

NTP 321: Explosiones de nubes de vapor no confinadas: evaluación de la sobrepresión



Explosions de nuages de vapeur non confinées: évaluation des surpressions.
Unconfined Vapour Cloud Explosions (UVCE): overpressure evaluation

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero Industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Este tipo de explosiones es uno de los peligros de consecuencias más graves en las industrias de proceso. Un escape de una sustancia inflamable (líquido volátil, gas o gas licuado), si no es cortado a tiempo, puede originar una nube de considerables dimensiones con gran probabilidad de encenderse con cualquiera de los diversos focos de ignición presentes en toda planta industrial, produciendo una deflagración o un incendio rápido que afectará a personas e instalaciones dentro de su radio de acción.

En esta nota técnica se presenta la metodología para evaluarlas sobrepresiones generadas en tales siniestros.

Conceptos básicos

Las explosiones consideradas en este documento son las Explosiones de Nubes de Vapor No Confinadas, traducción de la expresión inglesa Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE) que se puede definir como: Deflagración explosiva de una nube de gas inflamable que se halla en un espacio amplio, cuya onda de presión alcanza una sobrepresión máxima del orden de 1 bar en la zona de ignición.

Las explosiones no confinadas ocurren al aire libre y generalmente son originadas por un escape rápido de un fluido inflamable junto a una dispersión moderada para formar una nube inflamable muy grande de aire e hidrocarburo.

Las explosiones confinadas son las que ocurren con alguna barrera de contención. Ejemplos de este tipo son las que suceden en recipientes o tuberías. También se incluyen las explosiones dentro de edificios. Las explosiones al aire libre que encuentran diversos obstáculos como pueden ser equipos de proceso, paredes de edificios, etc., pueden alcanzar cierto grado de confinamiento y turbulencia originando sobrepresiones superiores a las de explosiones no confinadas.

En general las explosiones de nubes de vapor no confinadas son deflagraciones y en contadas ocasiones se han transformado en detonaciones. Esto ha sido ocasionado por las causas anteriores que provocan cierto confinamiento y a las que también se puede añadir las fuentes de ignición potentes. La diferencia entre deflagración y detonación está en que en la primera la velocidad de propagación del frente de llama es inferior a la del sonido y en la segunda es superior.

En el caso en el que no se alcanzase una deflagración, se tendría un incendio rápido en forma de llamarada que se podría definir como un incendio con llama progresiva de difusión o premezclada con baja velocidad de llama sin producir onda de presión. Su efecto más importante sería la radiación térmica. Este tipo de incendio se ve favorecido por un escape permanente de un fluido inflamable junto a una reducida dispersión del mismo.

La onda de choque que se propaga en el aire tiene una serie de características o parámetros que pueden ser medidos y otros que pueden correlacionarse según los daños provocados.

El parámetro generalmente más definido y medido es la **sobrepresión** generada por la onda de presión no perturbada conforme se propaga a través del aire. En la figura se muestra gráficamente el valor de la presión en función del tiempo.

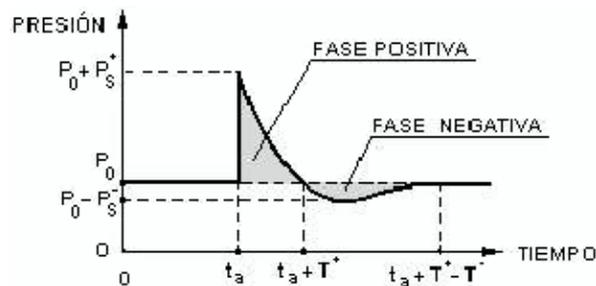


Fig. 1 Variación de la onda de presión de una explosión

Antes de la llegada del frente de choque, la presión existente es la presión atmosférica P_0 . En el tiempo de llegada t_a de la onda de choque, la presión sube abruptamente (discontinua en una onda ideal) hasta un valor $P_s^+ + P_0$. A partir de ese momento la presión decae hasta alcanzar la presión ambiental en un tiempo $t_a + T^+$, pasando seguidamente por una disminución de presión o vacío de amplitud P_0 y finalmente retorna al valor ambiental P_0 en un tiempo total $t_a + T^+ + T^-$.

El valor P_s^+ , o simplemente P_s , recibe el nombre de **sobrepresión incidente máxima** y es la sobrepresión que se registraría en un lado de una estructura por lo cual se la llama también **sobrepresión lateral máxima** o simplemente **sobrepresión máxima**. La sobrepresión máxima que existe en una onda de choque antes de que sea afectada por alguna estructura u obstáculo, es por lo tanto frecuentemente referenciada como la sobrepresión lateral máxima. Esta sobrepresión lateral máxima se define como la presión que se registraría con un sensor situado en el lado de una estructura, paralelo a la dirección de propagación de la onda de choque.

Si el frente de choque impacta sobre una superficie sólida, plana y rígida con un cierto ángulo ocurre una reflexión. Se da el nombre de **sobrepresión reflejada** P_r a la sobrepresión que se generaría en una estructura perpendicular a la dirección de propagación de la onda de choque.

Tanto la sobrepresión lateral como la reflejada son estáticas.

Existe otra presión llamada **presión dinámica** que se manifiesta por un efecto de viento, arrastre y derribo de los obstáculos desplazables. La presión dinámica Q tiene un valor definido por:

$$Q = 1/2 \rho u^2$$

en donde:

ρ = densidad del aire por detrás del frente de choque

u = velocidad de las partículas de aire

La velocidad de las partículas está dada por la fórmula:

$$u = \frac{c_0 \cdot P_s}{\gamma \cdot P_0} \left(1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \cdot \frac{P_s}{P_0} \right)^{-1/2}$$

c_0 = velocidad del sonido en el aire (330 m/s)

P_0 = presión absoluta ambiental por delante M frente de choque (10^5 Pa)

γ = razón de los calores específicos del aire = $C_p/C_v = 1,4$

P_s = sobrepresión lateral máxima

La fórmula de la presión dinámica es:

$$Q = \frac{P_s^2}{2\gamma P_0 + (\gamma - 1)P_s}$$

para $\gamma = 1,4$

$$Q = \frac{5}{2} \frac{P_s^2}{7P_0 + P_s}$$

El valor de la sobrepresión reflejada máxima P_r citada anteriormente es función de la sobrepresión lateral máxima P_s y de la dinámica Q según la relación:

$$P_r = 2P_s + (\gamma + 1)Q$$

para el aire $\gamma = 1,4$ se tiene

$$P_r = 2P_s + 2,4Q$$

sustituyendo Q por el valor dado anteriormente:

$$P_r = 2P_s \left(\frac{7P_0 + 4P_s}{7P_0 + P_s} \right)$$

Para ondas de choque débiles $P_r = 2 P_s$ ya que el valor de P_s es despreciable frente a P_0 . En cambio para ondas de choque fuertes se aproxima a ocho veces la sobrepresión lateral máxima.

Otro parámetro útil para evaluar consecuencias en las explosiones es el **impulso específico** i_s que se define como el impulso total por unidad de superficie. La magnitud impulso es el producto de una fuerza por el tiempo que actúa y en el impulso específico es el producto de la sobrepresión por ese mismo tiempo. Si estas magnitudes no son constantes, el impulso sería la integral de la fuerza variable en función del tiempo multiplicada por cada uno de los diferenciales de tiempo en que se divide el tiempo que actúa.

Experiencias extraídas de accidentes

Pietersen y Huerta (1985) han investigado las características claves de 80 incendios con llamarada. La transición de incendio a deflagración se ve influenciada por la expansión térmica y la turbulencia, por lo que la existencia de estructuras de proceso acrecienta el riesgo de que ocurra explosión en vez de incendio rápido.

Basándose en estas observaciones, diversos autores han sacado las conclusiones siguientes:

- Debe existir una masa mínima de sustancia inflamable para que pueda darse una explosión de nube de vapor no confinada. Ciertas estimaciones van de 1 (Wiekema, 1979) a 15 toneladas (Health and Safety Executive, 1979). Se debe ser cauto ya que para productos tan reactivos como el acetileno e hidrógeno han bastado 100 kg (Gugan, 1979) y se tiene referencia que en un accidente relativamente reciente (North and Mac Diarmid, 1988) ha ocurrido explosión con tan sólo unos 30 kg de hidrógeno.
- Las sustancias que tienen velocidades de combustión grandes ocasionan más fácilmente explosiones para una misma cantidad de producto acabado.
- Las sobrepresiones máximas de estas deflagraciones son mucho menores que si fueran detonaciones. Son aproximadamente 1 bar (100 kPa) y con duraciones de la fase positiva (figura 1) de 20 a 100 ms.

El problema de explosión de una nube de vapor no confinada es que, aparte de que es grande y destructiva, puede afectar a bastante distancia del punto de escape.

El número de estos accidentes ha aumentado de forma notable. En la década de 1930 se tenían unos 4 por década, pasando a unos 60 en el mismo período en los dos últimos decenios.

Un ejemplo desastroso de este tipo de explosiones fue el accidente de Flixborough (Gran Bretaña) causado por una nube de vapor no confinada de unas 30 toneladas de ciclohexano y que dio lugar a una explosión equivalente a unas 16 toneladas de T.N.T.

Para tener una idea de la distribución de accidentes de este tipo, se puede acudir a datos estadísticos como los presentados por Davenport (Ref. bibliográfica 5) en los que desglosa 43 accidentes en que se crearon sobrepresiones por explosión. De ellos, 32 sucedieron en plantas industriales, 8 en operaciones de transporte y 3 en otros lugares. De los 32 de plantas industriales, 8 sucedieron en refinerías y 24 en industrias petroquímicas. Los agentes materiales implicados en esos 32 accidentes en plantas industriales se clasificaron de la forma siguiente:

Equipos de proceso	24
Tanques de almacenamiento	4
Vehículos de transporte dentro de la planta	3
Agente desconocido	1
Las formas de escape de los 43 accidentes fueron:	
Fallo o avería del recipiente	13
Fallo o avería de tuberías, válvulas o accesorios	26
Escapes en dispositivos de venteo	3
Escape desconocido	1

Según Kletz (Ref. bibliográfica 5) la frecuencia estimada de las UVCE por diferentes fallos de componentes es:

		Frecuencia (explosiones/equipo año)
FALLO	Recipiente a presión	10 ⁻⁵
	Tubería corta sin válvulas, bombas o elementos de intervención entre dos recipientes	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁴
	Tubería normal	10 ⁻⁴ a 10 ⁻³
	Bomba normal	10 ⁻²
	Bomba para alta o baja temperatura	10 ⁻¹
	Compresor de pistón alternativo	10 ⁻¹
FLUGA	Reactor discontinuo	10 ⁻² a 10 ⁻¹
	Manguera llenado de buque cisterna	10 ⁻² a 10 ⁻¹

También basándonos en antecedentes históricos, cabe reseñar que la fuente de ignición surge dentro de un radio no superior al centenar de metros desde el punto en el que se genera el escape. El tiempo entre el inicio del escape y la ignición dependerá de la masa liberada, de las condiciones en que se efectúa la fuga o derrame y de las mismas condiciones atmosféricas. Puede oscilar entre unos 20-30 segundos o algunos minutos.

Normalmente la masa afectada por la deflagración es inferior a la masa liberada, dado que en amplias áreas puede estar fuera de los límites de inflamabilidad. En el próximo apartado se tratará esta cuestión con mayor detalle.

Modelo TNT de evaluación

Existen diversos modelos empíricos para la determinación de los parámetros necesarios para la evaluación de las consecuencias de una explosión. El más empleado es el modelo del equivalente en TNT (trinitrotolueno). Se basa en la hipótesis de la equivalencia en efectos explosivos entre una masa determinada de materia inflamable y otra de TNT.

En la explosión de una nube de vapor la forma de la onda inicial de la explosión es diferente que en una explosión de TNT, pero a partir de una cierta distancia ambas se pueden considerar iguales a la representada en la figura 1. El modelo establece la siguiente relación:

$$W = \frac{\eta M \cdot E_c}{E_{cTNT}}$$

W = Masa equivalente de TNT (kg).

M = Masa de sustancia inflamable liberada (kg).

η = Rendimiento (eficacia) empírico de la explosión (0,01 a 0, 10).

E_c = Calor inferior de combustión del gas o vapor inflamable (kJ/kg).

E_{cTNT} = Calor de combustión (detonación) del TNT (4437 a 4765 kJ/kg).

Otras fuentes bibliográficas (Baker et al) dan el calor de combustión experimental del TNT 4520 kJ/kg; Kinney da como valor experimental 4689 kJ/kg

En una nube de vapor no confinada, la energía de la onda de explosión es generalmente sólo una pequeña fracción de la energía teóricamente disponible de la combustión de toda la materia que constituye la nube.

Eficacia o rendimiento de la explosión. Es el coeficiente entre la energía real liberada y la teóricamente disponible.

Normalmente se supone que toda la materia inflamable de la nube está disponible para la combustión y que la energía teóricamente disponible es por lo tanto el producto de la cantidad total de materia inflamable en la nube por el calor de combustión (potencia calorífica). Sobre esta base, el rendimiento de la explosión está normalmente en el rango de 1 a 10%. Podría ser algo superior cuando el escape en ambiente exterior esté constreñido por edificaciones u otras barreras materiales.

El procedimiento a seguir para obtener los parámetros necesarios para la evaluación de las consecuencias de la explosión es el siguiente:

1. Se calcula la masa equivalente de TNT mediante la fórmula anterior adoptando un rendimiento máximo por ejemplo del 10%, es decir, $\eta = 0, 1$ y partiendo del valor del calor inferior de combustión dado en tablas de Manuales de Ingeniería Química (p.ej. Perry's). En cuanto a la masa de sustancia vertida se debe hacer la suposición del accidente simulado, siendo conveniente partir del estudio previo de estimaciones de vertidos y su dispersión en función de la características de la sustancia almacenada

o en proceso, condiciones de almacenamiento, presiones, temperaturas, condiciones atmosféricas, escape continuo o instantáneo.

- Una vez calculada la masa equivalente de TNT se debe utilizar el gráfico de la figura 2 que nos da los parámetros más importantes en función de la distancia escalada Z. Esta se define como el cociente entre la distancia real del centro de la explosión al lugar considerado y la raíz cúbica de la masa equivalente de TNT calculada anteriormente. La expresión de la Distancia Escalada es:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

R = Distancia real en metros (m).

W = Masa equivalente de TNT en kilogramos (kg).

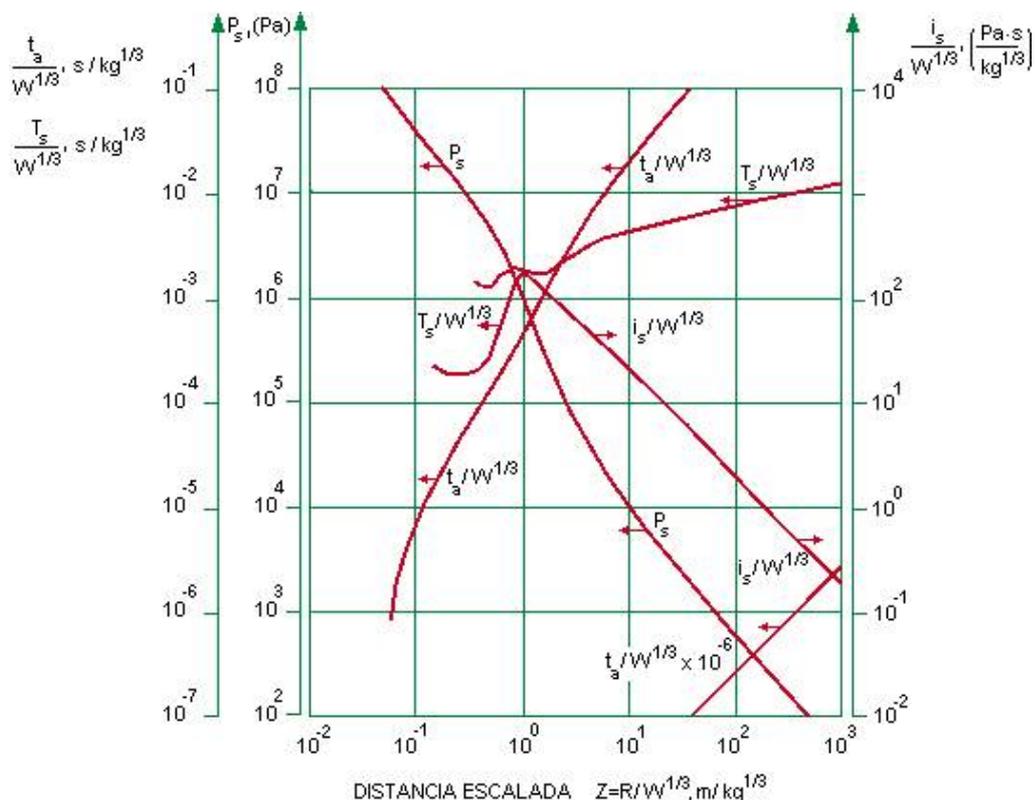


Fig. 2: Parámetros de la deflagración en función de la distancia escalada

P_s = Sobrepresión incidente máxima en pascales (Pa).

i_s = Impulso específico en pascal segundo (Pa.s).

t_a = Tiempo de llegada de la onda de choque en segundos(s).

T_s = Tiempo de duración de la sobrepresión de la fase positiva de la onda de choque en segundos (s).

Este gráfico nos da los parámetros deseados sin contabilizar la posible presión reflejada.

Las experiencias llevadas a cabo con el explosivo TNT han dado como resultado que la sobrepresión máxima producida por una explosión de W_{TNT1} kg, a la distancia R_1 es igual a la producida por W_{TNT2} kg a la distancia R_2 .

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_{TNT1}}{W_{TNT2}} \right)^{1/3}$$

Otra expresión de este enunciado nos dice: A una determinada sobrepresión, la distancia es proporcional a la raíz cúbica de la masa de explosivo.

$$R \propto W^{1/3}$$

- Establecer con la ayuda del gráfico de la figura 2 las diferentes sobrepresiones que se obtienen a las distancias a considerar.

Criterios de evaluación de consecuencias

El gráfico de la figura 2 proporciona diversos parámetros, de los cuales se van a emplear los siguientes: sobrepresión incidente máxima P_s en pascales (Pa) e impulso específico i_s (Pa.s) a partir del valor $i_s/W^{1/3}$ dado en el gráfico.

Existen otros gráficos en la ref. 2 para la sobrepresión reflejada P_r , impulso reflejado i_r y la presión dinámica Q . Debe indicarse que el gráfico de la figura 2 está calculado para una explosión esférica elevada. Si la explosión ocurre a nivel del suelo se puede utilizar el mismo gráfico pero doblando la masa de sustancia explosiva TNT considerada para obtener los parámetros buscados.

Conocido el valor de las sobrepresiones a determinadas distancias, se deberá considerar la posición de las personas y de las paredes de las estructuras respecto a la dirección de propagación de la onda de choque para calcular el efecto total combinado de las tres sobrepresiones. En la figura (ref. 7) se indican los valores de estas sobrepresiones para tres situaciones.

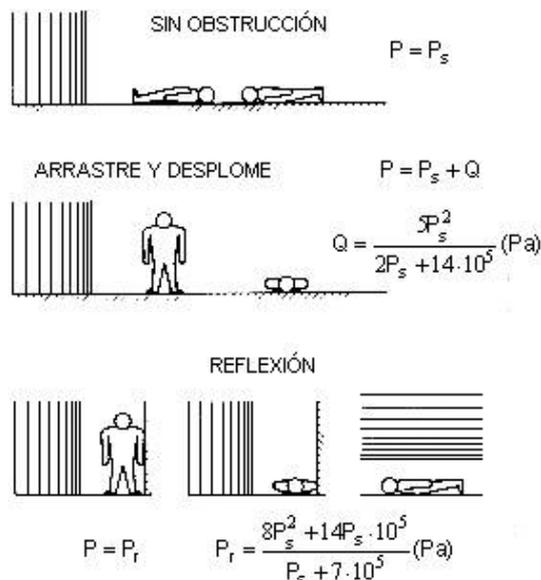


Fig. 3: Sobrepresiones según la posición del cuerpo

En la primera el eje longitudinal del cuerpo es paralelo a la dirección de propagación de la onda de choque y equivale a que no haya obstrucción que perturbe a esa onda. En este caso la sobrepresión recibida sería $P = P_s$ (sobrepresión lateral o incidente máxima).

En la segunda el eje longitudinal del cuerpo es perpendicular a la dirección de la onda de choque y se manifiesta un efecto de arrastre y desplome. La sobrepresión total sería $P = P_s + Q$ siendo Q la presión dinámica recibida en forma de viento y cuyo valor está indicado en la propia figura en pascales. Este caso representa la orientación más probable en que se puede encontrar una persona trabajando o circulando en una planta química. Según Baker et al. (ref. 2) a esta posición se puede añadir la posición de tumbado en que el eje longitudinal del cuerpo es perpendicular a la dirección de la onda de choque.

En la tercera figura se tiene el caso de sobrepresión reflejada, en el cual el tórax está cerca de una superficie reflectante perpendicular a la dirección de la onda de choque. La tercera posición es añadida de la fuente bibliográfica Baker et al. (ref. 2) y es el mismo caso, sólo que la explosión viene de arriba hacia abajo. La expresión de la sobrepresión reflejada viene indicada en la propia figura y su valor coincide con el indicado anteriormente, pero aquí se opera directamente en pascales.

Para evaluar las consecuencias se puede partir de tablas comparativas de daños y sobrepresiones como se indica en la tabla:

Tabla 1: Consecuencia de las sobrepresiones

DAÑOS PERSONALES	SOBREPRESIONES	DAÑOS ESTRUCTURALES	SOBREPRESIÓN
Umbral de muerte por lesiones de pulmón	70000 Pa (0,70 bar)	Demolición total	0,80 bar
Umbral de rotura de tímpano	35000 Pa (0,35 bar)	Daños irreversibles	0,40 bar
Umbral de sonda de intervención	12500 Pa (0,125 bar)	Daños estructurales importantes	0,18 bar
Umbral de zona de alerta	5000 Pa (0,050 bar)	Daños graves reparables	0,15 bar
		Daños estructurales menores	0,047 bar
		Cristales rotos al 90%	0,040 bar

Para la elaboración de Planes de Emergencia en el Sector Químico según la Directriz Básica (Resolución de 30 de Enero de 1.991) (ref. 6) se establecen dos zonas objeto de planificación, para las cuales se dan unos valores umbrales que sirven para delimitarlas. En cuanto al riesgo de impulsos y sobrepresiones se han establecido los valores umbrales siguientes para esas zonas:

Valor umbral para **zona de intervención**:

1. Valor local integrado del impulso debido a la onda de presión, de 150 milibar. segundo (15000 Pa. s).
2. Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 milibar (12500 Pa).

Valor umbral para **zona de alerta**:

1. Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 milibar. segundo (10000 Pa.s).
2. Una sobrepresión local estática de la onda de presión, de 50 milibar (5000 Pa).

En cada situación de posible accidente por explosión de una nube de vapor inflamable no confinada se tienen unas características del entorno con árboles, montículos, edificios, etc. que pueden disipar la energía de la onda explosiva o reflejarla amplificando sus efectos sobre las personas. En caso de no existir estos obstáculos, se supondrá que una persona está de pie en la zona de expansión libre de la onda de choque y sobre un suelo llano y a nivel cuando entra en contacto con la onda de choque. El oído es la parte más sensible del cuerpo humano a las ondas de choque. Las lesiones internas serán más probables en las zonas de mayor variación de densidad con respecto a tejidos contiguos. Los alvéolos llenos de aire de los pulmones son por tanto más susceptibles de lesiones que cualquier otro órgano interno.

En la tabla de daños-sobrepresiones, se entiende como **daños estructurales importantes**:

- Techumbre parcial o totalmente destruida.
- Al menos un muro exterior dañado gravemente.
- Elementos portantes de carga o tabiques destruidos.
- Daños no reparables.

y como **daños estructurales menores**:

- Cielos rasos cuarteados.
- Roturas de ventanas de vidrio.
- Juntas o uniones torcidas.
- Tabiques o mamparas desenchajados.
- Rotura de algunas jácenas, viguetas y montantes.
- Daños reparables.

Para estimar las consecuencias en personas o en un grupo de población se recomienda aplicar el método Probit de vulnerabilidad a explosiones, desarrollado en la NTP 291-1991.

Resolución de un caso práctico

Evaluar el riesgo por sobrepresión generado por la deflagración de una nube de vapor no confinada a causa de la rotura de una esfera de almacenamiento de propano licuado de 2000 m³ de capacidad a temperatura ambiente de 25 °C y a una presión de vapor absoluta de 10 bar.

Datos

- Densidad del propano líquido 0,5 kg/dm³.
- Calor específico a presión constante.
- C = 2,45 kJ / kg. K (promedio entre 231 a 298 K).
- Temperatura de ebullición = - 42 °C.
- Calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición $h_{fg} = 429$ kJ / kg.
- Calor de combustión inferior (potencia calorífica inferior) del propano a 25 °C = 46 389 kJ/kg.
- Calor de combustión (detonación) del TNT = 4 520 kJ/kg.

Solución

La causa del vertido puede ser dilatación y estallido por sobrellenado, fallo del recipiente, BLEVE, sabotaje, inclemencias atmosféricas, inundaciones, colisiones, terremotos, etc. De estas causas la BLEVE es un caso aparte estudiado en las NTP's 293 y 294, y que da origen a una bola de fuego si la materia implicada es combustible y existe un incendio previo al fenómeno. En este caso el efecto más importante es la radiación térmica.

La cantidad de propano líquido vaporizado implicado en la deflagración se calcula mediante la siguiente fórmula termodinámica.

$$F_v = C_p \frac{T - T_b}{h_{fg}}$$

F_v = Fracción vaporizada del líquido derramado.

C_p = Calor específico a presión constante (promediado entre T y T_b).

T = Temperatura absoluta inicial del líquido (K).

T_b = Temperatura absoluta de ebullición del líquido a presión atmosférica (K).

h_{fg} = Calor latente de vaporización a la temperatura de ebullición (kJ/kg).

$$F_v = 2,45 \frac{298 - 231}{429} = 0,38$$

En realidad se debe añadir una masa importante de líquido arrastrado en forma de gotículas (aerosol). Basándose en la experiencia Kletz (Ref. 1) recomienda, para estos casos, doblar ese valor por lo que el porcentaje de masa total derramada implicado en la nube sería $2 \times 0,38 = 0,76 = 76\%$.

La masa de la nube formada sería por tanto:

$$M = 2000\text{m}^3 \times \frac{500\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{76}{100} = 760000$$

En este caso práctico se considera el caso más desfavorable con la capacidad máxima de la esfera y en el supuesto que el derrame sea total.

El paso siguiente es considerar el rendimiento o eficacia η de la explosión, para determinar la **masa equivalente de TNT**. Un valor generalmente aceptado es $\eta = 0,1$ que significa que el 10% de la masa de vapor y gotículas (aerosol) existente en la nube, reacciona en la explosión.

$$W = \frac{\eta M \cdot E_c}{E_{cTNT}} = \frac{0,1 \cdot 760000 \cdot 46389}{4520} = 779992\text{kg de TNT}$$

Para la evaluación de las sobrepresiones, en primer lugar se puede proceder a delimitar las distancias de la zona de Intervención y la de Alerta, según la Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico.

Alcance para el valor umbral Zona de Intervención

Sobrepresión local estática de la onda de presión 125 mbar = 0,125 bar = 12,5 kPa = 12 500 Pa.

Utilizando el gráfico de la figura 2 a 12 500 Pa corresponde una distancia escalada $Z = 9$ equivalente a una:

$$R = 9 \cdot 779\,992^{1/3} = 828 \text{ m}$$

En el caso considerado de explosión de una nube de vapor más denso que el aire como es el propano, con un foco de ignición cercano, a la altura de los equipos de proceso, se tendría una explosión asimilable al modelo hemisférico de explosión a nivel del suelo, para lo cual se debería utilizar la figura 2 con una masa doble de TNT ya que este gráfico está previsto para explosiones libres a cierta altura en la cual el frente de onda avanza en todas las direcciones en forma esférica, con lo cual se tendría:

$$R = 9 (2 \times 779\,992)^{1/3} = 1043 \text{ m}$$

Alcance para el valor umbral Zona de Alerta

Sobrepresión local estática de la onda de presión 50 mbar = 0.050 bar = 5 000 Pa.

Utilizando el gráfico de la figura 2 a 5 000 Pa corresponde una distancia escalada $Z = 17$. Considerando como en el cálculo anterior el doble de masa para explosión a nivel del suelo.

$$R = 17 (2 \times 779\,992)^{1/3} = 1962 \text{ m}$$

Alcance de la zona con lesiones de rotura de tímpanos

Valor umbral de sobrepresión 0,35 bar = 35.000 Pa.

Con el mismo gráfico de figura 2 a 35 000 Pa corresponde una distancia escalada $Z = 4,4$.

$$R = 4,4 (2 \times 779\,992)^{1/3} = 507 \text{ m}$$

Alcance de la zona con muertos por lesiones pulmonares

Valor umbral de sobrepresión 0,70 bar = 70 000 Pa.

Con el gráfico de figura 2 a 70 000 Pa corresponde una distancia escalada $Z = 2,9$.

$$R = 2,9 (2 \times 779\,992)^{1/3} = 335 \text{ m}$$

Hasta aquí sólo se ha considerado la sobrepresión incidente (lateral) máxima. La presión dinámica Q y la sobrepresión reflejada P_r se pueden calcular con las fórmulas indicadas anteriormente, o con gráficos no incluidos en este documento, pero sí en las referencias 1 y 2 en unidades anglosajonas y SI respectivamente. Según la posición de las personas se tendrían los efectos de la presión dinámica y la sobrepresión reflejada (figura 3).

Teniendo en cuenta la duración de la onda de choque, se tendría además el efecto del impulso específico, parámetro que se obtiene del gráfico de la figura 2.

Bibliografía

(1) A. I. Ch. E.

Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis

Nueva York, A.I.Ch.E. 1989

(2) BAKER, W. E. et al.

Explosion Hazards and Evaluation

Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 1. 983, 807 págs.

(3) BODURTHA, F. T.

Industrial Explosion Prevention and Protection

Nueva York, McGraw Hill Book Company, 1980, 167 págs.

(4) INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS

The Assessment of Major Hazards

Congreso en Manchester 14-16 Abril, 1982.

Oxford. Pergamon Press Ltd., 1982, 428 págs.

Comunicación: F.K. Crawley.

The Effects of the Ignition of a Major Fuel Spillage págs. 125-145

(5) LEES, F. P.

Loss Prevention in the process Industries. 2 vols

Londres, Butterworths & Co Ltd. , 1.980, 1316 págs.

(6) MINISTERIO DEL INTERIOR

Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico

BOE 6-2-1991

(7) TNO

Methods for the calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (Liquids and Gases)

(Yellow Book) 2 Vols.

Voorburg (The Netherlands), Directorate- General of Labour, 1980, 222 + 230 págs.