}} \quad [3.10]$$

donde k es el cociente de las capacidades caloríficas, las temperaturas vienen expresadas en grados Kelvin y las presiones son presiones absolutas. Existe constancia de un número importante de explosiones cuya causa fue la entrada de vapores inflamables en un compresor no diseñado para ese fin. También pueden ser los vapores procedentes del aceite de lubricación del compresor los que den origen a una explosión.

Otras fuentes que frecuentemente dan origen a la ignición de mezclas inflamables son: *i*) las llamas abiertas, ya sean estas intencionadas (antorchas, quemadores, etc.) o accidentales (consecuencia de explosiones o de venteos inadecuados, incendios, llamas producidas por negligencia del personal, etc.); *ii*) ignición por causas mecánicas: colisión de superficies metálicas, operaciones de cortado y moldeado de metales, etc.; *iii*) operaciones de soldadura, incluyendo no sólo el arco o la llama del soldador, sino también el metal calentado en el proceso; *iv*) vehículos a motor; *v*) otros: superficies calientes, microondas, energía química (por ejemplo, en materiales pirofóricos), etc.

Explosiones

Una explosión libera energía de manera súbita y violenta. Las causas pueden ser variadas, pero generalmente las explosiones se clasifican de acuerdo al tipo de energía que las origina. En este capítulo nos ocuparemos de explosiones producidas por liberación de energía de presión o de energía química. En el primer caso la energía de un gas comprimido se libera súbitamente, en general a causa de un fallo mecánico seguido del colapso del recipiente de contención. Es lo que ocurre, por ejemplo, en la ruptura catastrófica de un cilindro de gas a presión. También entrarían dentro de esta categoría la despresurización súbita de un gas licuado almacenado bajo presión a temperatura superior a la de ebullición normal (lo que ocasionaría la rápida evaporación del mismo acompañada de aumento de presión al aumentar el número de moles en fase gas) o las explosiones debidas al aumento de presión en el interior de un recipiente por calentamiento (incendio) externo.

En cuanto a las explosiones debidas a la liberación de energía química, son causadas por una reacción química que da lugar a una elevación de la temperatura y/o a un aumento en el número de moles en fase gas. La energía liberada en una explosión química depende de la naturaleza y estado físico de los reactantes y productos. A este respecto es importante distinguir entre las explosiones de mezclas de vapores combustibles con un comburente (habitualmente aire), que son las de mayor interés para la seguridad en la industria química, y las producidas por explosivos como TNT, etc. Éstas son de características diferentes, ya que estos últimos materiales llevan en sí mismos el oxígeno necesario y, por lo tanto, la explosión puede producirse en ausencia de aire.

Como se ha indicado anteriormente, en el caso de la inflamación de una mezcla combustible, la velocidad a la que se produce la liberación de la energía potencial química en la combustión del material es la principal diferencia entre incendios y explosiones. Al igual que ocurre con los incendios, las explosiones pueden impedirse trabajando fuera del intervalo de inflamabilidad, disminuyendo la concentración de comburente hasta el valor correspondiente o evitando fuentes de ignición. Como se verá más adelante, la aplicación de criterios de seguridad intrínseca desde las etapas iniciales de diseño puede permitir que los equipos no estén sometidos al riesgo de explosión, o que sean capaces de resistir explosiones, sin sufrir daños y sin propagar sus efectos. Alternativamente puede añadirse seguridad extrínseca, con equipos capaces de suprimir las explosiones en una etapa temprana de su desarrollo, con sistemas de alivio, etc.

Si una nube homogénea de vapor en condiciones de inflamabilidad entra en ignición en ausencia de restricciones externas, el resultado es un frente de llama esférico que se propaga rápidamente al resto de la nube. La combustión da origen a un aumento de la temperatura, y habitualmente del número de moles, a medida que la reacción transcurre. La velocidad del proceso ocasiona un aumento de presión local que no se equilibra con los alrededores, a diferencia de lo que ocurriría en un incendio, donde el proceso es lo suficientemente lento como para disipar el aumento de presión.

El frente de llama en expansión puede visualizarse como un pistón permeable que causa ondas de presión en la mezcla no reaccionada. Estas ondas, en general, se propagan a la velocidad local del sonido. Si la velocidad del frente de reacción es lo suficientemente grande, se produce la conocida superposición de frentes de onda que da lugar a la formación de una onda de choque. Las explosiones pueden ser *deflagraciones* o *detonaciones*, dependiendo de la velocidad del frente de combustión con respecto a la del sonido en la mezcla no reaccionada. Si la velocidad del frente de llama es menor que la de propagación del sonido en la mezcla que aún no ha sido alcanzada por la reacción, se produce una deflagración, mientras que en caso contrario tiene lugar la detonación de la mezcla inflamable. La combustión en un motor de gasolina es una deflagración, aunque se produce en aproximadamente 1/300 de segundo. Una detonación requeriría que el proceso se completara en aproximadamente 1/10.000 de segundo (5). Típicamente las velocidades en una deflagración son de algunos cientos de metros por

segundo, mientras que en una detonación puedan alcanzarse velocidades superiores en un orden de magnitud. Asimismo, se admite (7) que en la deflagración operan mecanismos convencionales de transferencia de calor, mientras que en una detonación el aumento de temperatura se debe primordialmente a la onda de choque formada. Las condiciones para que exista detonación son más estrictas que las de inflamabilidad, siendo los intervalos de detonabilidad menores. La detonación de mezclas de gases combustibles con aire suele requerir un cierto grado de confinamiento, y puede ocurrir directamente o bien tener lugar por transición a partir de una deflagración. De acuerdo con lo dicho anteriormente, en este caso se requiere una aceleración importante del frente de llama, lo que puede ocurrir en conducciones, pero es altamente improbable en recipientes. Las presiones alcanzadas en detonaciones son más altas que las causadas por deflagraciones, y sus efectos mucho más destructivos. La inmensa mayoría de las explosiones de mezclas inflamables en la industria química son deflagraciones.

Efectos de incendios y explosiones

El resultado final de un incendio o de una explosión en la industria química depende de la naturaleza intrínseca del accidente y de las condiciones en que se produce, que pueden acrecentar o mitigar sus efectos. La naturaleza del accidente, es decir, el tipo de accidente que finalmente tiene lugar, es función de la sucesión de circunstancias que configuran los elementos del accidente, en este caso un incendio o una explosión.

La figura 3.4 muestra distintas cadenas de evolución con los resultados finales que cabe esperar: onda de presión, formación de proyectiles o radiación térmica. Así, dentro de las explosiones físicas (es decir, cuando no hay reacciones químicas que contribuyan a los efectos de la explosión, o, si las hay no contribuyen de manera importante), en el caso de que sólo haya fase gas presente, los posibles efectos se reducen a la formación de ondas de choque y en su caso proyectiles, siempre y cuando no se produzca la ignición de la mezcla. La explosión física inicial puede transformarse en una explosión química (es decir, en un proceso cuyos efectos están determinados por la existencia de una reacción química de combustión de la mezcla). Para ello es necesario que el gas involucrado sea de naturaleza combustible, que forme con el aire una mezcla dentro del intervalo de inflamabilidad y que tenga lugar

la ignición de la misma. A partir de aquí puede ocurrir, como se indica en la figura 3.4, una explosión de nube de vapor no confinada (EVNC), o un incendio flash. Como efectos finales de la EVNC se han consignado la formación de una onda de presión y, en su caso, de proyectiles, ya que los efectos térmicos, aunque a menudo existen, suelen ser menos importantes que los anteriores.

Cuando en una explosión física están presentes líquido y vapor, la casuística es diferente. En el caso de que el líquido esté por debajo de su temperatura de ebullición en la explosión interviene el material que está en fase vapor y el que se incorpora durante el breve tiempo que dura el proceso. En estas circunstancias la cadena de evolución es paralela a la del caso anterior. Por el contrario, si la temperatura del líquido es superior a la de ebullición a la presión de los alrededores, la explosión física inicial que rompe el recipiente produce una despresurización súbita, con lo que tiene lugar una evaporación masiva del líquido sobrecalentado. Esto es lo que se conoce como BLEVE (iniciales de Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), es decir, una explosión en la que participa un líquido hirviente que se incorpora rápidamente al vapor en expansión. Las explosiones BLEVE son de gran poder destructivo por el elevado aumento de presión causado en la súbita incorporación del líquido a la fase gas. La ignición en un BLEVE da origen a una masa de gases a alta temperatura que se conoce como «esfera de fuego», con importantes efectos de radiación térmica.

Un segundo tipo de explosiones considerado en la figura 3.4 son las explosiones confinadas. Se incluyen aquí las deflagraciones constreñidas inicialmente dentro de recipientes o edificios. El término «estructuras de baja resistencia» utilizado en la figura 3.4 hace referencia principalmente a edificios o silos, mientras que se supone que los recipientes de proceso poseen una resistencia mayor. En este caso, si la estructura permite contener o ventear adecuadamente la explosión no hay consecuencias posteriores, mientras que en caso contrario pueden producirse uno o más de los efectos adversos: ondas de presión, formación de proyectiles y radiación térmica.

Por último, como se señala en el esquema de la figura 3.4, las explosiones y fuegos también pueden producirse como consecuencia de pérdidas de contención. Tanto si tiene lugar la pérdida de contención de un gas, como de un líquido capaz de evaporarse de manera apreciable o si se produce un escape bifásico, el resultado es la formación de una nube que, tras su ignición, puede dar lugar a una EVNC o a un incendio

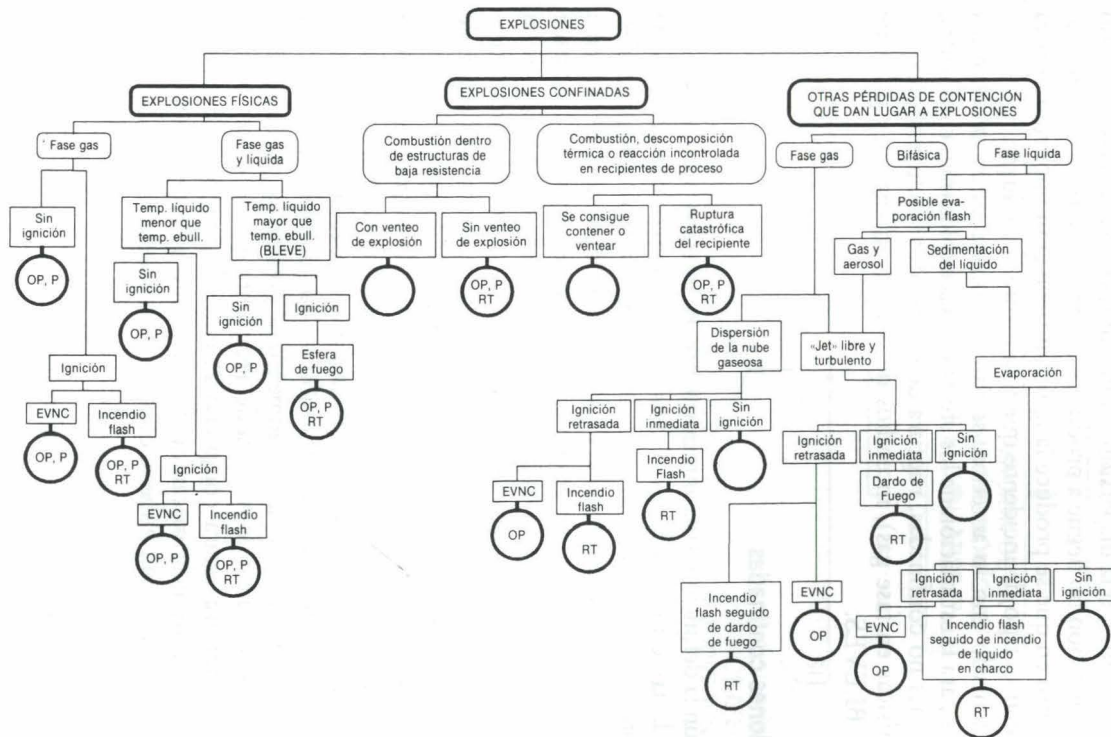


Figura 3.4. Diagrama de efectos para una explosión (basado en la referencia 11). OP = Onda de presión, P = Formación de proyectiles, RT = Radiación térmica.

flash. En otros casos, como se discute más adelante, el resultado es la formación de un dardo de fuego (*jet fire*), el incendio del líquido en charco (*pool fire*), o la dispersión sin mayores consecuencias en el caso de que la ignición no llegue a producirse. Como se aprecia en la figura, el momento en que se produce la ignición tiene gran importancia para determinar el tipo de incidente que finalmente tiene lugar.

De acuerdo con lo anterior, se van a exponer sucesivamente los métodos para la estimación de los efectos de las explosiones confinadas, explosiones no confinadas, ruptura de recipientes (incluyendo explosiones físicas en fase gas), incendios de líquido en charco, dardos de fuego y BLEVES.

Explosiones confinadas

Según la definición dada anteriormente, en este apartado nos ocuparemos de las características del desarrollo de explosiones dentro de recipientes, y más concretamente de los dos parámetros fundamentales: la presión máxima y la velocidad de aumento de la presión. El esquema de cálculo a seguir en el caso de que se produzca una explosión confinada en un recipiente se muestra en la figura 3.5. En el caso de que la presión máxima exceda la resistencia del recipiente se requiere calcular la sobrepresión producida en función de la distancia, así como la estimación de los efectos de los proyectiles formados. Este cálculo puede realizarse con los métodos descritos en el apartado «ruptura de recipientes», aunque debe tenerse en cuenta la diferencia entre los dos tipos de procesos. Así, en el caso de que la ruptura del recipiente sea provocada por el aumento de presión causado por una explosión en su interior, la inercia del proceso es tal que la velocidad de aumento de presión es, por lo general, mayor que la velocidad de ruptura del recipiente, por lo que la presión efectiva de ruptura estará comprendida entre la presión a la cual se sobrepasa la resistencia mecánica del recipiente y la presión máxima obtenida si la explosión hubiese quedado totalmente confinada.

Presión máxima en explosiones confinadas

Cuando una deflagración tiene lugar en el interior de un recipiente, la presión absoluta máxima que se puede alcanzar depende de la presión

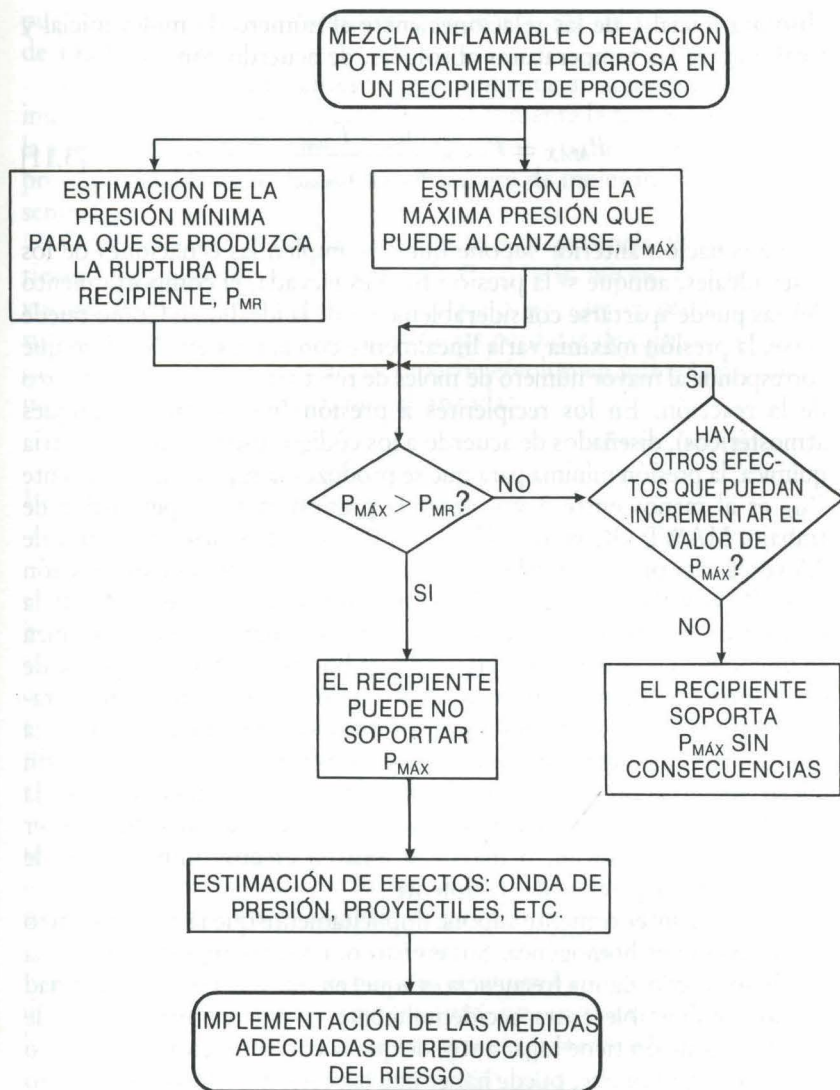


Figura 3.5. Esquema de cálculo para explosiones confinadas. (Adaptado a partir de la referencia 11.)

absoluta inicial y de las relaciones entre el número de moles inicial y final y entre las temperaturas absolutas, de acuerdo con

$$P_{M\acute{A}X} = P_{inicial} \frac{n_{final} T_{final}}{n_{inicial} T_{inicial}} \quad [3.11]$$

La ecuación anterior supone que se cumplen las ecuaciones de los gases ideales, aunque si la presión final es elevada, el comportamiento del gas puede apartarse considerablemente de la idealidad. Como puede verse, la presión máxima varía linealmente con la presión inicial, lo que corresponde al mayor número de moles de reactivo presentes al comienzo de la reacción. En los recipientes a presión (no así en los tanques atmosféricos), diseñados de acuerdo a los códigos usuales en la industria química, la presión mínima para que se produzca la ruptura del recipiente P_{MR} es al menos entre 3 y 4 veces la presión máxima permisible de trabajo, MAWP (*Maximun Allowable Working Pressure*). Un valor de 2,5 veces esta presión puede utilizarse como guía para la comparación entre $P_{M\acute{A}X}$ y P_{MR} , es decir, si $P_{M\acute{A}X}$ es mayor que 2,5 veces MAWP, la ruptura del recipiente es probable. La presión máxima que se alcanza en un recipiente con una mezcla combustible en su interior depende de la composición de dicha mezcla, alcanzando un máximo a concentraciones cercanas a la estequiométrica. Para deflagraciones en aire, la presión máxima que puede alcanzarse está en torno a 8 veces la presión inicial, mientras que en oxígeno la presión máxima es unas 16 veces la inicial. En el caso de detonaciones, la presión máxima puede llegar a ser unas 20 veces la inicial, o mayor si existen efectos importantes de reflexión en las paredes del recipiente.

Lo dicho anteriormente supone implícitamente que la mezcla dentro del recipiente es homogénea. Sin embargo, un caso importante que ha tenido lugar con alguna frecuencia es aquel en que una pequeña cantidad de gas combustible entra accidentalmente en un recipiente lleno de aire. Si la ignición tiene lugar antes de que la concentración haya tenido tiempo de equilibrarse, puede haber una explosión, incluso si el número de moles introducido, considerado globalmente en el recipiente, está por debajo del límite inferior de inflamabilidad. Bodurtha (2) calcula que 180 gramos de propano a temperatura ambiente introducidos en un recipiente de 10 m³ (lo que correspondería a un 1 por 100 de concentración promedio, por debajo del límite inferior de inflamabilidad),

pueden dar lugar a una explosión que genere una sobrepresión de más de 140 kPa.

Como se ha dicho antes, $P_{MÁX}$ aumenta si aumenta la presión inicial. Por un razonamiento análogo, si aumenta la temperatura inicial la presión máxima disminuye para el mismo volumen de recipiente y presión inicial, ya que disminuye el número de moles inicialmente presentes.

Otros factores como la turbulencia o la potencia de la ignición tienen poca influencia en el valor de $P_{MÁX}$ y lo mismo ocurre con el volumen y la forma del recipiente, a no ser que el proceso sea lo suficientemente lento como para que las pérdidas de calor sean significativas, en cuyo caso la relación superficie/volumen influye apreciablemente sobre la presión máxima alcanzada.

Velocidad de aumento de la presión

La velocidad de aumento de la presión (dP/dt) tiene gran importancia en el diseño de sistemas de alivio de presión en recipientes de proceso. Si se pretende que la presión en el interior de un recipiente se mantenga estable, es preciso diseñar los sistemas de alivio de manera que se consiga evacuar un número de moles suficiente como para contrarrestar el aumento máximo de presión. La variación típica de la curva de presión con el tiempo se presenta en la figura 3.6. Puede observarse que existe un período inicial durante el cual la presión aumenta lentamente, seguido de un crecimiento muy rápido, en el que el aumento de presión se acelera alcanzándose la velocidad máxima de aumento de presión $(dP/dt)_{máx}$. La velocidad de aumento de presión decrece y posteriormente se anula al alcanzarse el máximo de presión en el recipiente.

Al contrario de lo que se observa con la presión máxima de explosión, el valor de $(dP/dt)_{máx}$ crece al elevarse la temperatura, ya que la velocidad de reacción aumenta con la temperatura. En cuanto a otros factores se ha encontrado que $(dP/dt)_{máx}$ se incrementa linealmente con la presión inicial. También aumenta de manera importante al aumentar la turbulencia, debido a la mejora de la mezcla en el recipiente.

La potencia de la ignición tiene una influencia más compleja sobre $(dP/dt)_{máx}$ encontrándose (2) que aumentos en la potencia de la ignición pueden aumentar el valor de $(dP/dt)_{máx}$ aunque en algunos casos éste no se modifica. La ignición cerca del centro del recipiente aumenta el valor

de $(dP/dt)_{máx}$ con respecto al obtenido en igniciones cerca de la pared. También se obtienen mayores valores de la velocidad máxima de aumento de la presión cuando existen múltiples fuentes de ignición, aunque este caso es más improbable en la práctica, salvo que se busque expresamente este efecto, como ocurre en algunos tipos de motores de automóviles. En cuanto al efecto de la geometría del recipiente, se ha observado que, para recipientes de forma similar y para el mismo grado de turbulencia y potencia de la ignición, la variación de $(dP/dt)_{máx}$ con el volumen del recipiente sigue la ecuación conocida como «ley cúbica», que establece menores velocidades de aumento de presión para recipientes mayores:

$$\left[\frac{dP}{dt} \right]_{máx} V^{1/3} = Kst \quad [3.12]$$

donde V es el volumen del recipiente y Kst es una constante llamada índice de deflagración, específica para cada combustible, ya se trate de gases/vapores o de sólidos. La ecuación anterior puede utilizarse para predecir velocidades de aumento de la presión en recipientes de tamaño industrial a partir de experiencias de laboratorio con recipientes análogos. Como ejemplo de los valores obtenidos para Kst (ver capítulo 7), Bartknecht (8) cita valores de 75 y 550 bar.m/s para propano e hidrógeno, respectivamente (condiciones estándar, potencia de ignición de 10 J), y una serie de intervalos para polvos combustibles: 59-165 bar.m/s para el azúcar, 83-211 bar.m/s para polvo de madera, 56-229 bar.m/s para celulosa pulverizada, etc.

Ejemplo 3.4:

En el laboratorio se utilizan aparatos relativamente estandarizados para medir las características de explosiones. Básicamente se requiere un recipiente capaz de resistir sin daño la presión máxima de explosión, un sistema de ignición adecuado, un agitador para producir diferentes grados de turbulencia, control y medida de temperatura para fijar la temperatura del recipiente antes de la explosión, sistemas de flujo para cargar el recipiente con la atmósfera de reacción adecuada y descargarlo tras la explosión, y transduc-

Ejemplo 3.4 (continuación):

tor(es) de presión de alta velocidad de respuesta para seguir las rápidas variaciones de presión que se producen en el proceso. Se ha utilizado un sistema de este tipo con un recipiente de 15 litros de capacidad para determinar las características de explosión del vapor de un nuevo producto industrial A. El proceso emplea mezclas de A con aire a una presión de 1,9 bares. En la figura 3.6 se muestran los datos de variación de presión con el tiempo obtenidos en uno de los experimentos realizados. Determinar las principales características de explosión en las condiciones utilizadas. ¿Cómo se modificarían éstas en un recipiente industrial de 500 litros de capacidad?

La figura 3.6 muestra la forma característica de las curvas de explosiones confinadas. El período de inducción se extiende en este caso a unos 40 ms, y la presión máxima se alcanza en torno a los 115 ms. El valor de la presión máxima es de 15,9 bares, algo más de 8 veces mayor que la presión inicial.

En la gráfica se ha trazado también la tangente a la curva correspondiente a la máxima velocidad de aumento de presión $(dP/dt)_{máx}$. La pendiente de esta recta es de 820 bar/s. El valor de K_{st} puede obtenerse conocido este valor y el volumen del recipiente, a partir de la ecuación [3.12]:

$$K_{st} = (820) (0,015)^{1/3} = 202 \text{ bar.m/s}$$

Para un recipiente de 500 litros no se esperan variaciones importantes de la presión máxima si el resto de las condiciones son equiparables. La máxima velocidad de aumento de la presión vendrá dada por la ley cúbica, de la que ahora se conoce K_{st} . Sustituyendo valores para el recipiente de 500 litros se obtiene un valor de la máxima velocidad de aumento de presión igual a 254,5 bar/s.

Acumulación de presión

En sistemas de recipientes interconectados es posible que se obtengan presiones mayores que las anteriormente mencionadas, como resultado

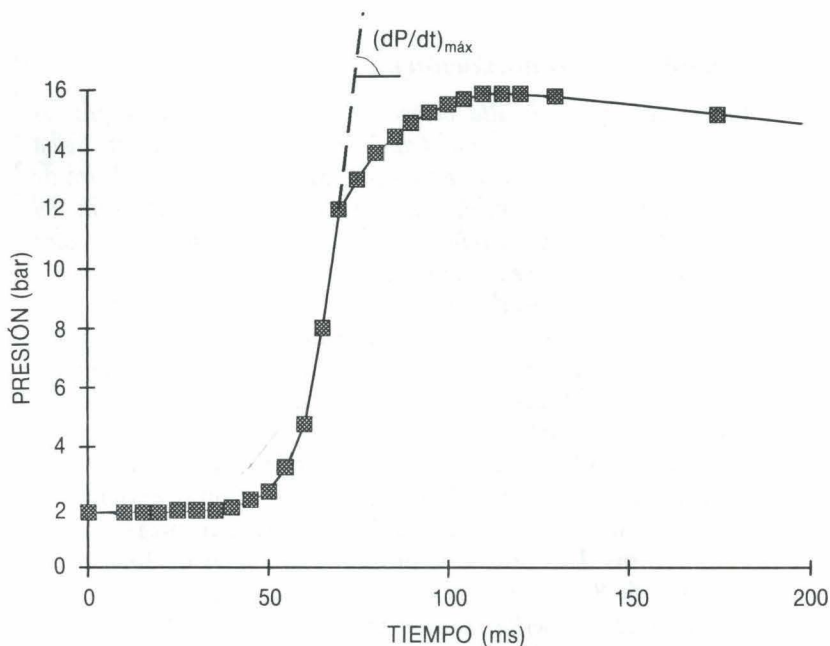


Figura 3.6. Variación de la presión con el tiempo durante una explosión confinada.

de la acumulación de presión. Supongamos dos recipientes de proceso unidos por una conducción. Tras la ignición en el primero, parte de la mezcla inflamable, que aún no ha sido alcanzada por el frente de combustión, es impulsada por el frente de presión hacia el segundo recipiente a través de la conducción que los une. Esto hace aumentar la presión en este recipiente antes de que se produzca la ignición. Cuando ésta tiene lugar, al llegar el frente de la llama al segundo recipiente, se parte de una presión «inicial» mayor, con lo que las presiones finales son también mayores, según lo visto con anterioridad. El aumento de presión en la explosión del segundo recipiente puede ser muy considerable (llegando a $(P_{MÁX})^2$ en el peor de los casos), por lo que la posibilidad de acumulación de presión debe ser tenida en cuenta en el diseño de equipos interconectados.

La presión final en el segundo recipiente depende de la geometría del sistema, ejerciendo gran influencia el tamaño de la conducción que une ambos recipientes y la presencia o no de restricciones en la misma. Bodurtha (2) cita experimentos en los que un recipiente se divide en dos compartimentos por medio de un panel en el que se ha practicado un orificio. Disminuciones moderadas en el tamaño del orificio producen aumentos importantes en la presión máxima de explosión que se obtiene en el sistema tras la ignición en uno de los compartimentos.

Explosiones no confinadas

Son las que ocurren fuera de edificios o recipientes de proceso. Dentro de este grupo se incluyen las explosiones de nubes de vapor no confinadas, que han dado origen a algunos de los accidentes más importantes ocurridos en la industria química. La explosión de una nube de vapor requiere como paso previo la formación de dicha nube, por ejemplo, a partir del colapso de un recipiente conteniendo un líquido inflamable volátil o a partir de la fuga de un gas inflamable. El tiempo que tarda en ocurrir la ignición a partir del momento en que comienza la emisión del combustible es un factor crítico en la determinación del poder destructivo de la explosión. Así, en una ignición temprana el tamaño de la nube inflamable es aún lo suficientemente reducido como para que los efectos sean de pequeña magnitud. A medida que aumenta el tiempo hasta la ignición los efectos van aumentando como consecuencia de la acumulación de material en la nube. Por último, si la ignición se retrasa lo suficiente, la mayor parte de los materiales emitidos puede haberse diluido hasta concentraciones por debajo del límite de inflamabilidad, con lo que los efectos serían pequeños o inexistentes. En el capítulo siguiente se discuten los métodos para estimar el tamaño de la nube formada en distintas circunstancias.

La explosión de una nube de gas o de polvo combustible produce un frente de reacción que se desplaza a partir del punto de ignición, precedido por una onda de choque o frente de presión. Esta onda de choque subsiste después de que el material de la nube ha sido consumido, desplazándose a distancias cada vez mayores del punto de ignición, hasta que se amortigua por completo intercambiando cantidad de movimiento con los alrededores. La figura 3.7 representa la evolución de los perfiles de sobrepresión a medida que la onda se aleja del punto

original. La forma concreta del perfil de presión en los instantes iniciales depende del tipo de explosión. En todo caso, a cierta distancia del punto original la región de presión positiva (sobrepresión) suele estar seguida de una zona de enrarecimiento, en la que existe una débil presión negativa respecto a la atmosférica, que, por lo general, no excede los 0,25 bares en valor absoluto. A pesar de ello, sus efectos destructivos pueden ser muy importantes, debido a que por lo general los edificios no están diseñados para resistir presiones mayores en el interior que en el exterior.

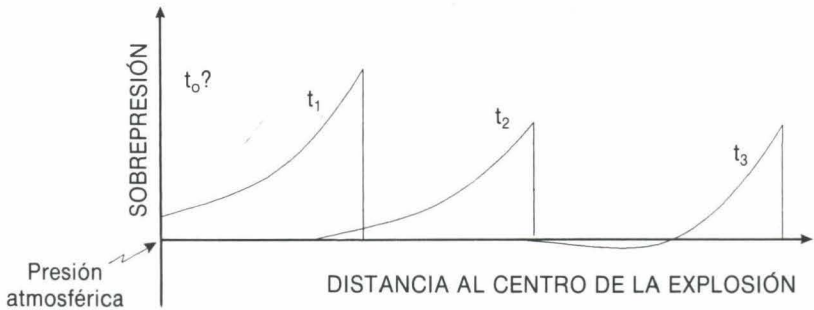


Figura 3.7. Representación idealizada de la evolución de una onda de presión. (Adaptado de la referencia 9.)

Si se consideran los cambios de presión que tienen lugar con el tiempo en un punto fijo a una distancia dada del origen de la explosión, la variación de la sobrepresión tiene la forma indicada en la figura 3.8. Cuando la onda de choque impacta un objeto, la presión sobre las superficies paralelas a la dirección de propagación de la onda aumenta casi instantáneamente al valor de la presión máxima P^0 . Otros parámetros importantes para caracterizar la variación de presión en un punto determinado son el tiempo de llegada, t_a , la duración de la fase positiva t_+ (es decir, el tiempo durante el cual la presión que se mide sobre una superficie paralela a la dirección de propagación tiene un valor mayor o igual que la presión atmosférica), y el parámetro de decaimiento de la presión, α , que describe la forma de la curva a partir del momento en que se alcanza la sobrepresión máxima. En la bibliografía (2), (9), (11) se proporcionan gráficas para obtener los parámetros anteriores en función de la distancia al punto de explosión. En la siguiente tabla se

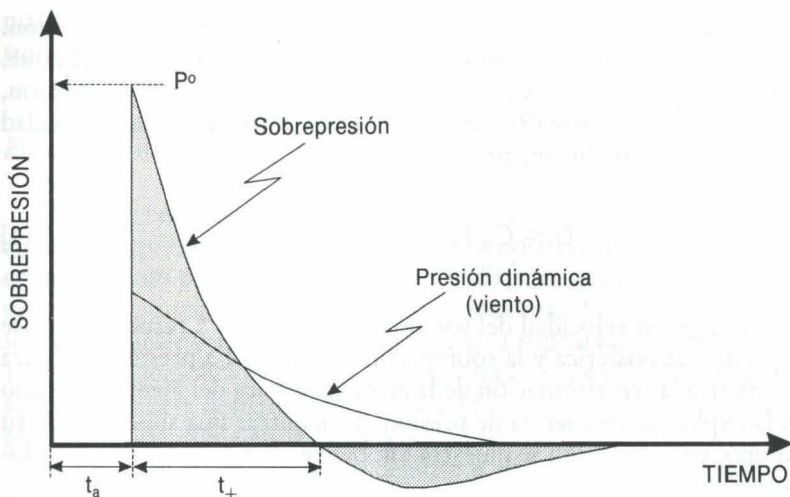


Figura 3.8. Variación de la sobrepresión incidente y de la sobrepresión dinámica en un punto a cierta distancia del origen de la explosión. (Adaptado de la referencia 2.)

muestra la variación de los tres parámetros para la onda expansiva resultante de la explosión de una tonelada de TNT (9):

Distancia (ft)	30	60	80	120	200
t_a (ms)	4	18	37	59	123
t_+ (ms)	5,5	12	16	18	22,5
α	3,50	1,08	0,87	0,93	1,15

Para describir matemáticamente la fase positiva de la curva de sobrepresión mostrada en la figura 3.8 puede utilizarse una ecuación del tipo Friedlander modificada (9):

$$P = P_0 \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) \exp(-\alpha t/t_+) \quad [3.13]$$

donde t comienza a contar a partir de la llegada de la onda de presión. Otras propiedades importantes son la velocidad de la onda de choque, la presión dinámica máxima y la sobrepresión máxima por reflexión, que pueden expresarse (9) como se indica a continuación. La velocidad de la onda de choque en aire, U , es:

$$U = C_o \left(1 + \frac{6 P^\circ}{7 P} \right)^{1/2} \quad [3.14]$$

donde C_o es la velocidad del sonido en aire, y P y P° respectivamente la presión atmosférica y la sobrepresión máxima. La presión dinámica se refiere a la transformación de la energía cinética del viento generado en la explosión en energía de presión al encontrar una superficie en su camino, y su evolución se muestra también en la figura 3.8. Para explosiones en aire puede expresarse como

$$q^\circ = \frac{5}{2} \frac{(P^\circ)^2}{7 P + P^\circ} \quad [3.15]$$

donde q° es la presión dinámica máxima. Por último, es importante considerar la sobrepresión máxima por reflexión. Cuando la onda de presión choca con una superficie sólida que no es paralela a la dirección de propagación se produce una reflexión de la misma, y la presión reflejada varía no sólo con el valor de P° , sino también con el ángulo de incidencia. La sobrepresión máxima tiene lugar cuando la onda de presión encuentra una *superficie perpendicular* a su dirección de propagación. En ese caso la relación entre la sobrepresión experimentada y la que tiene lugar sobre una superficie paralela a la dirección de propagación viene dada por:

$$(P^\circ)_r = 2 P^\circ \left(\frac{7 P + 4 P^\circ}{7 P + P^\circ} \right) \quad [3.16]$$

donde $(P^\circ)_r$ es la sobrepresión producida sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación como consecuencia de la reflexión. La ecuación [3.16] muestra que la sobrepresión reflejada máxima es al menos el doble de P° (para explosiones débiles en las que P° es despreciable frente a la presión atmosférica), pudiendo llegar a ser 8 veces

mayor (para explosiones con alto valor de P° en que ocurre lo contrario).

Estimación de los efectos de una explosión en función de la distancia

Aunque también influyen otros factores como la velocidad a que aumenta la presión, la duración de la fase positiva, y la magnitud del enrarecimiento posterior, el daño producido por una explosión depende de manera principal de la sobrepresión máxima. Así, se cita (10) una sobrepresión de 0,15 psi como típica para la ruptura de cristales, la de 1 psi para demolición parcial de casas bajas y una de 10 psi como suficiente para la destrucción total de edificios. Una relación más completa se proporciona en la tabla 5.3.

A pesar de las limitaciones debidas a su carácter simplificado, el modelo del *equivalente en TNT* sigue siendo muy ampliamente utilizado en la predicción de sobrepresiones a una distancia determinada del centro de una explosión. Este modelo se basa en la ley de escalado, establecida empíricamente a partir de pruebas realizadas utilizando explosivos. Esta ley establece que los efectos de dos explosiones son los mismos sobre puntos que se encuentran a la misma distancia reducida, expresada como:

$$z = R / (W_{TNT})^{1/3} \quad [3.17]$$

donde z es la distancia reducida ($m \cdot kg^{-1/3}$), R es la distancia real (m) y W_{TNT} es la masa de TNT utilizada en la explosión o en su caso el equivalente en TNT de la energía liberada. Estrictamente, el factor de escalado es la raíz cúbica de la energía en lugar de la masa de explosivo, pero para un explosivo en particular suele suponerse que la energía liberada es proporcional a la masa involucrada. De la ecuación [3.17] se deduce que las distancias a las que dos explosiones distintas producen los mismos efectos vienen dadas por la relación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_{TNT,1}}{W_{TNT,2}} \right)^{1/3} \quad [3.18]$$

La sobrepresión se representa en función de la distancia reducida en la figura 3.9. Es de señalar que la inversión térmica en la atmósfera

puede perturbar la propagación de una onda de choque. Esto ocasiona que, para valores por debajo de aproximadamente 0,25 atmósferas, una sobrepresión determinada puede tener lugar a distancias considerablemente mayores que las obtenidas de la figura 3.9 sin considerar inversión atmosférica. Asimismo, en la bibliografía suelen presentarse datos de los parámetros de explosión por separado, según correspondan a explosiones elevadas o a ras de suelo. Sin embargo, para el caso de la sobrepresión estas diferencias son casi siempre menores que el 20 por 100, por lo que se han representado conjuntamente en la figura 3.9.

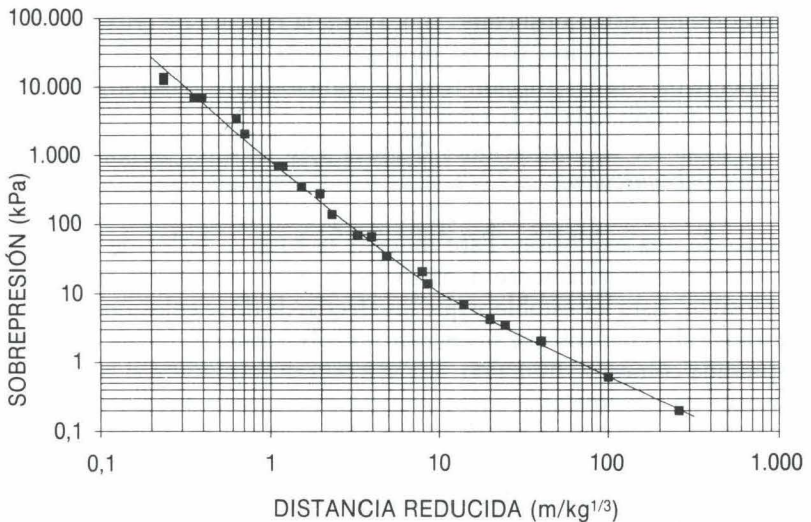


Figura 3.9. Curva de sobrepresión (P^0) frente a la distancia reducida para la aplicación del modelo TNT. La gráfica contiene datos de diversas referencias (2, 9, 11), que corresponden tanto a explosiones esféricas (elevadas) como semiesféricas (a ras de suelo).

El procedimiento para establecer los efectos de la explosión a una distancia determinada comienza con el cálculo de la energía involucrada, expresada en masa equivalente de TNT. Con este dato se calcula la distancia reducida dividiendo por $(W_{TNT})^{1/3}$ y se estima la sobrepresión usando la gráfica 3.9. Una vez obtenida la sobrepresión a una distancia determinada, la vulnerabilidad de personas e instalaciones puede estimarse con los métodos descritos en el capítulo 5.

A la hora de estimar algunos efectos, como, por ejemplo, muertes o heridas por impactos recibidos a consecuencia de la explosión, el parámetro relevante de correlación es el impulso, I_p , que se define como

$$I_p = \int_0^{t_+} P(t) dt \quad [3.19]$$

Si se sustituye la ecuación [3.13] y se integra, se obtiene la expresión para el impulso en función de los parámetros de la ecuación modificada de Friedlander:

$$I_p = P^{\circ} t_+ \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha}) \right] \quad [3.20]$$

Ejemplo 3.5:

Estimar, para distancias comprendidas entre 100 m y 1 km, la sobrepresión que se alcanzaría en explosiones equivalentes a 500 y 5.000 kg de TNT respectivamente. Calcular en ambos casos el radio del círculo de daños dentro del cual es probable que los edificios queden inhabitables (demolición parcial) como consecuencia de la explosión.

Las distancias reducidas se calculan dividiendo la distancia buscada por $(W_{TNT})^{1/3}$. Conocida la distancia reducida, la gráfica 3.9 proporciona la sobrepresión. A continuación se presentan los cálculos para 500 kg de TNT:

Distancia (m)	100	200	400	700	1.000
Distancia reducida (m/kg ^{1/3})	12,6	25,2	50,4	88,2	126,0
Sobrepresión (kPa)	7,5	3,0	1,3	0,72	0,45

La figura 3.10 muestra la variación de la sobrepresión con la distancia. Como se verá en el capítulo 5, para que la explosión produzca la demolición parcial de casas son suficientes unos 7 kPa. Esto ocurre a distancias inferiores a unos 110 metros para la explosión de 500 kg equivalentes de TNT, y a unos 240 metros para el caso de la explosión de 5.000 kg.

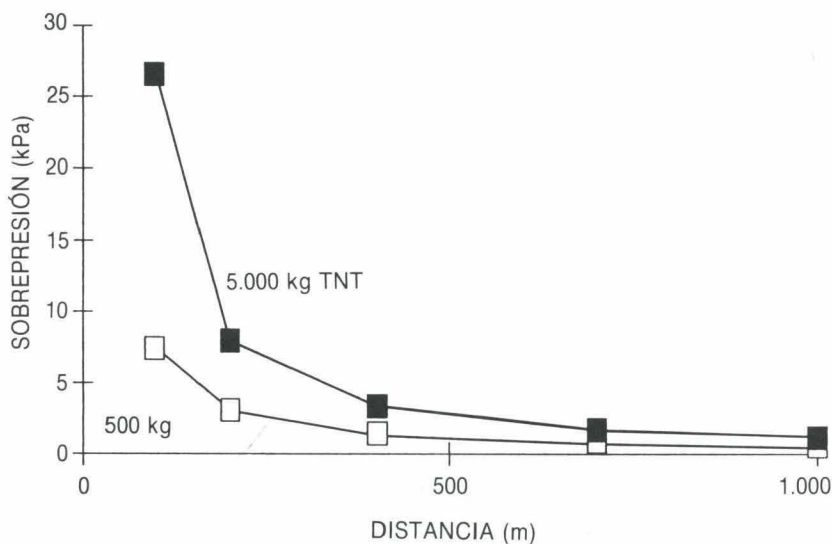


Figura 3.10. Sobrepresión en función de la distancia para explosiones de 500 y 5.000 kg equivalentes de TNT.

Explosión de nubes de vapor no confinadas (EVNC)

Supongamos que una fuga de propano de un depósito de almacenamiento da origen a una nube con concentraciones dentro del intervalo de inflamabilidad. En su avance la nube puede encontrar fuentes de ignición como llamas abiertas, hornos a fuego directo, aparatos eléctricos o cigarrillos encendidos. Si la ignición de la nube tiene lugar, en la mayoría de los casos ocurrirá cerca del extremo de la nube, a medida que ésta avanza. Como ya se ha indicado, si esto ocurre inmediatamente de producirse la emisión, los resultados del accidente serán un incendio flash o una explosión de pequeña magnitud. A medida que avanza el tiempo, el material acumulado en la nube llega a ser suficiente como para que la explosión pueda ocasionar efectos de destrucción importantes. Lees (9) revisa la discusión sobre el valor umbral de la nube que puede dar origen a una explosión en lugar de un incendio flash. Aunque existen discrepancias sobre este punto, la mayoría de los autores consideran que por debajo de 1 a 15 toneladas de vapor inflamable en la

nube las explosiones son improbables, aunque se ha citado valores inferiores, del orden de algunas decenas de kg, para especies muy reactivas como el hidrógeno. A este respecto, debe tenerse en cuenta que la cantidad de material que puede acumularse en un tiempo corto puede ser muy grande si el caudal de material inflamable emitido lo es. Por ejemplo, se calcula que en la explosión de la nube de ciclohexano en Flixborough (la mayor explosión registrada en Inglaterra en tiempos de paz), el retraso de la ignición estuvo en torno a los 50 segundos (3). Finalmente, si el encuentro con la fuente de ignición no tiene lugar o, si ocurre muy tarde, la dispersión del propano en la atmósfera llegará a rebajar su concentración por debajo del límite inferior de inflamabilidad (2,2 por 100), y la explosión no tendrá lugar.

El modelo del equivalente en TNT puede aplicarse a la estimación de efectos de una EVNC, para lo cual se requiere calcular previamente la fracción de la energía total de la explosión que se utiliza en la onda de choque. Una vez estimado el valor correspondiente, se convierte a la masa equivalente de TNT:

$$W_{TNT} = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \quad [3.21]$$

En la ecuación anterior W_{TNT} es la masa equivalente de TNT (kg), que produciría los mismos efectos que la explosión, η representa el rendimiento de la explosión, es decir, el cociente entre la energía en la onda de choque y la energía teóricamente disponible en la explosión, M es la masa total de material inflamable en la nube (kg), E_c el calor de combustión inferior del material (kJ/kg), y E_{TNT} el calor de combustión del TNT (aproximadamente 4.680 kJ/kg). Es de señalar que la obtención del valor de M no es trivial. Una posibilidad es suponer que todo el material emitido forma parte de la región inflamable de la nube, lo que puede llevar a sobreestimaciones considerables de los efectos de la explosión. Un procedimiento más realista consiste en aplicar un modelo de dispersión (ver capítulo 4) a la emisión, y estimar el volumen de la nube dentro de la región de inflamabilidad en un instante dado.

A partir del valor de W_{TNT} obtenido se procede en el cálculo de la sobrepresión utilizando la gráfica 3.9. Existen dificultades considerables para estimar el valor de η , ya que es difícil correlacionarlo con datos de accidentes debido a la incertidumbre sobre la cantidad precisa de vapor inflamable involucrado en EVNC históricas. Se admite en general (9),

(11) que, tomando como base de cálculo la cantidad total de vapor inflamable en la nube, el valor de η está entre el 1 y el 10 por 100 para la gran mayoría de las explosiones. Se han citado excepciones en las que se llega hasta valores calculados de 25 ó 50 por 100, especialmente para nubes fuertemente asimétricas, aunque la inmensa mayoría de los datos disponibles sitúan el rendimiento de la explosión en el intervalo citado.

También hay que tener en cuenta que, a pesar del amplio uso del modelo TNT, las explosiones de nubes de vapor inflamable presentan algunas características diferenciales con respecto a las de alto explosivo. Las principales diferencias pueden resumirse en cuatro puntos: *i*) una nube de vapor inflamable se extiende sobre un volumen grande, comparado con el que ocuparía el explosivo equivalente, *ii*) la EVNC proporciona valores de sobrepresión inferiores a los del modelo TNT cerca del epicentro de la misma, *iii*) inicialmente la forma de la onda de choque es distinta en una EVNC y en la explosión de un alto explosivo, y *iv*) en una EVNC la duración temporal de la onda de choque es mayor. La principal diferencia es la segunda, que hace que el modelo TNT sólo pueda aplicarse para calcular los efectos de la explosión fuera del área de la nube.

Modelo de correlación de TNO

Como se ha indicado en el apartado anterior, aunque el modelo TNT está bien desarrollado y predice con exactitud razonable los resultados de explosiones de TNT y otros altos explosivos, su aplicación al caso de las explosiones de nubes de vapor no confinadas está restringida por la dificultad de estimar un valor adecuado del rendimiento de la explosión. El modelo de correlación de TNO (7) es un intento alternativo de relacionar la energía total proveniente de la combustión del vapor inflamable en la nube con los efectos de la explosión, también mediante un modelo muy simplificado, pero que en este caso utiliza directamente datos históricos de EVNC. Este modelo fue desarrollado para energías totales en la nube comprendidas entre 5×10^9 J (que correspondería a una nube de unos 100 kg de hidrocarburos) y 5×10^{12} J. Por debajo de este intervalo se supone que los efectos de la explosión son de pequeña magnitud, y por encima (nubes de unas 100 toneladas de hidrocarburos), la extrapolación es demasiado grande y las predicciones no son fiables.

El modelo TNO no se aplica a los materiales que clasifica como «alta explosividad» (como acetileno, hidrógeno y óxido de etileno), ni a los de «baja explosividad» (metano, amoníaco). En cambio puede aplicarse a hidrocarburos como etano, etileno, propano, propeno, butano, isobutano, pentano y ciclohexano, clasificados como de «explosividad media» (7). También se requiere estimar un rendimiento de la explosión en este modelo, aunque se sugieren valores para el mismo. Se considera que el rendimiento de la explosión es el producto de dos factores

$$\eta = \eta_c \eta_m \quad [3.22]$$

donde η_c indica la pérdida de rendimiento debido a la no estequiometría de la nube, fijándose arbitrariamente su valor en 0,3, y η_m representa el rendimiento mecánico. Los valores sugeridos para η_m son 0,33 para una combustión isocórica y 0,18 para una combustión isobárica. Puesto que se considera probable que en una EVNC exista alguna forma de confinamiento, el valor sugerido para η_m sería más próximo al de una combustión isocórica, de lo que resulta un rendimiento global de aproximadamente el 10 por 100 a aplicar con carácter general a no ser que las circunstancias particulares de la explosión aconsejen otros valores para η_c y η_m .

El modelo TNO establece círculos de daño de acuerdo con la expresión

$$R_i = C_i (\eta ME_c)^{1/3} \quad [3.23]$$

donde R_i es la distancia *máxima* en metros, dentro de la cual puede esperarse un tipo determinado de daño, C_i es una constante obtenida empíricamente para el tipo de daño i , y el producto ME_c corresponde a la energía (expresada en julios en este caso) obtenida de la combustión de todo el material inflamable en la nube, calculada como el producto de la masa total de vapor inflamable emitido por su calor de combustión inferior. Los valores de la constante se indican en la tabla 3.4.

Ejemplo 3.6:

La rotura de una conducción da origen a una nube con unos 3.000 kg de propano, que entra en ignición. Estimar la distancia a la que se producirá la ruptura de un 10 por 100 de los cristales (lo que corresponde a una sobrepresión de aproximadamente 0,02

Ejemplo 3.6 (continuación):

bares, según la tabla 5.3), utilizando el modelo del equivalente en TNT y el modelo de correlación de TNO.

Aplicación del modelo del equivalente en TNT

A partir de la figura 3.9, una sobrepresión de 0,02 bares (2 kPa) corresponde a una distancia reducida de unos 35 m.kg^{-1/3}. La energía total en la nube se calcula teniendo en cuenta el calor de combustión del propano (19.900 Btu/lb, ver tabla 2.2), obteniéndose $ME_c = 1,39 \times 10^{11}$ J. Si se supone un rendimiento del 10 por 100 para la explosión, el peso equivalente en TNT es de 2.970 kg (ecuación [3.21]). Por tanto, la distancia para una sobrepresión de 0,02 bares será

$$R = (35)(2.970)^{1/3} = 503 \text{ m}$$

Si el rendimiento fuese de sólo el 1 por 100, $R = (35)(297)^{1/3} = 234$ m. Como se ha indicado anteriormente, la mayor parte de las explosiones estarían dentro de estos límites, aunque existen excepciones notables.

Aplicación del modelo de correlación de TNO

El valor $1,39 \times 10^{11}$ J está dentro de los límites y el propano está clasificado como compuesto de reactividad intermedia, por lo que el modelo puede aplicarse. De acuerdo con la tabla 3.4 el valor de C_i sería 0,4. Según la ecuación [3.23]

$$R = 0,4(0,1 \times 1,39 \times 10^{11})^{1/3} = 962 \text{ m}$$

La diferencias en las estimaciones son importantes (un factor de 4 aproximadamente). Esto se debe principalmente a la incertidumbre sobre los factores de rendimiento a aplicar. Además hay que tener en cuenta el hecho de que el modelo TNO proporciona distancias máximas para un daño determinado.

Tabla 3.4. Valores de la constante C_i para la aplicación del modelo de correlación de TNO (7)

C_i (m.J ^{-1/3})	Tipo de daño causado
0,03	Daños muy importantes a edificaciones y a equipos de proceso
0,06	Daños reparables a edificaciones. Daños en fachadas de viviendas
0,15	Rotura de cristales capaz de causar heridas
0,4	Umbral de rotura de cristales (10 por 100 del total)

Incendios flash

En el contexto de este capítulo seguiremos la convención habitual en la literatura sobre seguridad en la industria química, denominando incendio flash a la combustión muy rápida de una mezcla de vapor inflamable y aire con características (en virtud de su masa, calor de combustión, inflamabilidad, etc.), tales que los efectos de presión sean despreciables, quedando sólo como daños a considerar los correspondientes a la radiación térmica.

Como se ha visto, el punto de transición entre un incendio flash y una EVNC no se conoce con precisión. Por otro lado, el modelado de los incendios flash no está bien desarrollado. Se han realizado intentos de simulación de efectos basados en la radiación térmica, calculada a partir de la temperatura de la llama. Lees (9) expone brevemente el tratamiento propuesto. Sin embargo, las inexactitudes en la estimación de esta temperatura causan errores importantes, dada la dependencia de la energía radiada con la cuarta potencia de la temperatura. Otros modelos para incendio flash son más simples y se basan en el uso de un modelo de dispersión de gases para determinar una zona de alcance, (por lo general la región del espacio correspondiente al límite inferior de inflamabilidad), limitándose la consideración de los efectos térmicos al interior de dicha zona.

Ruptura de recipientes

Para que se produzca la ruptura de un recipiente que contiene un fluido presurizado, debe excederse su resistencia mecánica. Las causas

inmediatas pueden ser variadas, incluyendo el fallo del equipo de regulación y alivio de presión, defectos de diseño o de construcción, reducción del espesor de pared debido a corrosión, erosión o ataque químico, y reducción de la resistencia debido a sobrecalentamiento o sobreenfriamiento, defectos en la estructura o ataque químico. Es importante considerar la causa de la ruptura del recipiente, ya que dependiendo de ésta el fallo ocurrirá aproximadamente a la presión de operación (por ejemplo, cuando la causa es la reducción del espesor de pared debido a corrosión), o a presiones elevadas (por ejemplo, cuando falla el equipo de regulación y alivio de presión). En cualquier caso se produce la liberación de la energía almacenada, lo que da lugar a la formación de la onda de choque correspondiente y acelera los fragmentos del recipiente resultantes de la ruptura. Éstos se convierten en proyectiles peligrosos y pueden dar origen a daños adicionales. También, como ya se ha señalado, aunque inicialmente sólo existiera explosión física, si el gas involucrado es combustible puede tener lugar su ignición, con lo que entran en juego otros factores más allá de las características de una explosión física.

Energía de la explosión

La energía máxima que puede liberarse en la ruptura de un recipiente sometido a una presión mayor que la que puede soportar sería aquella dada por la expansión del gas contenido en el mismo. Por lo general, la expansión puede aproximarse por una isentrópica, por lo que para un gas ideal:

$$E = \frac{P_1 V_1}{k - 1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad [3.24]$$

donde P_1 y V_1 representan respectivamente la presión y volumen iniciales, P_2 es la presión final a la que se expande el gas (habitualmente la atmosférica), y k es el coeficiente de la expansión isentrópica.

Al igual que ocurre con las explosiones no confinadas, no toda la energía máxima está disponible para la formación de la onda de choque. Además de otras pérdidas menores, en una explosión real parte de esta energía se invierte en suministrar energía cinética y potencial a los

fragmentos resultantes de la explosión. Así, en la fractura frágil de un recipiente en fragmentos pequeños hasta un 80 por 100 de la energía puede invertirse en la onda de choque, mientras que en el caso de que se formen grandes proyectiles este valor puede bajar hasta un 40 por 100, siendo el 60 por 100 restante utilizado fundamentalmente en impartir energía a los fragmentos (11).

Formación de proyectiles

A no ser que la energía almacenada sea extraordinariamente grande, el mayor peligro de la explosión de un recipiente se debe a los proyectiles formados. Además del peligro intrínseco que el impacto de un fragmento a gran velocidad representa para las personas y las instalaciones, los proyectiles formados pueden dar origen a accidentes en cadena, el denominado «efecto dominó». Así, por ejemplo, una explosión relativamente pequeña que resulte en formación de proyectiles puede dar origen a que uno de los proyectiles formados perfora un recipiente conteniendo gas combustible, que a su vez forme una nube inflamable que cause una explosión mayor.

En explosiones que dan origen a formación de proyectiles es importante estimar el alcance y la penetración de los mismos. La velocidad inicial de los proyectiles depende de la energía de la explosión, de la masa del fragmento y de sus dimensiones, que influyen en la resistencia que encuentra en el desplazamiento por el aire. Moore (12) proporciona una ecuación simple para la estimación de la velocidad inicial:

$$u = 2,05 \left(\frac{PD^3}{W} \right)^{0,5} \quad [3.25]$$

donde u es la velocidad inicial del proyectil (ft/s), P es la presión de ruptura (psig), D el diámetro del fragmento (pulgadas) y W su masa (libras). Debido a la resistencia del aire al desplazamiento de los proyectiles, la estimación de velocidad inicial obtenida en esta ecuación debe corregirse a la baja cuando se pretende calcular velocidades a distancias significativas del origen de la explosión.

El alcance de los proyectiles se estima, por lo general, a partir de correlaciones empíricas de datos obtenidos en explosiones de TNT. La

figura 3.11 muestra la correlación obtenida a partir de los datos de Clancey (10), con un solo parámetro, la masa de explosivo. En cuanto a penetración, existen numerosas ecuaciones citadas en la bibliografía para predecir la penetración de proyectiles en distintas superficies, casi siempre en impactos perpendiculares a las mismas. Lees (9) cita varias expresiones para el cálculo de la penetración, dependiendo de la velocidad del fragmento, su masa y el área que presenta al impacto.

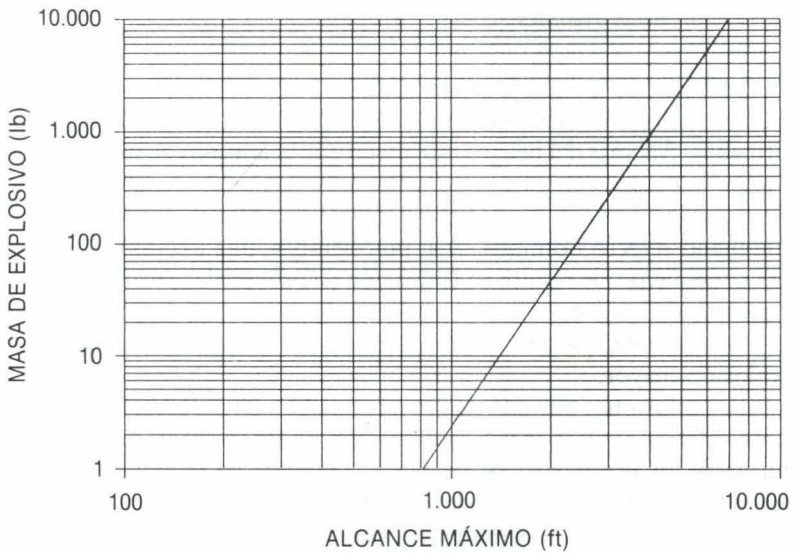


Figura 3.11. Alcance máximo horizontal de fragmentos originados a partir de la explosión de una carga de TNT a nivel del suelo.

Efectos de presión

La sobrepresión a una distancia dada puede calcularse con el método del equivalente en TNT siempre y cuando se conozca la influencia que el recipiente ejerce sobre la propagación de la onda de presión. El método propuesto en una reciente publicación del CCPS (11) supone que la expansión del gas inicialmente contenido en el recipiente ocurre isotérmicamente, de manera que la energía de la explosión puede expresarse como

$$W = 0,0219 P_1 V_1 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad [3.26]$$

donde W viene expresado en gramos equivalentes de TNT, las presiones en atmósferas y el volumen en litros. El gas no se expande libremente, sino que está contenido en un recipiente que colapsa. Para tener en cuenta la influencia del recipiente se calcula una distancia virtual al centro de explosión, lo que requiere una estimación previa de la presión sobre la superficie del recipiente, P_s . Ésta se obtiene de la ecuación de Prugh (13):

$$P_B = P_s \left[1 - \frac{3,5(\gamma - 1)(P_s - 1)}{[(\gamma T/M)(1 + 5,9 P_s)]^{0,5}} \right]^{-2\gamma/(\gamma-1)} \quad [3.27]$$

donde P_B y P_s son, respectivamente, la presión a la que se produce el estallido del recipiente y la presión estimada en la superficie del mismo (ambas en bares absolutos), γ es el cociente de capacidades caloríficas, T es la temperatura absoluta (K), y M el peso molecular del gas. La ecuación anterior debe resolverse iterativamente, ya que es implícita para el valor P_s . Una vez conocida la presión en la superficie del recipiente P_s puede utilizarse la gráfica 3.9 y la ecuación [3.17] para calcular la distancia R a la que se produciría la presión P_s , tomando como valor de W el calculado en la ecuación [3.26]. La distancia virtual antes aludida se calcula sustrayendo el radio real del recipiente, que es conocido, de la distancia R calculada, y el valor obtenido se utiliza para corregir las distancias en las estimaciones de efectos de presión.

Ejemplo 3.7:

Debido a tensiones mecánicas no detectadas, un recipiente esférico de 0,5 m³ de capacidad, que contiene aire a 412 atmósferas absolutas y 20° C sufre una ruptura catastrófica. Estimar la sobrepresión producida a una distancia de 20 metros.

El valor de W se obtiene sustituyendo $P_1 = 412$ atm, $P_2 = 1$ atm y $V_1 = 500$ litros en la ecuación [3.26]. Se obtiene $W = 27,2$ kg de TNT. La presión en la superficie del recipiente puede

Ejemplo 3.7 (continuación):

estimarse a partir de la ecuación [3.27], con $P_B = 412$ atmósferas o 417,3 bares absolutos, $M = 28,9$, $\gamma = 1,4$ y $T = 293,15$ K. Tras la iteración, se obtiene para P_s un valor de 9,48 bares absolutos, o 8,47 bares de sobrepresión.

El siguiente paso consiste en calcular la distancia a la que una explosión de 27,2 kg de TNT produciría una sobrepresión de 8,47 bares o 847 kPa. En la figura 3.9 esta sobrepresión corresponde a una distancia reducida de aproximadamente $z = 1$, es decir, a una distancia real de 3 m.

El efecto de la pared del recipiente es reducir la sobrepresión en un punto dado con respecto a la que se obtendría de la explosión de la misma masa equivalente de explosivo sin confinar. Por tanto, la existencia de la pared del recipiente implica que para obtener los mismos efectos las distancias deberán ser menores que las de una explosión libre. Un depósito esférico de 0,5 m³ de capacidad tiene un radio de 0,49 m. Puesto que P_s es la presión sobre la superficie del recipiente, es decir, a una distancia de 0,49 m, la diferencia $3,0 - 0,49 = 2,51$ m constituye la distancia virtual que hay que *añadir* para realizar estimaciones de sobrepresión.

Los efectos que se obtienen a 20 m son, por tanto, los que se obtendrían a 22,51 m en una explosión sin confinar. $z = 22,51 / (27,2)^{1/3} = 7,5$ m kg^{-1/3}. Para una distancia reducida igual a 7,5 la sobrepresión es de aproximadamente 17 kPa.

Incendios de líquido en charco

Los vapores emitidos por líquidos inflamables pueden dar origen a una mezcla inflamable si la temperatura del líquido está por encima del punto de destello. Esto puede tener lugar en un depósito de combustible (*tank fire*), o tras un derrame o fuga al exterior (*pool fire*), y en este último caso el derrame puede ser confinado (por un dique de contención, o por la topografía del terreno próximo), o no confinado. Los incendios de este tipo suelen ser localizados en sus efectos, siendo a menudo los efectos de propagación más que el riesgo intrínseco del suceso el peligro

principal a considerar. Entre otras posibles circunstancias negativas, el incendio del líquido derramado puede afectar al mismo o a otros depósitos, calentando su contenido (con el aumento consiguiente de la presión) y su pared metálica, lo que causa la disminución de su resistencia mecánica. Esto constituye una de las causas más frecuentes de las explosiones BLEVE, que se tratan más adelante.

El análisis de efectos en este apartado pretende realizar una estimación de la radiación que se emitiría en distintos escenarios de incendio de líquido en depósitos o de incendio de vertidos de líquidos inflamables. Los resultados del análisis tienen obvias implicaciones en el diseño de instalaciones destinadas a contener líquidos inflamables, así como en las distancias a guardar entre las distintas unidades de una planta.

El esquema de cálculo a seguir se detalla en la figura 3.12. A pesar del nombre de incendios de líquido en charco, lo que realmente se quema es el material que se evapora del líquido que está en la base de las llamas. En el caso de incendios confinados, el tamaño del incendio está determinado por las dimensiones del depósito o del dique de contención (modificadas en su caso por la deformación de la llama). En el caso de los incendios no confinados, puede producirse una variación importante de las dimensiones del incendio a medida que el líquido derramado se extiende. En cualquier caso es necesario establecer las dimensiones del incendio, en función del tiempo si son variables. Para ello se requieren cálculos previos, como los que se describen en el capítulo siguiente. Así, si el derrame procede de una hipotética perforación en la pared de un depósito, se utiliza un submodelo para derrame de líquidos que establece el caudal de vertido en función del tiempo. La consideración del caudal de vertido y de las pérdidas en la evaporación y combustión del líquido durante el incendio, junto con la información sobre la topografía de la zona inmediata al derrame permiten estimar las dimensiones del charco (y, por lo tanto, del incendio), en un instante dado. Los pasos siguientes en la figura 3.12 conducen a la estimación de la radiación recibida por los cuerpos circundantes. Esta información puede utilizarse junto con los modelos de vulnerabilidad descritos en el capítulo 5 para la estimación de daños a personas e instalaciones.

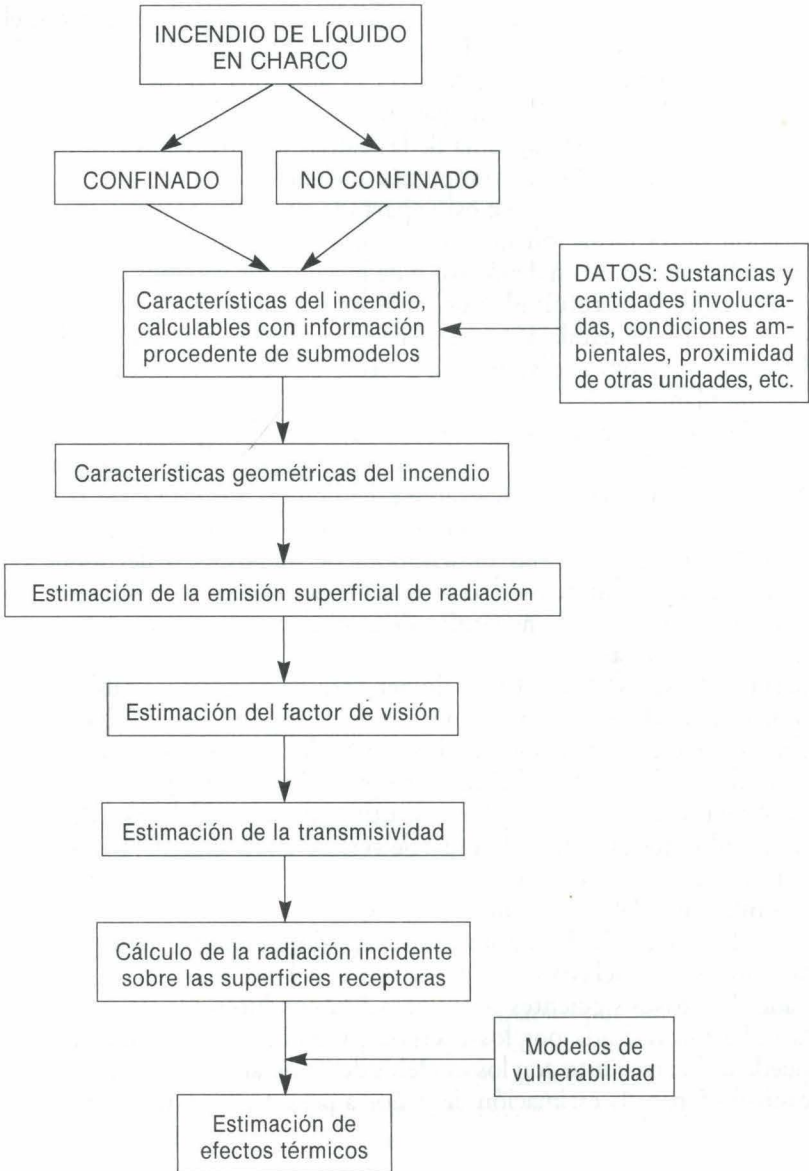


Figura 3.12. Esquema de cálculo para incendios de líquido en charco.

Dimensiones de la llama

En muchos casos, el tamaño del incendio viene determinado por barreras físicas, como accidentes locales, o por la presencia de drenajes hacia zonas de embalsamiento lejos de los depósitos. Por lo general se supone una forma circular para la base del incendio, y en los casos en que los diques de contención den origen a charcos cuadrados o rectangulares se suele utilizar un diámetro equivalente.

El caso más complicado es el de derrame semicontinuo sobre un terreno sin accidentes topográficos capaces de contener el vertido. En este caso el diámetro máximo se alcanza cuando el caudal de fuga de líquido se iguala con el consumo del mismo a causa del incendio. Un ejemplo de este tipo de análisis aplicado al caso de derrames de líquido en evaporación puede encontrarse en el trabajo de Opschoor (15), que supone que la variación del radio del charco viene dada por

$$\frac{dr}{dt} = (Cg(h - h_{\min}))^{0,5} \quad [3.28]$$

donde r es el diámetro del charco, C una constante, g la aceleración de la gravedad, h la altura de la capa de líquido en un instante dado y h_{\min} el espesor mínimo que puede tener la capa de líquido sobre el terreno. La aproximación anterior sólo es válida para capas líquidas de poca altura, en las que C tiene un valor comprendido entre 1 y 4. La fuerza impulsora para la extensión del vertido es la diferencia entre la altura del líquido en un instante dado y el espesor mínimo, característico para el tipo de superficie sobre la que ocurre el derrame. Se recomienda un valor de h_{\min} de 5 mm en el caso de superficies lisas, mientras que en superficies con cierta rugosidad el valor de h_{\min} puede ser de varios centímetros.

Un ejemplo de ecuaciones empíricas para la estimación del radio de un charco de líquido derramado son las recogidas por Elia (16). Para el derrame instantáneo de una masa m (kg) de líquido, el radio (durante la fase de expansión del charco) viene dado por

$$r = \left(\frac{t}{B}\right)^{0,5} \quad [3.29]$$

con
$$B = \left[\frac{\pi \rho_L}{8 g m} \right]^{0,5} \quad [3.30]$$

donde t es el tiempo en segundos, ρ_L la densidad del líquido (kg/m^3), y g la aceleración de la gravedad (m/s^2). En el caso de un derrame continuo las ecuaciones correspondientes serían

$$r = \left(\frac{t}{B} \right)^{0,75} \quad [3.31]$$

con
$$B = \left[\frac{9\pi\rho_L}{32 g m''} \right]^{0,333} \quad [3.32]$$

donde m'' es el caudal de vertido (kg/s).

Para un incendio de base circular con un radio determinado, existen ecuaciones que permiten calcular la altura de la llama. La más conocida es la de Thomas (17), que proporciona la relación altura/diámetro (H/D), en ausencia de viento:

$$\frac{H}{D} = 42 \left[\frac{M_b}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0,61} \quad [3.33]$$

donde M_b es la velocidad de combustión por unidad de superficie ($\text{kg/m}^2\text{s}$), cuyo cálculo se describe más adelante, ρ_a es la densidad del aire ambiente (kg/m^3) y g la aceleración de la gravedad (m/s^2). La altura de un incendio de líquido en charco de forma cilíndrica suele estar entre dos y tres veces el diámetro de la base.

La presencia de viento puede alterar la forma de la llama inclinándola y, con vientos más fuertes, la fase de las llamas puede deformarse en la dirección del viento. La mayoría de las veces es suficiente con calcular la inclinación de la llama, e incluso ésta suele ignorarse en la mayor parte de los análisis de efectos, excepción hecha del caso en que, a causa de la inclinación, las llamas incidan directamente sobre otra unidad. Desde el punto de vista de los efectos térmicos, siempre que no haya una incidencia directa de la llama, la presencia de viento tiene consecuencias hasta cierto punto contrapuestas, ya que, por un lado, las superficies cercanas corriente abajo de la llama pueden recibir más ra-

diación debido a la inclinación de ésta, pero, por otro, un viento mayor contribuye en cierta medida a refrigerar la superficie que recibe la radiación. La inclinación de la llama (ver figura 3.13) puede calcularse de acuerdo con (18):

$$\cos\beta = 1, \text{ para } u_w^* < 1 \quad [3.34a]$$

$$\cos\beta = \frac{1}{(u_w^*)^{0,5}}, \text{ para } u_w^* > 1 \quad [3.34b]$$

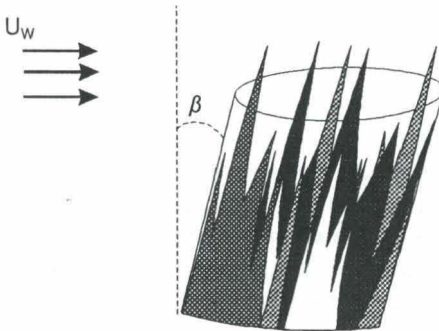
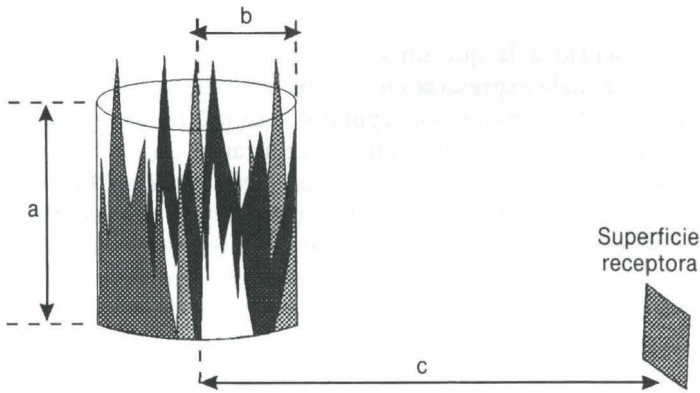


Figura 3.13. Parámetros geométricos de un incendio de líquido en charco de forma cilíndrica.

$$\text{donde } u_{w}^{*} = u_w \left(\frac{\rho_v}{gDM_b} \right)^{1/3} \quad [3.35]$$

En la ecuación anterior u_w es la velocidad del viento (m/s), u_w^{*} la velocidad del viento adimensional y ρ_v la densidad del vapor (kg/m^3). El resto de los parámetros ya han sido definidos con anterioridad.

Velocidad de combustión

La velocidad a la que un incendio de líquido en charco quema combustible suele expresarse en m/s (m^3 de líquido consumido por m^2 de superficie del charco y por segundo). Los incendios de gran tamaño queman a velocidad aproximadamente constante, característica del tipo de material. Puesto que la combustión tiene lugar en fase vapor, la velocidad de combustión vendrá determinada por la velocidad de evaporación del líquido. El conocimiento de la velocidad de combustión proporciona el calor generado por unidad de superficie de líquido, y sirve además para estimar la duración del incendio. Es necesario distinguir dos situaciones:

- i) Líquidos con temperatura de ebullición normal menor que la temperatura ambiente

Cuando ocurre un derrame de este tipo, si el líquido estaba almacenado bajo presión a la temperatura ambiente, tras el vertido existe un período transitorio extremadamente breve, en el cual parte del derrame se evapora, enfriando el líquido restante hasta que se alcanza la temperatura de ebullición (ver capítulo 4), seguido de un período en el que el seno de la masa líquida está a la temperatura de ebullición. Los cálculos del incendio se realizan para este segundo período. El calor necesario para la evaporación proviene fundamentalmente de la radiación de las llamas, aunque también pueden existir contribuciones significativas del enfriamiento del terreno en los instantes iniciales del vertido. Hoftizjer (18) calcula que para un derrame de propano líquido, después de aproximadamente un minuto, más del 80 por 100 del calor de evaporación se suministra a partir de la radiación de la llama.

La estimación de la velocidad de combustión de líquidos cuya temperatura de ebullición es menor que la temperatura ambiente se puede realizar mediante la ecuación (18)

$$M_b = 0,001 \frac{(-\Delta H_{comb})}{\Delta H_v} \quad [3.36]$$

donde la velocidad de combustión M_b viene dada en $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, y $(-\Delta H_{comb})$ y ΔH_v son, respectivamente, los calores de combustión y vaporización de la sustancia involucrada.

ii) Líquidos con temperatura de ebullición mayor que la temperatura ambiente

En este caso ocurre en un principio la evaporación superficial, sin ebullición de todo el líquido. El calor procedente de la radiación se invierte no sólo en evaporar el líquido, sino en llevarlo hasta la temperatura de ebullición. Esto se puede tener en cuenta sustituyendo ΔH_v en el denominador de la ecuación [3.36] por $C_p\Delta T + \Delta H_v$, donde ΔT representa la diferencia entre la temperatura inicial del líquido y su temperatura de ebullición.

Intensidad de la radiación emitida

Una vez obtenida la velocidad de combustión, el siguiente paso es estimar la radiación que el incendio emite sobre los alrededores. El flujo de radiación procedente de las llamas de un incendio puede calcularse a partir de la ecuación de Stefan-Boltzmann, conocida la temperatura de la llama. Sin embargo, el uso de este método presenta el inconveniente de la incertidumbre en la temperatura de la llama, lo que como se ha indicado con anterioridad, puede dar origen a errores importantes, dada la sensibilidad de la ecuación de Stefan-Boltzmann a la temperatura. Por lo tanto, suelen utilizarse otras aproximaciones.

Una posibilidad es utilizar valores de flujos de radiación medidos en incendios de distintos materiales. La intensidad de la radiación emitida por un incendio de líquido en charco depende del tipo de combustible en cuestión, así como de las dimensiones del incendio, ya que el diámetro del incendio afecta a la turbulencia de la llama y a la posibilidad de

formación de humos, que a su vez influyen sobre la radiación emitida. Así Hoftizjer (18) cita experimentos con GNL en los que la formación de humos y hollín reducen la intensidad de la radiación emitida desde unos 100 hasta 36-52 kW/m², dependiendo del diámetro del incendio. Los valores máximos de intensidad de radiación de llamas que se citan en la bibliografía están habitualmente entre 170 y 200 kW/m². Sin embargo, en incendios reales se han medido valores mucho menores (11), en torno a los 20-60 kW/m².

El cálculo de la intensidad superficial de radiación debe basarse, siempre que sea posible, en medidas experimentales en circunstancias equivalentes. Sin embargo, ante la escasez de medidas experimentales de intensidades de radiación superficial en incendios de cierta magnitud, y la dificultad de su extrapolación a otras circunstancias, a menudo se introduce un factor empírico denominado fracción de radiación F_R para calcular la radiación emitida. F_R se define como la relación entre la energía emitida por radiación y la energía total liberada en la combustión. Los valores de F_R varían entre 0,15 y 0,35 ó 0,40 para la mayor parte de los hidrocarburos. Los valores superiores de 0,35-0,40 se consideran conservadores, ya que se calculan (18) sin tener en cuenta el oscurecimiento de la llama por los humos formados. Estos valores están próximos al de 0,30, citado como conservador por Sigales (19).

De acuerdo con lo anterior, para estimar la radiación emitida por unidad de superficie externa de un incendio de líquido en charco, I , hay que obtener la energía total emitida por radiación, calculada como el producto $F_R M_b (\pi/4) D^2 (-\Delta H_{comb})$, y dividir el valor hallado entre el área superficial externa del incendio, para lo que se considera la superficie lateral del cilindro emisor ideal, del que se conocen la altura H y el diámetro D . Así,

$$I = \frac{F_R M_b D (-\Delta H_{comb})}{4H} \quad [3.37]$$

Factor de visión

En ausencia de absorción por la atmósfera, la radiación recibida por una superficie situada fuera del perímetro de un incendio de características conocidas se obtiene una vez conocido el factor de visión geométrico F_{vg} . El cálculo de éste puede realizarse conocidas las geometrías del incendio y de la superficie receptora y sus posiciones relativas. En

este apartado interesan los factores de visión entre un cilindro y una superficie en el suelo, de acuerdo con el esquema presentado en la figura 3.13. En la tabla 3.5 se proporcionan los valores numéricos del factor de visión para superficies receptoras horizontales, verticales y para la máxima intensidad de radiación, con una superficie inclinada. En la bibliografía (18) pueden encontrarse factores de visión para otras configuraciones (entre dos superficies planas, entre una superficie esférica y una plana, etc.). Para una discusión más profunda del significado y el cálculo del factor de visión puede consultarse cualquier texto convencional de transferencia de calor.

En el caso en que se considere la radiación recibida a una distancia lo suficientemente grande del foco de emisión, las dimensiones reales de éste pierden importancia, y puede considerarse como aproximación que la emisión es realizada por una fuente puntual. De acuerdo con esta suposición, la radiación emitida se distribuiría de manera homogénea sobre la superficie de una esfera ideal, de tal forma que una superficie sólida de un metro cuadrado a una distancia determinada interceptaría una fracción $1/(4\pi X^2)$ de la radiación emitida, donde X (m) es la distancia de la superficie receptora al punto de emisión. Debe tenerse en cuenta que si se utilizan las hipótesis de fuente puntual el factor $1/(4\pi X^2)$ debe aplicarse sobre la radiación total emitida, y no sobre la radiación emitida por unidad de superficie como ocurre en el caso en que se calcula F_{vg} .

Transmisividad atmosférica

En una distancia de 100 m, la atmósfera puede absorber o dispersar en torno a un 20-40 por 100 de la energía radiante emitida por el incendio. Esto se debe a la absorción por parte del CO_2 y sobre todo por parte del vapor de agua presente en la atmósfera. La transmisividad atmosférica τ se define como la fracción de energía transmitida, y puede calcularse de forma aproximada (20) considerando solamente el vapor de agua:

$$\tau = 2,02 (P_w X)^{-0,09} \quad [3.38]$$

donde P_w es la presión parcial de vapor de agua (Pa) y X la distancia en metros desde el foco de radiación a la superficie receptora.

Tabla 3.5. Factor de visión F_{vg} entre un cilindro vertical y una superficie en el suelo (18). Para a , b y c se aplican las relaciones geométricas de la figura 3.13

A) FACTOR DE VISIÓN PARA UNA SUPERFICIE RECEPTORA HORIZONTAL (F_H)

		a/b							
		0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
	1,1	0,132	0,242	0,332	0,354	0,360	0,362	0,363	0,363
	1,2	0,044	0,120	0,243	0,291	0,307	0,312	0,313	0,313
	1,5	0,005	0,024	0,097	0,170	0,212	0,228	0,231	0,232
c/b	2,0	0,001	0,005	0,027	0,073	0,126	0,158	0,164	0,166
	4,0	0,000	0,000	0,001	0,007	0,022	0,057	0,073	0,078
	10,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,017	0,026
	20,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,008

B) FACTOR DE VISIÓN PARA UNA SUPERFICIE RECEPTORA VERTICAL (F_V)

		a/b							
		0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0
	1,1	0,330	0,415	0,449	0,453	0,454	0,454	0,454	0,454
	1,2	0,196	0,308	0,397	0,413	0,416	0,416	0,416	0,416
	1,5	0,071	0,135	0,253	0,312	0,329	0,333	0,333	0,333
c/b	2,0	0,028	0,056	0,126	0,194	0,236	0,248	0,249	0,249
	4,0	0,005	0,010	0,024	0,047	0,080	0,115	0,123	0,124
	10,0	0,000	0,001	0,003	0,006	0,013	0,029	0,042	0,048
	20,0	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,007	0,014	0,020

C) FACTOR DE VISIÓN MÁXIMO (SUPERFICIES INCLINADAS) (F_M)

$$F_M = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}$$

Radiación térmica recibida

El flujo de radiación sobre la superficie receptora puede expresarse como

$$I_R = I \tau F_{vg} \quad [3.39]$$

donde cada uno de los factores se calcula como se ha explicado anteriormente. La ecuación [3.39] supone que no existe reflexión sobre la superficie receptora, lo que es una hipótesis conservadora pero cercana a la realidad en la mayoría de los casos. Una vez conocida la radiación recibida en función de la distancia puede establecerse un mapa de irradiación térmica que proporcione los flujos recibidos en un punto determinado. La aplicación de los modelos de vulnerabilidad que se discuten en el capítulo 5 permite estimar los daños para un nivel de radiación y un tiempo determinados. En ciertos casos (por ejemplo, al considerar la vulnerabilidad de personas a la radiación procedente de ciertos incendios) puede ser necesario añadir al valor de I_R calculado, el correspondiente a la radiación solar para obtener una mejor estimación de la radiación total recibida.

Ejemplo 3.8:

Un derrame de n-pentano en una balsa circular de 20 m de diámetro se incendia en un día de verano sin viento, con una temperatura ambiente de 32° C. Realizar una estimación de la radiación recibida por una superficie vertical a 40 m del centro del incendio. La presión parcial del vapor de agua en la atmósfera cuando ocurre el incendio es de 2.500 Pa.

La distancia del incendio a la superficie receptora es del orden de las dimensiones del incendio, por lo que no puede utilizarse la hipótesis de fuente puntual, y es necesario calcular el factor de visión para las dimensiones del incendio. El primer paso es obtener una estimación de la velocidad de combustión mediante la ecuación [3.36]. Los calores de combustión y de vaporización aplicables son, respectivamente, 10.751,5 y 87,5 cal/g. Dada la proximidad de la temperatura de ebullición del n-pentano (36,3° C) a la temperatura ambiente no es necesario

Ejemplo 3.8 (continuación):

corregir por el subenfriamiento. Aplicando la ecuación [3.36] se obtiene $M_b = 0,123 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

La altura de las llamas puede calcularse ahora con la ecuación [3.33], suponiendo en un incendio cilíndrico, encontrándose $H = 42,8 \text{ m}$. Sustituyendo este valor junto con $D = 20 \text{ m}$, $(-\Delta H_{comb}) = 44.941 \text{ kJ/kg}$, $M_b = 0,123$ y $F_R = 0,35$ (un valor conservador), en la ecuación [3.37] se obtiene el valor de la radiación emitida por unidad de superficie, $I = 226 \text{ kW/m}^2$.

El factor de visión se calcula con la tabla 3.5, a partir de las dimensiones de la figura 3.13, $a/b = 4,3$, $c/b = 4,0$. Tomando $c/b = 4,0$ los factores de visión para a/b igual a 3 y 5, respectivamente, 0,080 y 0,115. Interpolando para $a/b = 4,2$ se obtiene un factor de visión F_{vg} igual a 0,106. La transmisividad se calcula con la ecuación [3.38] con $X = 30$, resultando un valor de 0,736.

Sustituyendo los valores de intensidad de radiación emitida, transmisividad y factor de visión en la ecuación 3.39 se obtiene una intensidad de radiación sobre la superficie receptora de $17,6 \text{ kW/m}^2$.

Dardos de fuego (Jet fires)

Cuando un gas presurizado escapa a la atmósfera a través de un orificio o estrechamiento, se produce la típica descarga en tobera del chorro gaseoso (*jet*), con un máximo de velocidad en la garganta, que puede igualar a la velocidad del sonido si el cociente entre la presión atmosférica y la presión dentro del recipiente es inferior al valor crítico (ver capítulo 4). Tras el orificio tiene lugar la disminución de la velocidad del gas, al ensancharse la sección de paso. Si una descarga de gas combustible entra en ignición, se produce el característico «dardo de fuego», que tiene la forma indicada en la figura 3.14.

El cálculo de la radiación procedente de un dardo de fuego puede realizarse como en el caso anterior, siempre que se conozcan las dimensiones características de la llama. Si se aproxima la forma del dardo de fuego por un cilindro equivalente, tal y como se indica en la figura 3.14, la relación entre su longitud y el diámetro del orificio viene dada por (21):

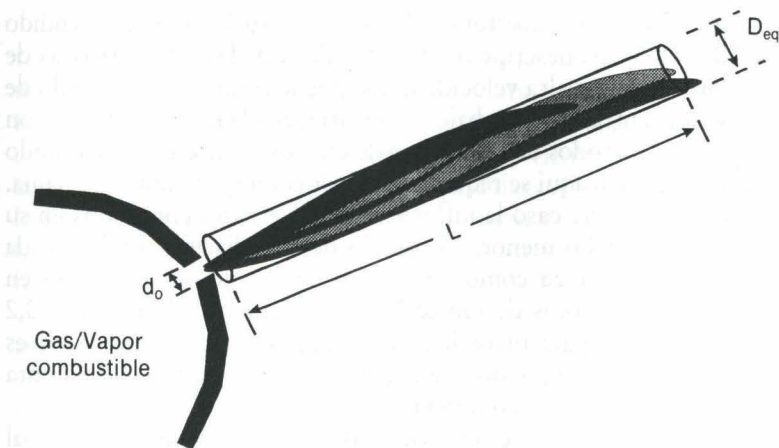


Figura 3.14. Dimensiones características de un dardo de fuego.

$$\frac{L}{d_o} = \frac{5,3}{C_t} \sqrt{\frac{T_f(C_t + (1 - C_t)M_a/M_f)}{N_T T_{amb}}} \quad [3.40]$$

donde L y d_o son, respectivamente, la longitud del dardo y el diámetro del orificio, N_T el cociente entre el número de moles de reactivos y productos de acuerdo con la estequiometría de la reacción, T_f y T_{amb} las temperaturas de la llama y ambiental (K) y M_a y M_f los pesos moleculares del aire y del combustible. El valor de C_t viene dado por

$$C_t = (1 + r M_f/M_a)^{-1} \quad [3.41]$$

siendo r la relación estequiométrica aire/combustible. Para el cálculo del diámetro equivalente Romano y cols. (21) recomiendan la ecuación de Raj y Kalelkar (22), basada en resultados experimentales:

$$\frac{D_{eq}}{d_o} = \sec\left(\frac{\psi}{2}\right) + \frac{L}{d_o} \operatorname{sen}\left(\frac{\psi}{2}\right) \sec^2\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad [3.42]$$

donde ψ es el ángulo de apertura de la llama, habitualmente comprendido entre 10 y 20°. Una descripción más detallada de las características de la emisión de gases a alta velocidad, que puede resultar en un dardo de fuego se encuentra en el trabajo de Hoftizger (18). Al igual que con algunos de los métodos de estimación de efectos de incendios de líquido en charco, también aquí se requiere conocer la temperatura de la llama. Sin embargo, en este caso la influencia de los errores cometidos en su estimación es mucho menor. El cálculo de la radiación total emitida por el dardo se realiza como en el caso de incendios de líquido en charco, usando factores de radiación F_R de 0,15 para hidrógeno, 0,2 para metano y 0,3 para otros hidrocarburos (11). Sobre este valor es necesario aplicar un segundo coeficiente de 0,67 para tener en cuenta efectos de combustión incompleta.

En la estimación de los efectos de dardos de fuego el peligro principal es la incidencia directa del dardo sobre otras superficies, en cuyo caso los efectos de transferencia de calor pueden exceder considerablemente a los debidos a la radiación, cuyo cálculo acaba de exponerse. A este respecto puede usarse la ecuación [3.40] bajo distintos supuestos razonables para estimar de manera aproximada las distancias máximas a las que puede producirse la incidencia directa de la llama sobre otras superficies.

BLEVES y «esferas de fuego» (*fireballs*)

El término BLEVE (explosión en la que participa un líquido en ebullición que se incorpora rápidamente al vapor en expansión), al que se ha aludido anteriormente, se usa habitualmente en relación con la ruptura súbita de un recipiente conteniendo una sustancia licuada bajo presión. Puesto que el líquido está almacenado a una temperatura superior a su punto de ebullición normal, la ruptura del recipiente ocasiona la evaporación súbita del líquido. Esto origina una onda de choque de enorme poder destructivo, acompañada de la formación de proyectiles provenientes del propio recipiente, que a menudo son de gran tamaño. En el caso frecuente de que el gas licuado sea inflamable, casi siempre el proceso se ve acompañado por la ignición de la nube formada. Históricamente las explosiones BLEVE se han producido con cierta frecuencia, y casi siempre han ido acompañadas de bajas humanas. Prugh (23) recoge 50 casos de BLEVE entre 1926 y 1986, contabilizando más de 1.300 muertos en los mismos.

La causa más frecuente de explosiones BLEVE es el incendio externo, el cual a menudo se origina a partir de pequeñas fugas del material almacenado. A medida que se recibe calor del fuego externo, fracciones cada vez mayores del líquido pasan a fase vapor con el consiguiente aumento de presión. Al mismo tiempo, la radiación procedente del incendio e incluso la incidencia directa de las llamas calientan la pared del recipiente. En la zona de pared por encima del nivel de líquido la transferencia de calor hacia el interior es más lenta, lo que hace que la temperatura de la pared aumente rápidamente, con la consiguiente disminución de su resistencia mecánica. El proceso eventualmente da origen al colapso del recipiente, la despresurización del gas y el líquido remanente, y el BLEVE del conjunto. A este respecto, cabe señalar que la existencia de una válvula de alivio de presión no es suficiente para impedir que un BLEVE tenga lugar. Además, las llamas del incendio garantizan la inmediata ignición de la mezcla en expansión si ésta es inflamable.

Otras veces la ruptura del recipiente se produce simplemente porque su resistencia mecánica se ha sobrepasado, debido a la sobrepresurización accidental, fallos del material, reacciones fuera de control, etc., sin concurso de fuego externo. En este caso la ignición puede producirse de todas formas durante la ruptura del recipiente, o puede en su caso retrasarse hasta que la nube en expansión encuentra una fuente apropiada, pero los efectos de presión son similares al caso anterior.

A menudo, tras la ruptura del recipiente una o ambas mitades del mismo pueden ser impulsadas a grandes distancias como consecuencia de la explosión inicial y del empuje producto de la evaporación del líquido que aún permanece en ellas. King (3) recoge datos del accidente en Ciudad de Méjico (ver tabla 1.1), en el que partes de un tanque cilíndrico de 2×13 metros alcanzaron distancias de 1.200 m antes de destruir dos casas, y del lanzamiento de la mayor parte de una columna de absorción de 2 toneladas que contenía propano a más de un kilómetro en un accidente en Romeoville, Illinois, en 1984. Casal (24), por su parte, señala que en el accidente de Los Alfaques el tractor de la cisterna (6,5 toneladas) se encontró a 170 metros del centro de la explosión, y un gran fragmento de cisterna (de unas 5 toneladas), a más de 200 metros. En las figuras 3.15a y 3.15b se muestran, respectivamente, el estado en que quedó el camping de Los Alfaques tras la explosión, y el fragmento de la cisterna al que antes se aludía, tras su impacto sobre una casa próxima.



Figura 3.15a. Vista general del camping de Los Alfaques tras la explosión BLEVE que se produjo el 11 de julio de 1978. (Cortesía del periódico EL PAÍS. Fotógrafo: Chema Conesa.)



Figura 3.15b. Parte de la cisterna que originó el accidente impactó sobre una casa, a más de 200 metros del lugar de la explosión. (Cortesía del periódico EL PAÍS. Fotógrafo: Chema Conesa.)

Cálculo de efectos en las explosiones BLEVE

Los efectos de una explosión BLEVE son, como en casos anteriores, de tres tipos: onda de choque, proyectiles y radiación térmica (causada por la esfera de fuego que puede estar asociada al BLEVE). Sin embargo, dada la casuística de este tipo de explosiones, se han desarrollado expresiones empíricas que son específicas para BLEVES.

Dadas las características de la generación de las explosiones BLEVE, las sobrepresiones son difíciles de predecir, ya que la evolución concreta de la vaporización y presurización previas al colapso del recipiente, y la duración del proceso de ruptura-despresurización tienen una influencia importante en la evolución posterior. Asimismo, los efectos son diferentes dependiendo de qué cantidad de líquido se vaporiza lo suficientemente rápido como para tomar parte en la explosión inicial. Por último, en el caso de BLEVES producidos a causa de incendios externos la estimación de la presión a la que se produce la ruptura del recipiente es incierta a causa, sobre todo, de la disminución de resistencia producida por las altas temperaturas. En todo caso, los efectos de presión son a menudo limitados, por lo que el peligro principal en cuanto a la onda de choque proviene de la propagación a unidades cercanas (efecto «dominó»), siendo poco probable el daño por sobrepresión más allá de los confines de la planta.

Una manera aproximada de calcular el equivalente en TNT de una explosión BLEVE ha sido descrita por Prugh (23), y consiste en: *i*) estimar la cantidad de líquido que sufriría una evaporación súbita al reducir la presión hasta la presión atmosférica, *ii*) calcular el volumen-suplementario de vapor (a la presión del recipiente antes de la explosión) que implicaría esta cantidad de líquido evaporado y 3.º, añadir este volumen ficticio al volumen existente, a la presión del sistema e *iii*) calcular el equivalente en TNT del volumen total, tal y como se ha realizado en el apartado de estallido de recipientes. Con esto, la expresión final resulta

$$W = 0,024 \frac{PV^*}{k-1} \left[1 - \left(\frac{1}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad [3.43]$$

donde W es el peso de TNT equivalente (kg), y P es la presión existente en el recipiente antes de la ruptura (bar). V^* viene dado como

$$V^* = V_v + V_l(fD_{L0}/D_{Vs}) \quad [3.44]$$

siendo V_v y V_l los volúmenes reales de vapor y líquido en el recipiente antes de la explosión (m^3), D_{Lo} y D_{Vs} las densidades del líquido y del vapor a la presión y temperatura del sistema antes de la explosión y f la fracción de líquido que sufre la evaporación súbita (flash) tras la despresurización. Los métodos para el cálculo de f se detallan en el capítulo siguiente.

Los otros efectos de un BLEVE: la formación de proyectiles y la radiación térmica revisten, en general, más peligro que la onda de presión producida en la explosión. Como se ha indicado en la sección anterior, los proyectiles formados en un BLEVE pueden ser de tamaño considerable y alcanzar grandes distancias. De hecho han dado origen a un número considerable de muertes y, a su vez, han propiciado en muchos casos la extensión del accidente a otras instalaciones. En la figura 3.16 se muestran los resultados de Holden y Reeves (25) en cuanto a proyección de fragmentos en BLEVES de gases licuados de petróleo. Puede observarse que aproximadamente un 10 por 100 de los fragmentos alcanzan distancias mayores que 400 metros en explosiones que involucran cantidades relativamente pequeñas de gas licuado. Los fragmentos procedentes de la explosión suelen ser bastante desiguales, encontrándose habitualmente más fragmentos en la dirección del eje cuando explotan recipientes cilíndricos. Basándose en el análisis de un pequeño número de incidentes Holden y Reeves (25) también proporcionan una correlación aproximada del número de fragmentos resultantes en la explosión, para recipientes con capacidades comprendidas entre 700 y 2.500 m^3 :

$$\text{Número de fragmentos} = -3,77 + 0,0096 V \quad [3.45]$$

donde V es la capacidad del recipiente, en m^3 .

Los efectos térmicos de las explosiones BLEVE se relacionan con la formación de una bola o esfera de fuego. La esfera de fuego, que constituye el mayor peligro de los BLEVE, se produce a causa del incendio de una masa de vapor inflamable, cuya velocidad de combustión es tal que la masa en combustión se eleva en el aire, lo que da origen a la típica esfera radiante. Las radiaciones típicas en las bolas de fuego asociadas a BLEVES están en el orden de magnitud de 200-350 kW/m^2 , mucho más altos que los medidos en incendios de líquido en charco, lo que principalmente se debe a la mayor limpieza de la llama.

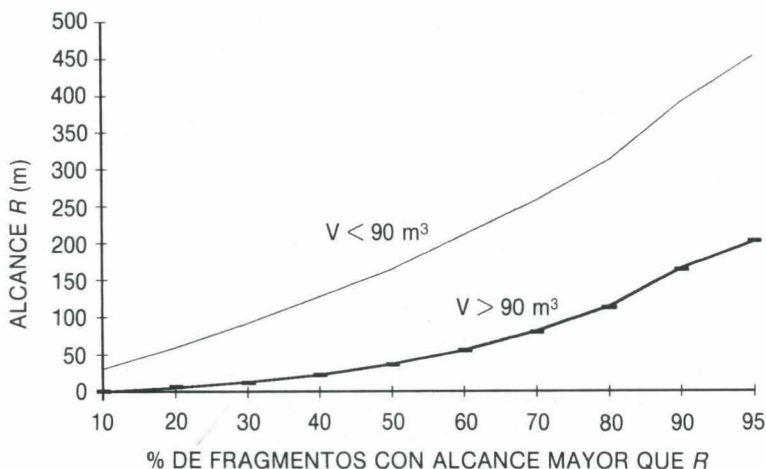


Figura 3.16. Alcance de fragmentos en explosiones BLEVE de gases licuados de petróleo. (Adaptado de la referencia 25.)

Los efectos de la esfera de fuego suelen tenerse en cuenta mediante ecuaciones empíricas relacionadas con la cantidad de sustancia involucrada en el BLEVE. Las fórmulas a utilizar son (11):

$$\text{Diámetro máximo a la esfera de fuego (m): } D_{\text{máx}} = 6,48 M^{0,325} \quad [3.46]$$

$$\text{Duración de la esfera de fuego (s): } t_{\text{BLEVE}} = 0,825 M^{0,26} \quad [3.47]$$

$$\text{Altura del centro de la esfera de fuego (m): } H_{\text{BLEVE}} = 0,75 D_{\text{máx}} \quad [3.48]$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro inicial de la semiesfera a nivel de suelo (m):} \\ D_{\text{inic}} = 1,3 D_{\text{máx}} \end{aligned} \quad [3.49]$$

En las ecuaciones anteriores M es la masa inicial del líquido inflamable, en kg. Elia (16) proporciona ecuaciones similares para el cálculo del diámetro y duración de la esfera de fuego asociada al BLEVE, y además propone estimar la energía total radiada Q_R (J) desde la esfera de fuego, como

$$Q_R = 0,27 M (-\Delta H_{\text{comb}}) P_o^{0,32} \quad [3.50]$$

donde P_0 es la presión inicial a la que está almacenado el líquido (MPa) y el resto de los parámetros tienen los significados ya vistos. El flujo de radiación por unidad de superficie y tiempo se halla dividiendo el resultado de la ecuación [3.50] por el área externa de la esfera y el tiempo de duración del BLEVE. De manera semejante, el CCPS (11) propone una ecuación en la que se tiene en cuenta la duración del BLEVE:

$$I = \frac{F_R(-\Delta H_{comb})M}{\pi(D_{MAX})^2 t_{BLEVE}} \quad [3.51]$$

donde el valor sugerido para F_R está entre 0,25 y 0,40. En la ecuación anterior el flujo de radiación emitido viene dado en kW/m². A partir de aquí, una vez estimados el factor visión y la transmisividad atmosférica, puede aplicarse la ecuación [3.39] para calcular la intensidad de radiación sobre la superficie receptora. A este respecto, puesto que los análisis de riesgo de las explosiones BLEVE se suelen realizar para estimar la vulnerabilidad de las personas, es apropiado utilizar un factor de visión geométrico correspondiente a una superficie perpendicular a una esfera:

$$F_{vg} = \frac{D^2}{4X^2} \quad [3.52]$$

donde el valor de D suele calcularse a partir de la ecuación [3.46] y X es la distancia al centro de la esfera. En el caso de que se requiera estimar el factor de visión desde una esfera a una superficie no perpendicular a la misma, en la bibliografía (18) se proporcionan valores de F_{vg} en función del ángulo y de la relación X/R .

Cuestiones y problemas

3.1. En un reactor de laboratorio se estudia la deshidrogenación oxidativa de etano a etileno, que se lleva a cabo a 600° C y presión atmosférica, alimentando etano y oxígeno al reactor. Estimar los límites de inflamabilidad de la mezcla en esas condiciones. ¿Cuál sería la proporción de nitrógeno a añadir para inertizar la mezcla?

3.2. La ecuación de Antoine para el n-octano proporciona la variación de su presión de vapor con la temperatura de acuerdo con (26):

$$\log P_v = 6,9237 - \frac{1.355,126}{209,517 + t}$$

donde la presión de vapor viene dada en milímetros de mercurio y la temperatura t en grados centígrados. Tomando el límite inferior de inflamabilidad del octano en aire como el 1 por 100 en volumen, calcular el punto de destello para el n-octano y compararlo con el valor dado por la ecuación [3.1].

3.3. Realizar la inspección de un laboratorio en el que se utilicen gases inflamables. Preferiblemente debe tratarse de un laboratorio real, o en el caso de uno supuesto, sus características deben definirse con bastante precisión. Supóngase que se produce una fuga de un gas inflamable e identifíquense las posibles fuentes de ignición. Proponer soluciones para evitar la ignición del material emitido.

3.4. La reacción que se llevaba a cabo en Flixborough consistía en la oxidación de ciclohexano a una temperatura de 155-160° C, utilizando aire a presión. Supóngase que un reactor contiene 100 litros de ciclohexano líquido (los reactores utilizados en Flixborough contenían más de 300 veces esta cantidad). ¿Cuál sería la máxima presión que podría alcanzarse en el interior del reactor debido a la explosión de sus contenidos? Diseñar un recipiente capaz de contenerla.

3.5. Con alguna frecuencia, los periódicos traen la noticia de una explosión de gas propano o butano en una vivienda. Calcular la energía total liberada en la combustión de una bombona de gas para uso doméstico. Supóngase que una bombona de butano se guarda al aire libre en una terraza, y que se produce una fuga importante que da origen a una nube que contiene todo el gas de la misma. Hacer una estimación de la sobrepresión que se produciría a una distancia de 60 metros si se produce la ignición antes de que el material emitido haya tenido la oportunidad de dispersarse.

3.6. Se produce una fuga en una estación de distribución de gas natural. La explosión resultante destruye totalmente los edificios (lo que corresponde a unos 70 kPa de sobrepresión), en un radio de aproximadamente 150 metros. Calcular la masa de gas combustible involucrada.

3.7. Una esfera de gas de 25 m de diámetro, llena en un 50 por 100 con propano líquido, sufre un BLEVE a causa de un incendio externo. Inicialmente la esfera se encuentra a 293 K y 7 atmósferas manométricas. La humedad ambiente es del 35 por 100. Estimar la radiación recibida a partir de la esfera de fuego producida en el BLEVE por los trabajadores que contemplan el incendio a una distancia de 400 m.

Bibliografía

1. PLANAS CORED, G.: *Ingeniería Química*, 246, pp. 141-155, septiembre de 1989.
2. BODHURTHA, F. P.: *Industrial Explosion Prevention and Protection*. Mc Graw-Hill. Nueva York (1980).
3. KING, R.: *Safety in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann. Londres (1990).
4. U. S. Bureau of Mines Bulletin n.º 503, pág. 6 (1952).
5. CROWL, D. A., y LOUVAR, J. F.: *Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications*. Prentice Hall. Englewood Cliffs (1990).
6. ZABETAKIS, M. G.: *Fire and Explosion Hazards at Temperature and Pressure Extremes*, AIChE-ICHEME Symp. Ser. 2, pp. 99-104 (1965).
7. WIEKEMA, B. J.: «Vapour Cloud Explosion», en *Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (Liquid and Gases)* (The Yellow Book). TNO, Directorate General of Labour. 2273 KH Vooburg, Holanda (1979).
8. BARTKNECHT, W.: *Explosions*. Springer-Verlag. Nueva York (1981).
9. LEES, F. P.: *Loss Prevention in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann. Londres (1980).
10. CLANCEY, V.: *Diagnosis Features of Explosive Damage*. Proc. 6th Int. Meeting of Forensic Science. Edimburgo (1972).
11. CCPS (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY): *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. AIChE. Nueva York (1989).
12. MOORE, C. V.: «The Design of Barricades for Hazardous Pressure Systems». *Nuclear Eng. Des.* 5, pp. 1.550-1.566 (1967).
13. PRUGH, R. H.: *Quantitative Evaluation of BLEVE Hazards*. AIChE Loss Prevention Symposium, AIChE Spring National Meeting. Nueva Orleans (1988).
14. NFPA (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION): Standard 704 «Identification of the Fire Hazards of Materials». NFPA. Quincy, Massachusetts (1990). NFPA (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION): Standard 325M «Fire Hazards Properties of Flammable Liquids, Gases and Volatile Solids», NFPA. Quincy, Massachusetts (1990).

15. OPSCHOOR, G.: «Evaporation», en *Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (Liquid and Gases)* (The Yellow Book). TNO, Directorate General of Labour. 2273 KH Vooburg, Holanda (1979).
16. ELIA, F.: «Explosion and Fire Analysis», en *Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry*, GREENBERG, H. R., y CRAMER, J. J. (eds.). Van Nostrand Reinhold. Nueva York (1991).
17. THOMAS, P. H.: *The Size of Flames from Natural Fires*. Proceedings of the 9th International Symposium on Combustion, Academic Press. Nueva York (1963).
18. HOFTIJZER, G. W.: «Heat Radiation», en *Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (Liquid and Gases)* (The Yellow Book). TNO, Directorate General of Labour. 2273 KH Vooburg, Holanda (1979).
19. SIGALES, B.: *Ingeniería Química*, 199, pp. 67-77, octubre de 1985.
20. PIETERSEN, C. M., y HUERTA, S. C.: *Analysis of the LPG incident in San Juan de Ixhuatepec, Mexico City, 19-11-84*. TNO Report B4-0222, TNO, Directorate General of Labour. 2273 KH Vooburg, Holanda (1985).
21. ROMANO, A.; PICCININI, N., y BELLO, G. C.: *Ingeniería Química*, 200, pp. 271-278, noviembre de 1985.
22. RAJ, P. K., y KALELKAR, A. S.: *Assessment Models in Support of the Hazard Assessment Handbook*, U. S. Coast Guard Report CG-D-65-74 (1974).
23. PRUGH, R. W.: *Chemical Engineering Progress* 87 (2), pp. 66-72 (1991).
24. CASAL, J.: «Riscs Potencials del Foc en Instal·lacions Industrials», en *Plasmes i Focs*. Institut D'estudis Catalans (1990).
25. HOLDEN, P. L., y REEVES, A. B.: «Fragment Hazards from Failure of Pressurized Liquefied Gas Vessels», en *Assessment and Control of Major Hazards*, IChemE Symp. Ser. 93. IChemE, Rugby (1985).
26. FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L., y ANDERSEN, L. B.: *Principles of Unit Operations*. J. Wiley and Sons. Nueva York (1980).
27. PERRY, R. H., y GREEN, D. (Eds.): *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, cap. 3, 6.ª edición. Mc Graw-Hill. Nueva York (1984).