

NTP 293: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica



Explosions BLEVE. Evaluation de la radiation thermique
BLEVE's Assessment of Thermal Radiation

Vigencia	Actualizada por NTP	Observaciones	
Válida			
ANÁLISIS			
Criterios legales		Criterios técnicos	
Derogados:	Vigentes:	Desfasados:	Operativos: SI

Redactores:

Manuel Bestratén Belloví
Ingeniero Industrial

Emilio Turmo Sierra
Ingeniero industrial

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Esta Nota Técnica de Prevención expone el fenómeno físico de las explosiones BLEVE, riesgo de consecuencias catastróficas al que se ven expuestos, en los incendios, los depósitos de líquidos y gases licuados. Se presentan sistemas simplificados de evaluación de los daños que generan por la radiación térmica.

Introducción

Una BLEVE es un tipo de explosión mecánica cuyo nombre procede de sus iniciales en inglés Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion cuya traducción sería "Expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición".

La BLEVE es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados.

Para que se produzca una explosión BLEVE no es necesaria la existencia de reacciones químicas ni fenómenos de combustión. Podría producirse incluso en calentadores de agua y calderas de vapor. En principio podría originarse en cualquier líquido almacenado en un recipiente hermético, aunque hay explosiones que pueden confundirse con una BLEVE sin serlo. Las BLEVES son exclusivas de los líquidos o gases licuados en determinadas condiciones.

Normalmente las BLEVE se originan por un incendio externo que incide sobre la superficie de un recipiente a presión, especialmente por encima del nivel líquido, debilitando su resistencia y acabando en una rotura repentina del mismo, dando lugar a un escape súbito del contenido, que cambia masivamente al estado de vapor, el cual si es inflamable da lugar a la conocida bola de fuego (fireball). Esta última se forma por deflagración (combustión rápida) de la masa de vapor liberada. Debido a que esta circunstancia es el escenario normal, al hablar de explosiones BLEVE's y sus consecuencias, se incluye en sentido amplio a la bola de fuego, aunque debe quedar claro que ésta última sólo ocurre cuando el producto es inflamable.

La característica fundamental de una BLEVE es la expansión explosiva de toda la masa de líquido evaporada súbitamente, aumentando su volumen más de 200 veces. La gran energía desarrollada en esa explosión repentina proyecta fragmentos rotos de distintos tamaños del recipiente a considerables distancias. Precisamente ésta es una prueba de confirmación de una BLEVE. Los fragmentos proyectados pueden arrastrar tras de sí a cierta masa de líquido en forma de gotículas de finísima lluvia, con posibilidad de inflamación a considerables distancias.

Tras producirse el estallido del recipiente, la gran masa evaporada asciende en el exterior, arrastrando finísimas partículas de líquido y entrando en combustión -en caso de incendio- en forma de hongo, con la gran bola de fuego superior tras un instante y al haberse producido la difusión en el aire por debajo del límite superior de inflamabilidad. Dicha bola de fuego se irá expandiendo a medida que va ardiendo la totalidad de masa de vapor liberada.

Condiciones para que se produzca una explosión BLEVE

Para que se origine una explosión BLEVE tienen que concurrir las condiciones siguientes que son interdependientes entre sí:

Producto en estado líquido sobrecalentado

Se entiende como tal cuando su temperatura es superior a la que lo correspondería si se hallara en equilibrio con su presión de vapor. Esta situación de inestabilidad se presenta bajo una exposición del recipiente a un incendio o en recipientes sobrelLENADOS. No toda temperatura de sobrecalentamiento permite la formación de BLEVES. Debe superarse una temperatura límite. En caso de fisura de un depósito, incluso pequeña, y producirse un descenso de la presión para igualarse a la atmosférica, el gas licuado estará ineludiblemente en condiciones de sobrecalentamiento que podría fácilmente llegar a ser muy peligroso.

Bajada súbita de la presión (isoentrópica) en el interior del recipiente

Tal descenso de presión puede ser debido a causas tales como: desprendimiento del disco de ruptura, pérdida de resistencia del recipiente en un incendio con la consiguiente rotura del mismo, perforación del recipiente por impacto, rotura por sobrelLENADO e incluso disparo de válvulas de seguridad mal diseñadas. Cuanto mayor sea la caída de presión, mayores serán también los efectos de la BLEVE caso de producirse. El tamaño de la abertura inicial del depósito es determinante en la celeridad de la bajada de presión y en la zona afectada por la nucleación. En determinadas condiciones de presión y temperatura un líquido sobrecalentado que se ha expuesto a un descenso súbito de presión puede evaporarse de forma extremadamente violenta al cambiar de estado masivamente por un proceso de formación espontánea y generalizada de burbujas de vapor (nucleación).

La mayoría de estudios de investigación realizados sobre este proceso de nucleación espontánea coinciden en que la evaporación con formación de minúsculas burbujas no afectan a la totalidad de la masa, aunque la cantidad evaporada instantáneamente es de tal magnitud que arrastra al líquido restante en forma de finísimas gotículas que se van vaporizando posteriormente. Si esta nucleación espontánea es homogénea por afectar a todo el conjunto, la explosión es mucho mas violenta que en el caso de ser heterogénea, al concentrarse en zonas en contacto con la pared interior del recipiente. Igualmente es necesario evitar las nucleaciones heterogéneas, ya que también son peligrosas por si mismas y pueden contribuir a acelerar la homogeneización de la nucleación. La nucleación heterogénea se puede producir en condiciones de sobrecalentamiento focalizado sin alcanzar la temperatura límite.

Termodinámica de la BLEVE

Cualquier líquido o gas licuado almacenado en el interior de un recipiente cerrado se encuentra en las dos fases, líquido y vapor en situación de equilibrio, según la curva de saturación presión - temperatura de la figura 1, o sea que a cada temperatura del líquido le corresponde una determinada presión de vapor, que es la que está soportando la pared interior del recipiente expuesto a la fase vapor.

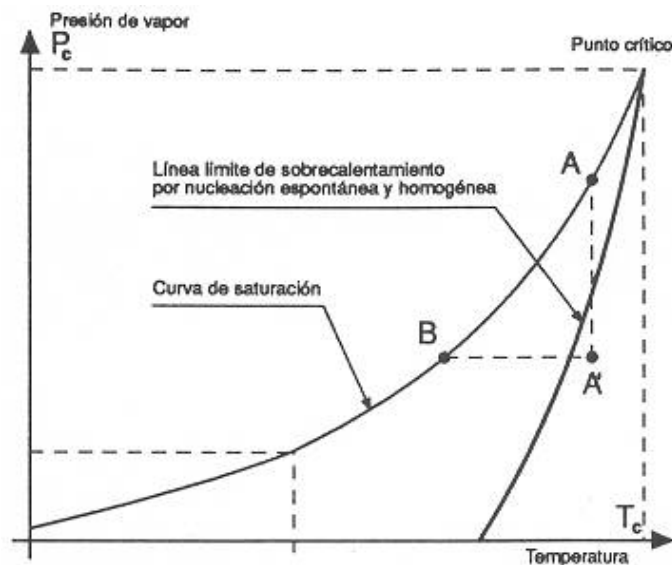


Fig. 1: Curva de saturación P-T

A medida que aumenta la temperatura, aumenta obviamente la presión de equilibrio, hasta alcanzarse el punto crítico, a partir del cual solo es posible la existencia de la fase gaseosa. Por ello se define la temperatura crítica como aquella temperatura máxima a la que se puede licuar un gas. Y la correspondiente presión crítica es la presión de vapor máxima que puede tener un líquido.

El sobrecalentamiento de una sustancia puede lograrse mediante calentamiento, superando su punto de ebullición sin que llegue a transformarse en vapor, o bien disminuyendo la presión, permaneciendo la temperatura constante. Así por ejemplo, en la figura 1 podemos observar que el punto A' de sobrecalentamiento se puede alcanzar por un aumento de temperatura a presión constante desde el punto B o una disminución brusca de presión (por expansión isoentrópica) desde el punto A. Evidentemente la posición A' es una situación inestable que tenderá a buscar su posición natural de equilibrio sobre la curva de saturación. En esta zona de inestabilidad definida en los márgenes que a continuación se expondrán, se favorece la nucleación espontánea como paso previo de la vaporización masiva y por tanto de la BLEVE.

Precisamente, y tal como hemos dicho, la BLEVE es provocada originariamente por un descenso brusco de la presión a temperatura constante por las causas ya expuestas.

Para comprender mejor la situación de inestabilidad de los líquidos sobrecalentados es necesario analizar el comportamiento de los gases licuados según la ecuación de Van der Waals:

$$\left(p + \frac{3}{v^2}\right) \cdot (3v - 1) = 8t$$

en donde:

$$p = \frac{P}{P_c} \quad v = \frac{V}{V_c} \quad t = \frac{T}{T_c}$$

siendo:

P = presión p = presión reducida
 V = volumen v = volumen reducido
 T = temperatura absoluta t = temperatura reducida
 P_c, V_c y T_c = constantes críticas

Esta ecuación, que se representa gráficamente en el diagrama de la (fig 2), muestra para cada isoterma la relación existente entre presión y volumen para un gas licuado tipo. En dicho diagrama se han representado los dos posibles estados de inestabilidad (estados metaestables), el del líquido sobrecalentado y el del vapor subenfriado, que corresponden respectivamente, para la isoterma representada, al tramo 1-2 y 4-5. Precisamente en estos puntos límites de inestabilidad 2 y 4 le corresponde un mínimo y un máximo de la ecuación de estado, por lo que en ellos la pendiente de la tangente a la curva es cero.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{t=\text{cte}} = 0$$

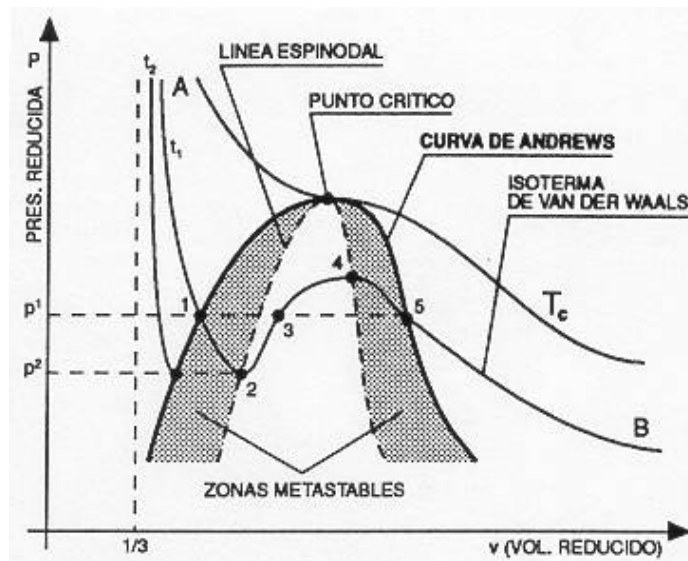


Fig. 2: Gráfica P-T-V para gases licuables

La línea que une los diferentes puntos límite de inestabilidad para líquidos sobrecalentados y vapores subenfriados se suele denominar línea espinodal.

Las zonas de metaestabilidad quedan delimitadas entre dicha curva espinodal y la curva binodal o de Andrews la cual separa el área en la que existen dos fases, vapor y líquido, de las áreas en que sólo existe una sola fase (líquido o vapor).

En el punto crítico la línea binodal y espinodal coinciden con tangente común que es precisamente la tangente a la curva de presión de vapor en dicho punto crítico.

Tales puntos límite de sobrecalentamiento de la línea espinodal pueden representarse en el anterior diagrama de presión de vapor - temperatura de la fig. 1 en una curva.

Cabe reseñar que respecto a la posible BLEVE que nos ocupa, no toda la zona de metaestabilidad de líquidos sobrecalentados entraña riesgo, ya que precisamente éste se concreta al alcanzar los mínimos de la curva de Van der Waals en los que irremisiblemente el líquido sobrecalentado se vaporiza súbitamente con una nucleación homogénea.

Para determinar el límite de sobrecalentamiento en el que se produce la nucleación espontánea y consecuentemente la BLEVE, habría que obtener los diferentes puntos de la curva espinodal que permitieran representarla. Dado que la tangente a esta curva en el punto

crítico estará siempre en la gráfica a la izquierda de tal tramo de la misma, suele admitirse según los estudios más recientes que dicha recta tangente constituye el límite de seguridad con un margen suficientemente amplio.

Según datos experimentales se ha comprobado que la diferencia entre el límite real de sobrecalentamiento que podría provocar la BLEVE y el límite establecido por la tangente a la curva de saturación en el punto crítico y a presión atmosférica oscila entre 20 y 35°C.

La curva de saturación del diagrama presión de vapor-temperatura se asimila a la ecuación de Antoine, que es una aproximación de la de Clausius Clapeyron, según la cual:

$$\ln P = -\frac{A}{T} + B \quad \text{o bien} \quad P = e^{-\frac{A}{T} + B}$$

siendo:

P = presión de vapor (atm).

T = temperatura absoluta (K).

A y B = constantes para cada compuesto.

La tangente a dicha curva de saturación en el punto crítico se obtiene calculando la derivada de la presión respecto a la temperatura en dicho punto:

$$\frac{dP}{dT} = P \cdot \frac{A}{T^2}$$

y el punto crítico $\frac{dP_c}{dT_c} = P_c \cdot \frac{A}{T_c^2} = \text{tg} \alpha$

Ejemplo

Calcular los límites de seguridad de sobrecalentamiento del butano frente al riesgo de BLEVE.

En un manual de datos físico-químicos de sustancias, podemos obtener dos puntos de la curva de saturación, tales como:

$$P_c = 38,7 \text{ atm.}$$

$$P = 1 \text{ atm.}$$

$$T_c = 152,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = -0,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\ln 1 = 0 = -\frac{A}{272,5} + B$$
$$\ln 38,7 = 3,65 = -\frac{A}{425,8} + B$$

Resolviendo las dos ecuaciones obtenemos A = 2769 y B = 10,16

La tangente al punto crítico será:

$$\frac{dP_c}{dT_c} = P_c \cdot \frac{A}{T_c^2} = \text{tg} \alpha = 38,7 \cdot \frac{2769}{425,8^2} = 0,591$$

La ecuación de la referida tangente es:

$$P = T \cdot \text{tg} \alpha + b$$

La constante b se obtiene sustituyendo valores en el punto crítico:

$$38,7 = 0,591 \cdot 425,8 + b \quad b = -213$$

El otro punto clave a la presión absoluta de cero atmósferas es el punto de corte con el eje de abscisas.

$$0 = 0,591 \cdot T_0 - 213 \quad T_0 = 360,4\text{K} \approx 88^\circ\text{C}$$

Consecuentemente los límites prácticos de riesgo estarán comprendidos entre una temperatura de 88° C y 152,8° C, lo que correspondería a las presiones de vapor comprendidas entre 12 y 38,7 atm.

$$\ln P = -\frac{2769}{361} + 10,16;$$

$$\ln P = -7,67 + 10,16 = 2,49; P = 12,06 \text{ atm}$$

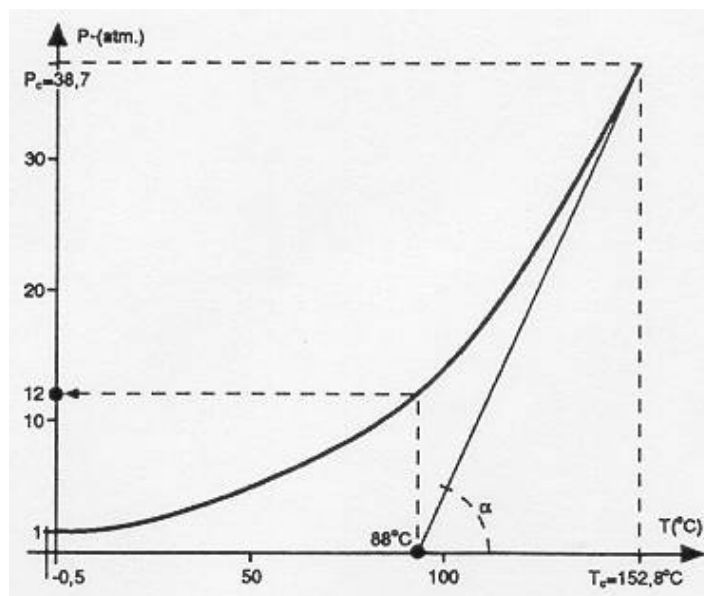


Fig. 3: Estimación de los límites teóricos de sobrecalentamiento para el butano

Consecuencias de una BLEVE

Aunque en sentido estricto la BLEVE es la explosión mecánica del recipiente, dado que normalmente va asociada originariamente a incendios sobre recipientes que contienen líquidos inflamables, nos limitaremos en este último apartado a los tres tipos de consecuencias que suceden en este último caso:

- Radiación térmica.
- Sobrepresiones por la onda expansiva.
- Proyección de fragmentos metálicos.

Para la cuantificación de estos tres tipos de consecuencias se han desarrollado diferentes modelos empíricos de análisis que han recogido las experiencias de accidentes sucedidos.

Dada la diversidad de modelos matemáticos existentes, en esta Nota Técnica se recoge solamente un sistema simplificado de cálculo, validado por instituciones especializadas en este campo.

El efecto más nocivo de una BLEVE es el derivado de la radiación térmica, aspecto sobre el que se centra esta NTP. La altísima radiación térmica de la bola de fuego formada, provocará la muerte de todo ser vivo que quede encerrado en la misma y la posibilidad de propagación de incendios y BLEVE's a instalaciones y recipientes próximos generando un efecto dominó. Evidentemente la gravedad de los daños a personas y bienes estará en función de la distancia a la susodicha bola de fuego.

La proyección de fragmentos metálicos de diferentes tamaños del recipiente explosionado podrá alcanzar distancias considerables, incluso de hasta 1000 m.

Respecto a los efectos por sobrepresiones derivadas de la onda expansiva de la deflagración de la bola de fuego, se recomienda consultar la NTP nº 291 Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores.

Si bien los daños graves a personas por lesiones pulmonares y/o rotura de tímpano no suelen ocurrir a más de 100 m de la superficie exterior de la bola de fuego, los daños estructurales considerables podrían alcanzar en casos extremos a 500 m desde el centro de la explosión.

Radiación térmica

Previamente al cálculo de la dosis de radiación térmica a la que van a estar expuestas personas e instalaciones en una BLEVE, es preciso conocer las siguientes características sobre la bola de fuego formada por la combustión de la masa vaporizada:

- El diámetro de la bola de fuego.
- La altura de dicha bola.
- La duración máxima de la deflagración.

Diámetro de la bola de fuego

El diámetro de la bola de fuego se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$D = 6,48 \cdot W^{0,325} \text{ (T. N. O.)}$$

siendo:

D = diámetro máximo (m).

W = masa total del combustible (kg).

Altura de la bola de fuego

$$H = 0,75 D$$

siendo:

H = altura del centro de la bola (m).

D = diámetro máximo (m).

Duración de la bola de fuego

$$t = 0,852 W^{0,26} \text{ (T. N. O.)}$$

siendo:

t = tiempo de duración (s).

W = masa total del combustible (kg).

La experiencia demuestra que la duración puede llegar a durar hasta tres minutos para las esferas de gran capacidad.

Radiación térmica recibida

La radiación recibida en un punto determinado se obtiene mediante la ecuación genérica siguiente:

$$I = d F E$$

siendo:

I = irradiación recibida (kW/M²).

d = coeficiente de transmisión atmosférica.

F = Factor geométrico de visión.

E = Intensidad media de radiación (kW/m²).

El coeficiente de transmisión atmosférica es función de la humedad relativa del aire y de la distancia al punto en cuestión.

$$d = 2,02 (P'_v \cdot x)^{-0,09}$$

siendo:

P'_v = presión parcial absoluta del vapor en el aire ambiental (Pa) (1 bar = 10⁵ Pa).

x = distancia entre la envolvente de la bola de fuego y el punto considerado (m).

El factor geométrico F es un coeficiente que depende de la forma del foco emisor y receptor, y de la distancia.

En el caso de BLEVES, al asimilarse la bola de fuego a una esfera y el cuerpo receptor a una superficie normal a la radiación directa en la línea procedente del centro de la esfera, se demuestra que el factor geométrico tiene el valor:

$$F = D^2 / 4 X^2$$

siendo:

D = diámetro máximo de bola de fuego (m).

x = distancia entre el centro de la esfera y el cuerpo irradiado (m).

La intensidad media de radiación E es el flujo radiante por unidad de superficie y tiempo, y se calcula según la siguiente expresión:

$$E = f_r \cdot W \cdot H_c / \pi \cdot D^2 \cdot t$$

siendo f_r un coeficiente de radiación que puede oscilar entre 0,25 y 0,40. El coeficiente f_r nos indica la fracción de la energía total desarrollada en la combustión, ya que esta energía se ve reducida por las pérdidas, fundamentalmente en la convección de humos.

W = masa total del combustible (kg).

H_c = calor de combustión (kJ/kg).

D = diámetro máximo de la bola de fuego (m).

t = tiempo de duración de la BLEVE (s).

Una vez calculada la irradiación térmica, hay que proceder al cálculo de la dosis de radiación térmica para personas expuestas. Una de las fórmulas más empleadas es la de Eisenberg:

$$\text{Dosis} = t \cdot I^{4/3}$$

en la que

t = tiempo de exposición (s).

I = irradiación recibida (W/m^2).

El valor exponencial de la I, representa un coeficiente de mayoración de la dosis, a efectos de seguridad. Tengamos en cuenta, que según la Directriz Básica para las elaboraciones de los planos especiales del sector químico (BOE 6-2-91), los valores umbral son: Para el límite de la Zona de Intervención en la cual el nivel de daños justifica la implantación inmediata de medidas de protección, 5 kW/m^2 en un tiempo máximo de exposición de 3 minutos, y para el límite de Zona de Alerta de 3 kW/m^2 en tiempo de exposición prácticamente indeterminado, ya que los daños solo serían perceptibles por los grupos de población críticos.

Para una valoración más precisa de daños a la población expuesta en función de la dosis de radiación térmica sería recomendable la aplicación del Método Probit desarrollado en la NTP nº 291 Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores.

A título orientativo se indica a continuación la máxima radiación tolerable de materiales, (fuente - programa Toccata - Italia).

MATERIAL	RADIACION MAXIMA TOLERABLE I (W/m^2)
CEMENTO	60.000
HORMIGON ARMADO	200.000
ACERO	40.000
MADERA	10.000
VIDRIO	30.000 - 300.000
PARED DE LADRILLO	400.000

Ejemplo

Calcular las consecuencias de radiación térmica de la BLEVE de una esfera que contiene 200 m^3 de butano almacenados a 20°C , a

una distancia de 200 m. La humedad relativa atmosférica es 50%.

Datos:

Según tablas de la presión absoluta del vapor de agua saturado, a 20°C corresponden a 2310 Pa.

El calor de combustión es 45800 kJ/kg.

La densidad del butano en estas condiciones es, aproximadamente, 0,5kg/dm³.

$$W = 0,5 \text{ kg/dm}^3 \cdot 200.000\text{dm}^3 = 100.000 \text{ kg}$$

Solución:

Diámetro de la bola de fuego

$$D = 6,48 \cdot 100.000^{0,325} = 273 \text{ m}$$

Altura de la bola de fuego

$$H = 0,75 \cdot 273 = 204 \text{ m}$$

Duración de la bola de fuego

$$t = 0,852 \cdot 100.000^{0,26} = 17 \text{ s}$$

La distancia entre la envolvente de la bola de fuego y el punto considerado a efectos de determinar el coeficiente de transmisión atmosférica, se calcula tal como se indica en la figura 5.

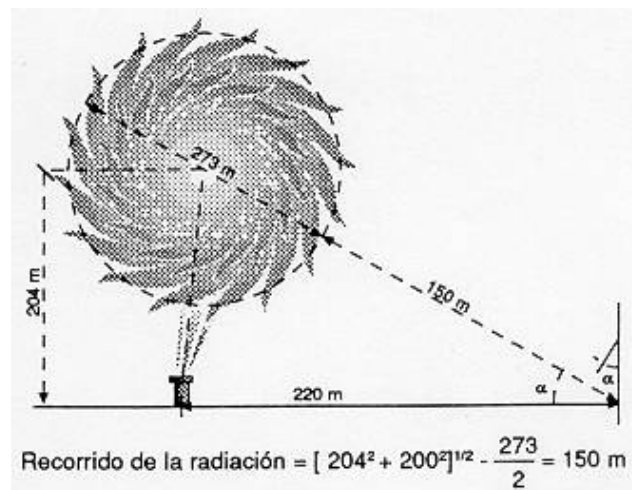


Fig. 5: Cálculo de la distancia x

Coefficiente de transmisión atmosférica

La presión parcial absoluta del vapor de agua P'v con una humedad relativa del 50% contenido en la masa de aire húmedo se calcula así:

$$P'_v/P_v = 0,5 ; P'_v = 0,5 \cdot 2310 = 1155 \text{ Pa}$$

Pv = Presión absoluta del vapor de agua saturado

P'v = Presión parcial absoluta del vapor de agua en un ambiente de humedad relativa x%

$$d = 2,02 (1155 \cdot 150)^{-0,09} = 0,68$$

Factor geométrico de visión

$$F = 273^2 / 4 (273/2 + 150)^2 = 0,23$$

Intensidad media de radiación

Se adopta $f_r = 0,25$

$$E = 0,25 \cdot 100000 \cdot 45800 / 3,14 \cdot 273^2 \cdot 17 = 288 \text{ kW/m}^2$$

Irradiación recibida

$$I = 0,68 \cdot 0,23 \cdot 288 = 45 \text{ kW/m}^2 \text{ (sobre hipotética superficie perpendicular a la radiación).}$$

$$Tg\alpha = 204 / 200 = 1,02 \quad \alpha = 45^\circ$$

La irradiación recibida sobre una persona o superficie vertical en el suelo será aproximadamente:

$$I_{\text{real}} = 45 \cdot \cos 45^\circ = 45 \cdot 0,7 = 31,5 \text{ kW/m}^2 = 31500 \text{ W/m}^2$$

Dosis de irradiación

$$\text{Dosis} = (17 \cdot 31.500^{4/3}) = 16.912.053 \text{ W/m}^2$$

Para determinar los daños a la población aplicamos las ecuaciones "Probit" siguientes según la NTP nº 291 Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores:

- (Quemaduras 1º grado) $Pr = -39,83 + 3,0186 \ln(t \cdot I^{4/3})$
- $Pr = 10,41$
- La totalidad de personas expuestas sufrirían quemaduras de 1º grado.
- (Mortalidad) $Pr = -14,9 + 2,56 \ln(t \cdot I^{4/3} / 10^4)$ $Pr = 4,12$
- Habría un 19% de mortalidad
- En cambio tal irradiación (31.500 W/m^2) sólo afectaría destructivamente a la madera.

Bibliografía

(1) A.I.Ch.E.

Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis

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

(2) EISENBERG, N.A. et al.

Vulnerability Model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills

Springfield, VA, U.S.A., U. S. Coast Guard, Office of Research and Development, Report No. CG-D- 136- 75, N. T. I. S. AD-AO15-245, 1975

(3) FERNÁNDEZ CÁMARA, A.

Explosión de recipientes. Teoría y cálculo de las consecuencias de la radiación térmica

Prevención, 1990, nº 114 Octubre - Diciembre, págs. 48 - 56

(4) LESLIE, I.R.M. Y BIRK, A.M.

State of the art review of pressure liquefied gas container failure modes and associated projectile hazards.

Journal of Hazardous Materials, 1991, 28, págs 329 - 365

(5) MANS, C.

La explosión del Camping "Els Alfacs"

Ingeniería Química, 1985, Noviembre, pags 349 - 351

(6) MAÑAS LAHOZ, J.L.

Las explosiones "BLEVE". Riesgos y medidas preventivas

Protección Civil. España. Seminario sobre explosiones BLEVE, Madrid, 1991

(7) MC DEVITT, C.A. ET AL.

Iniciation stop of Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions

Journal of Hazardous Materials, 1990, 25, págs 169 - 180

(8) MONTENEGRO FORMIGUERA, L.

Las explosiones BLEVE y el gas natural licuado

Comunicación 14-87. XIII Asamblea Nacional del Gas. Madrid, 27, 28 y 29 mayo 1987.

(9) SIGALÉS B. Y TRUJILLO, A.

Modelado de estallidos de recipientes. Modelado fenomenológico de estallidos de recipientes conteniendo líquidos a presión, debidas a calentamiento exterior por llamas

Ingeniería Química, 1990, Octubre pags, 465 - 473

(10) STINTON, H.

Risks of transporting hazardous materials spelled out by BLEVE

Fire, 1979, Noviembre, págs 313 - 315

(11) T.N.O.

Methods for the Calculations of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials: Liquids and Gases ("The Yellow Book") 2 Vols.

Voorburg, The Netherlands, Bureau for Industrial Safety TNO, 1979.

P. O. Box 432; 7300 AH Apeldoorn, The Netherlands.

(12) WALLS W. L.

The BLEVE, partes I y II

Fire Command, 46 (5), 1979, págs 22-24; y 46(6), 1979, págs 35-37