

Análisis de consecuencias de accidentes

1 INTRODUCCION

La industria desempeña un papel básico en el desarrollo de la sociedad moderna. La mayor parte de los productos o materiales que utilizamos en nuestra vida cotidiana procede de la tecnología industrial química, pero su desarrollo conlleva la aparición de multitud de situaciones de riesgo que, en ocasiones, se materializan en accidentes de graves consecuencias.

A la hora de escribir este capítulo (Diciembre 2015) nos encontramos con la siguiente noticia



Un horrible accidente convirtió en un infierno a la ciudad de Nnewi, en el sureste de Nigeria, cuando un camión de transporte de gas licuado se incendió la tarde del 24 de diciembre en una planta industrial de gas, matando a más de 100 personas que esperaban su turno para rellenar sus cilindros de gas

para festejar la Navidad.

En el mismo país el 1 de Junio de 2015 al menos 50 personas murieron calcinadas después de que un camión cisterna chocara contra un edificio de la ciudad de Onitsha, en el estado de Anambra, al este de Nigeria, y causara un gran incendio y varias explosiones en cadena en un aparcamiento colindante.

El 24 de Marzo de 2005, ocurrió un accidente en una refinería que BP (British Petroleum) tiene en Texas. El accidente ocurrió en la unidad de reformado de gasolinas. Este accidente fue el peor de la industria química en los últimos 15 años en Estados Unidos. Más de 100 personas resultaron heridas y hubo alrededor de 15 muertos.

El 21 de septiembre de 2001 la explosión de un depósito de nitrato amónico, en el que había entre 200 y 300 toneladas de esta sustancia, de la planta petroquímica AZF del grupo Total Fina Elf de la ciudad francesa de Toulouse provocó la muerte de 29 personas y otras 1170 resultaron heridas

En 1984, durante la noche del 2 al 3 de diciembre, un escape tóxico originado en una planta de Union Carbide en Bhopal (India), figura 1.1 tuvo lugar uno de los mayores desastres químicos de la historia. En

un tanque de metil isocianato (MIC), que almacenaba 40 toneladas, se introdujo accidentalmente agua. La reacción química resultante formó una nube de MIC y otros productos que, en forma de líquido y vapor, se liberó al medio ambiente. Las poblaciones cercanas a la planta sufrieron efectos inmediatos y devastadores. El número de víctimas fatales como consecuencia del accidente fue motivo de controversias aunque fueron estimadas según las fuentes entre 3.000 y 16.000 personas, mientras que el número de afectados osciló entre las 200.000 y 600.000 personas



El 10 de julio de 1976, en Seveso, una localidad densamente poblada del norte de Italia, en la fábrica de cosméticos de la multinacional Hoffmann-La Roche se produce un accidente que provocó el escape de unos 2 kilogramos de 2,3,7,8-tetracloro-p-dibenzodioxina, un gas de extrema toxicidad y persistencia en el medio ambiente. Las consecuencias inmediatas fueron daños permanentes a cientos de personas, el sacrificio de más de 75.000 animales afectados. Más tarde se evidenciaron otros efectos como un aumento alarmante de malformaciones en los recién nacidos.

A partir de este accidente se empezó a tomar conciencia en la Comunidad Europea de los riesgos de accidentes en las industrias químicas, elaborándose la llamada Directiva "Seveso" 82/501/CEE, que pretendía la prevención de los accidentes y la limitación de sus consecuencias mediante la existencia de planes de emergencia interior y exterior en las instalaciones con riesgo de accidentes mayores.

Más cercano a nosotros está el accidente ocurrido el viernes 14 de agosto del 2003 que pasará a formar parte de la historia, como uno de los días más trágicos de la petroquímica en España. En este suceso perdieron la vida nueve trabajadores y otros más resultaron heridos graves. Eran las ocho y cuarto de la mañana y los ciudadanos después

de oír y sentir una tremenda explosión, contemplaron una densa columna de humo procedente del complejo petroquímico.

La explosión se registró en un tanque de nafta de la Unidad 100 del área de refinería y conversión, que daría lugar a un intenso incendio que se extendería a otros seis tanques que contenían 8.600 m³ de gasolinas refinadas. Afortunadamente el incendio estuvo confinado en un cubeto, que aísla la zona de almacenamiento de naftas de otras zonas como medida de seguridad frente a derramamientos.

Otro accidente que no se puede olvidar es el accidente del camping de Los Alfaques que se produjo el 11 de julio de 1978 en un camping de playa situado en el municipio de Alcanar, comarca del Montsiá en la provincia de Tarragona (España), a solo 3 km del núcleo urbano de San Carlos de la Rápita, donde tuvo lugar un gravísimo accidente por la explosión de un camión cisterna que transportaba propileno licuado. El resultado fue de 243 fallecidos, más de 300 heridos graves, y la destrucción de la mayor parte del campamento.

Los riesgos de las actividades industriales están relacionados con las características peligrosas de las sustancias o productos utilizados (inflamables, tóxicos o explosivos), con las condiciones de trabajo (temperatura, presión,...) y con el elevado volumen de producción necesario.

2 LEGISLACION

La prevención de accidentes mayores ha recibido atención legislativa desde hace años. El Real Decreto 886/1988, de 15 de julio, sobre prevención de accidentes mayores en determinadas actividades industriales, modificado por el Real Decreto 952/1990, de 29 de julio, incorporó a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 82/501/CEE, del Consejo, de 24 de junio, Directiva Seveso I, relativa a los riesgos de accidentes graves en determinadas actividades industriales, así como sus modificaciones por las Directivas 87/216/CEE y 88/610/CEE, de 19 de marzo y de 24 de noviembre, respectivamente.

Asimismo, en cumplimiento de la Ley 2/1985, de 21 de enero, de Protección Civil, y del Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la norma básica de Protección Civil, en la que se recogen las directrices esenciales para la elaboración de los planes especiales para hacer frente a riesgos específicos, como es el caso del riesgo químico, se adoptó por el Consejo de Ministros, en su reunión del día 23 de noviembre de 1990, previo informe de la Comisión Nacional de Protección Civil, el Acuerdo por el que se aprueba la Directriz básica para la elaboración y homologación de los planes especiales del sector químico.

Tras más de diez años de experiencia en la aplicación de la Directiva 82/501/CEE, y tras el análisis de cerca de 130 accidentes que tuvieron lugar durante ese período de tiempo en la Unión Europea, la Comisión Europea consideró conveniente realizar una revisión de la Directiva, que contemplara la ampliación de su ámbito y la inclusión de algunos aspectos ausentes en la Directiva original, que mejoraran la gestión de los riesgos y de los accidentes. Ello ha conducido a la aprobación de la Directiva 96/82/CE, del Consejo, de 9 de diciembre, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los

que intervengan sustancias peligrosas, que tiene como objetivo la obtención de un alto nivel de protección para las personas, los bienes y el medio ambiente ante accidentes graves, mediante medidas orientadas tanto a su prevención como a la limitación de sus consecuencias.

El REAL DECRETO 1254/1999 de 16-7-1999, sobre Medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas incorpora a la legislación española la Directiva 96/82/CE, denominada popularmente SEVESO II y amplía las empresas obligadas y las imposiciones a éstas en relación a la prevención de accidentes mayores en las empresas sobre las recogidas en el RD 886/1988 y RD 952/1990 (Seveso I). En general, se puede afirmar que el RD 1254/1999 amplía obligaciones propias, hasta ahora del sector químico, a instalaciones de otros sectores de actividad que también utilizan en sus procesos sustancias peligrosas.

En este contexto, se hacía también necesaria la adecuación de la directriz básica a las disposiciones de la Norma básica de protección civil. Para ello se aprueba el RD 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas.

Por consiguiente, se consideró necesario proceder a la modificación del Real Decreto 1254/1999, para adaptarlo a la citada Directiva 2003/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2003 y se aprobó el RD 948/2005, de 29 de julio.



En 2012 se ha llevado a cabo la revisión de la Directiva Seveso II firmándose en el parlamento Europeo la Directiva 2012/18/UE: SEVESO III relativa control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y por la que se modifica y deroga la Directiva 96/82/CE (Seveso II).

En el REAL DECRETO 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. BOE de 20 de julio de 1999, consta la obligación, para los industriales afectados, de presentar un Informe de Seguridad, IS en adelante. Esta obligación se extiende según lo dispuesto en el art. 2 de la mencionada ley a los establecimientos en los que estén presentes sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores a las especificadas en la Tabla 1, que corresponden con las recogidas en la columna 2 de las partes 1 y 2 del anexo I del RD.

Las cantidades recogidas en los anexos del mencionado RD, han sido modificadas en el REAL DECRETO 948/2005, de 29 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los

accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. BOE núm. 181, de 30 de julio de 2005. Sobre todo aquellas relativas al Nitrato amónico y a agentes carcinogénicos o mediambientalmente peligrosos.

2.1 SUSTANCIAS EXPLOSIVAS

El estudio y la consideración de los explosivos convencionales se incluyen en la Directiva 96/82/CE del Consejo (Seveso II), relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, modificada por la Directiva 2003/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de Diciembre de 2003. Dichas Directivas han sido incorporadas al ordenamiento jurídico español por el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, y por los Reales Decretos 119/2005, de 4 de febrero y 948/2005, de 29 de Julio, que modifican al anterior.

2.1.1 Definiciones

Se dice que una sustancia es explosiva cuando es capaz de generar muy rápidamente un gran volumen de gases calientes al ser debidamente estimulada. (Kirk, R. E.; Othmer, F., 2001).

Definiciones más concretas de las sustancias explosivas y pirotécnicas son las que se recogen en el anexo I de la Directiva 2003/105/CE y del Real Decreto 948/2005:

- *una sustancia o preparado que cree riesgos de explosión por choque, fricción, fuego u otras fuentes de ignición (enunciado de riesgo R2),*
- *una sustancia o preparado que cree grandes riesgos de explosión por choque, fricción, fuego u otras fuentes de ignición (enunciado de riesgo R3), o*
- *una sustancia, preparado u objeto considerado en la Clase 1 del Acuerdo Europeo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera ADR (Naciones Unidas), celebrado el 30 de septiembre de 1957, con sus modificaciones, tal como se incorporó a la Directiva 94/55/CE del Consejo, de 21 de noviembre de 1994, sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros con respecto al transporte de materias peligrosas por carretera.*

Se incluyen en esta definición las sustancias pirotécnicas que, a los efectos de la presente Directiva (o Real Decreto), se definen como sustancias (o mezclas de sustancias) destinadas a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno o una combinación de los mismos, mediante reacciones químicas exotérmicas y autosostenidas. Cuando una sustancia o un preparado esté clasificado tanto en ADR como en los enunciados de riesgo R2 o R3, la clasificación del ADR tendrá preferencia con respecto a la asignación de enunciado de riesgo.

Las sustancias y objetos de la clase 1 están clasificados en alguna de las divisiones 2.1 a 2.6 con arreglo al sistema de clasificación del ADR. Estas divisiones son las siguientes:

División 2.1: "Sustancias y objetos que presentan un riesgo de explosión en masa (una explosión en masa es una explosión que afecta de manera prácticamente instantánea a casi toda la carga)".

División 2.2: "Sustancias y objetos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa"

División 2.3: "Sustancias y objetos que presentan un riesgo de incendio con ligero riesgo de efectos de onda expansiva o de proyección o de ambos efectos, pero sin riesgo de explosión en masa:

- a) cuya combustión da lugar a una radiación térmica considerable, o
- b) que arden unos a continuación de otros con efectos mínimos de onda expansiva o de proyección o de ambos efectos".

División 2.4: "Sustancias y objetos que sólo presentan un pequeño riesgo de explosión en caso de ignición o cebado durante el transporte. Los efectos se limitan esencialmente a los bultos y normalmente no dan lugar a la proyección de fragmentos de tamaño apreciable ni a grandes distancias. Un incendio exterior no debe implicar la explosión prácticamente instantánea del contenido de los bultos".

División 2.5: "Sustancias muy poco sensibles que presentan un riesgo de explosión en masa, con una sensibilidad tal que, en condiciones normales de transporte, sólo existe una probabilidad muy reducida de cebado o de que su combustión se transforme en detonación. Se exige como mínimo que no exploten cuando se las someta a la prueba de fuego exterior".

División 2.6: "Objetos extremadamente poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa. Dichos objetos no contendrán más que sustancias detonantes extremadamente poco sensibles y que presenten una probabilidad despreciable de cebado o de propagación accidental. El riesgo queda limitado a la explosión de un objeto único".

En esta definición también se incluyen las sustancias o preparados explosivos o pirotécnicos contenidos en objetos. En el caso de objetos que contengan sustancias o preparados explosivos o pirotécnicos, si se conoce la cantidad de sustancia o preparado contenida en el objeto, se considerará tal cantidad a los efectos de este Real Decreto. Si no se conoce la cantidad, se tratará todo el objeto, a los efectos de este Real Decreto, como explosivo".

Las materias y objetos que se incluyen en la Clase 1 del ADR 2001 son los que cumplen las definiciones siguientes:

- a) Materias explosivas: materias sólidas o líquidas (o mezclas de materias) que, por reacción química, pueden desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que puedan ocasionar daños a su entorno.

- b) *Materias pirotécnicas: materias o mezclas de materias destinadas a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno o una combinación de tales efectos, como consecuencia de reacciones químicas exotérmicas autosostenidas no detonantes.*
- c) *Objetos explosivos: objetos que contengan una o varias materias explosivas o pirotécnicas.*
- d) *Materias y objetos no mencionados ni en a) ni en b) fabricados con el fin de producir un efecto práctico por explosión o con fines pirotécnicos."*

3 METODOLOGÍA

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

La metodología establecida en la Norma UNE EN ISO 14121-1 nos indica que la evaluación del riesgo ha de hacerse para cada caso particular, incluyendo:

- Identificación de peligros.
- Determinar si se puede producir la atmósfera explosiva y la cantidad implicada.
- Determinar la presencia y la posibilidad de que existan fuentes de ignición que sean capaces de producir la ignición de la atmósfera explosiva.
- Determinar los efectos posibles de una explosión.
- Estimar el riesgo.
- Considerar las medidas para reducir los riesgos

El RD 1196/2003 por el que se aprueba la directriz básica de protección civil, establece que:

Los accidentes son todos aquellos sucesos que sean consecuencia de un proceso no controlado durante el funcionamiento normal de cualquier instalación industrial. Pueden originar los accidentes:

- *Emisiones, fugas o vertidos de sustancias peligrosas.*
- *Incendios y explosiones de sustancias peligrosas.*

El abanico de sustancias que se consideran peligrosas, está cubierto por el Anexo I del RD 1254/1999 y posteriores modificaciones, por el que se aprueban medidas de control de riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. El Objeto del RD 1254/199 es la prevención de los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias con la finalidad de

proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente. Las sustancias peligrosas, se definen en el anexo I del RD.

La Directriz básica de protección civil, establece tres categorías para los accidentes:

- Categoría 1: aquellos para los que se prevea, como única consecuencia, daños materiales en el establecimiento accidentado y no se prevean daños de ningún tipo en el exterior de éste.
- Categoría 2: aquellos para los que se prevea, como consecuencias, posibles víctimas y daños materiales en el establecimiento; mientras que las repercusiones exteriores se limitan a daños leves o efectos adversos sobre el medio ambiente en zonas limitadas.
- Categoría 3: aquellos para los que se prevea, como consecuencias, posibles víctimas, daños materiales graves o alteraciones graves del medio ambiente en zonas extensas y en el exterior del establecimiento.



3.1 Fenómenos peligrosos y variables físicas asociadas

Las sustancias peligrosas que intervienen en los accidentes mayores, pueden producir fenómenos peligrosos para las personas, el medio ambiente y las instalaciones y pueden ser de:

- Tipo Mecánico: ondas de presión y proyectiles,
- Tipo Térmico: radiación térmica
- Tipo Químico: nube tóxica o contaminación del medio ambiente provocada por la fuga o vertido incontrolado de sustancias peligrosas.

Estos tres tipos de fenómenos pueden presentarse de forma aislada, simultánea o secuencialmente.

3.1.1 Fenómenos Peligrosos de Tipo Mecánico

Se incluyen aquí las ondas de presión y los proyectiles. Las ondas de presión son provocadas por las explosiones o equilibrio rápido entre una masa de gases a presión elevada y la atmósfera que la envuelve. En el caso de que la energía necesaria para la expansión del gas proceda de un fenómeno físico, se dice que la explosión es física y se requiere que el producto esté confinado en un recipiente estanco (denominándose estallido). Si la energía procede de una reacción química, se trata de una explosión química (o explosión, simplemente).

En este caso la explosión puede ocurrir aunque el producto no esté confinado. Una explosión confinada, o estallido, puede originar fragmentos del continente, y una no confinada, de sólidos de las inmediaciones del punto en que se ha producido la

explosión. Estos fragmentos o proyectiles están dotados de gran cantidad de movimiento y sus dimensiones y alcance son variados pero limitados.

3.1.2 Fenómenos Peligrosos de Tipo Térmico

Son provocados por la oxidación rápida, no explosiva, de sustancias combustibles, produciendo llama, que puede ser estacionaria o progresiva, pero que en todos los casos disipa la energía de combustión mayoritariamente por radiación que puede afectar a seres vivos e instalaciones materiales.

Si la materia sobre la que incide el flujo de radiación térmica no puede disiparlo a la misma velocidad que lo recibe, éste provoca un incremento de su temperatura. Si este incremento no se limita, se producen alteraciones irreversibles y catastróficas, que pueden culminar en la combustión o fusión y volatilización de la materia expuesta.

En las proximidades del punto donde se desarrolla la llama, se tiene transmisión de calor tanto por convección como por radiación y conducción. Así pues, la única forma de evitar o mitigar sus efectos es la utilización de equipos de protección individual frente al calor o el fuego o protecciones adecuadas. En contraposición, a partir de una cierta distancia del foco del incendio, la transmisión del calor se efectúa exclusivamente por radiación, disminuyendo su intensidad al aumentar dicha distancia. Esto hace que cualquier pantalla opaca a la radiación térmica pueda constituir una medida de protección sumamente eficaz.

3.1.3 Fenómenos Peligrosos de Tipo Químico

Se incluyen aquí las nubes tóxicas o la contaminación del medio ambiente debida a fugas o vertidos incontrolados de sustancias peligrosas para las personas y el medio ambiente.

Estas sustancias químicas, directa o indirectamente, a través de reacciones secundarias inmediatas o diferidas, pueden producir efectos muy diversos en función de la categoría de la sustancia peligrosa de que se trate.

Los daños dependerán, para cada entorno, de las características orográficas del terreno, la concentración del tóxico y el tiempo de exposición.

La característica esencial de todos los productos y sustancias tóxicas es que para producir consecuencias deben dispersarse, diluirse y reaccionar a través de un medio, lo que requiere que transcurra un tiempo y, en ocasiones, permite la aplicación de medidas de protección más fácilmente que para los fenómenos térmicos y mecánicos, aunque, por otra parte, en muchos casos, resulta muy difícil conocer el desplazamiento de los contaminantes, su evolución, así como eliminarlos totalmente del medio al que se han incorporado

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

3.2 Escenarios accidentales

La metodología para el análisis de consecuencias de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas se basan en modelos de cálculo reconocidos internacionalmente.

Los análisis de consecuencias deben estudiar los diferentes tipos de accidentes potenciales en instalaciones industriales que pueden producir fenómenos peligrosos para las personas, el medio ambiente y los bienes materiales. Estos tipos de accidentes potenciales se seleccionan a partir de un correcto análisis e identificación de riesgos. Son los siguientes:

- Fugas o derrames incontrolados de sustancias peligrosas: líquidos o gases en depósitos y conducciones
- Evaporación de líquidos derramados
- Dispersión de nubes de gases, vapores y aerosoles
- Incendios de charco o "Pool fire"
- Dardos de fuego o "Jet fire"
- Deflagraciones no confinadas de nubes de gases inflamables o "UVCE"
- Estallido de depósitos o "BLEVE"
- Explosiones físicas y/o químicas
- Vertido accidental al medio ambiente de sustancias contaminantes, procedente de fugas o derrames incontrolados

Normalmente, un accidente de estas características se produce a partir de algún suceso menor que trae como consecuencia la pérdida de estanqueidad de algún recipiente, depósito o tubería que contiene alguna sustancia, lo que produce la fuga o derrame de esta sustancia al exterior. También es posible un incendio previo o simultáneo a una fuga o incluso, una explosión previa a la fuga o al incendio. No obstante, en la mayoría de los casos el primer suceso consiste en una fuga incontrolada de producto.

Si se trata de algún líquido, se vaporiza total o parcialmente, según cuál sea su temperatura respecto a su punto de ebullición y ésta respecto al ambiente. En el caso de que reste alguna fracción en fase líquida, ésta se extiende al mismo tiempo que se evapora con más o menos intensidad según que su temperatura sea inferior o superior a la del sustrato sobre el que se extiende.

Si además el líquido es inflamable, existe la posibilidad de que, por encontrarse una fuente de ignición en las proximidades del punto de fuga, se produzca un incendio del charco. Si éste es de grandes proporciones, provoca un flujo de calor radiante peligroso hasta distancias apreciables. También se producen grandes cantidades de humo y productos tóxicos y contaminantes.

Si el incendio envuelve o rodea un depósito que contenga algún líquido inflamable bajo presión y dura el tiempo suficiente, puede ocasionar una explosión por expansión de vapor del líquido en ebullición, conocida como BLEVE según su acrónimo inglés. La rotura catastrófica de un depósito provocando la fuga masiva de una sustancia inflamable, puede originar lo que se denomina bola de fuego, en el caso de que se produzca la ignición de la misma. Por otra parte, una BLEVE genera una serie de proyectiles de todas dimensiones, procedentes del depósito siniestrado que pueden causar graves daños en el entorno si las distancias de seguridad son demasiado pequeñas o las protecciones inadecuadas.

Si el líquido que se derrama es tóxico, producto de su vaporización, puede generar una nube de características tóxicas para las personas que se encuentren en las proximidades del punto de fuga.

Cuando se trata de líquidos inflamables que se vaporizan o de fugas de gases más densos que el aire, la nube de gas se diluye en el aire existente, haciendo que en determinados instantes y zonas existan mezclas de combustible y comburente en condiciones de efectuar la combustión. Si en una de estas zonas se encuentra un punto de ignición puede desprenderse la cantidad de calor necesaria para acelerar la velocidad de combustión de forma que se produzca una explosión, denominada explosión de vapor no confinada o UVCE en su acrónimo inglés. También es posible si la cantidad premezclada es muy grande, que se produzca una llamarada o "flash fire", sin efectos explosivos, pero con una intensa radiación.

Si el gas fugado se halla a alta presión en depósitos o conducciones de gas (**gasoductos**) se produce un chorro o fuga inercial que ocupa una larga zona muy limitada transversalmente, con concentraciones de la sustancia progresivamente decrecientes al alejarse del origen de la fuga. En el caso de tratarse de gases inflamables, si se produce su ignición se forma un dardo de fuego o "jet fire" análogo a un soplete de grandes dimensiones, aunque de alcance limitado.

Un fallo estructural, fallo de cementación, agente externo, incendio, proyectil, etc. pueden causar una rotura catastrófica de un depósito, provocando una fuga masiva que, si se trata de una sustancia inflamable, puede originar también una bola de fuego caso de producirse la ignición de la misma.

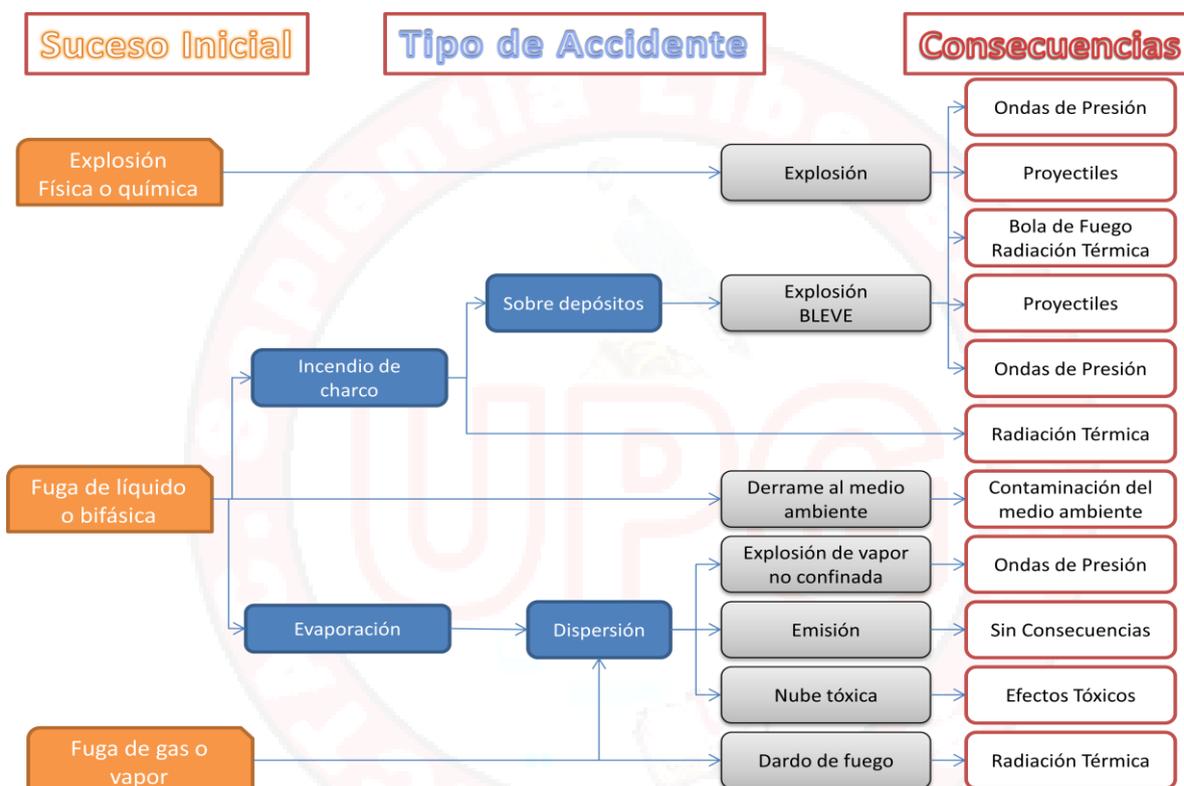
Además de todo esto, existe la posibilidad de que todos estos fenómenos afecten, además de a los elementos vulnerables exteriores, a otros depósitos, tuberías o equipos de la instalación siniestrada, de tal manera que se produzca una nueva fuga, incendio o explosión en otra instalación diferente de la inicial, aumentando las consecuencias del accidente primario. Esta concatenación de sucesos con la propagación sucesiva de consecuencias es lo que se denomina efecto dominó.

Un tipo de accidente que puede ser independiente de una fuga previa es el estallido de un depósito originado por el desarrollo de una reacción exotérmica fuera de control o "runaway" en el interior del mismo. Se pueden producir por mezclas inflamables vapor/aire por polimerización o descomposición de determinadas materias. Las consecuencias

inmediatas de un estallido de un recipiente son la formación de ondas de presión y proyectiles que pueden alcanzar a otras instalaciones y agravar el accidente inicial.

Otro suceso que hay que analizar es el vertido de sustancias peligrosas para el medio ambiente en medios acuáticos (ríos, lagos, canales, acuíferos, mar) o al suelo, generando graves daños al entorno inmediato o lejano y con posibilidad de afectar a un gran número de personas.

Todo este conjunto de accidentes posibles a partir de una fuga de gas o líquido se representa en el esquema de sucesos y consecuencias adjunto



Dependiendo del tipo de fenómeno peligroso principal que caracteriza el accidente, se pueden agrupar los escenarios de la manera siguiente:

- Escenarios de fenómenos peligrosos de tipo mecánico.
- Escenarios de fenómenos peligrosos de tipo térmico
- Escenarios de fenómenos peligrosos de tipo químico

3.2.1 Escenarios que determinan fenómenos peligrosos de tipo mecánico

Explosión (en general, sin especificar): Equilibrio en un breve período de tiempo de una masa de gases en expansión contra la atmósfera que la envuelve. Si la energía necesaria para la expansión de los gases procede de una reacción química, se dice que la

explosión es química; es el caso de las explosiones derivadas de fenómenos de combustión donde están involucrados gases inflamables, de explosiones derivadas de reacciones incontroladas y de explosiones asociadas a la ignición o descomposición de sustancias explosivas.

Pero si procede de la liberación repentina de un gas comprimido o de la expansión rápida de vapores, se trata de una explosión física (este último tipo de explosión se denomina estallido).

Explosión de una nube de vapor inflamable no confinada (UVCE, acrónimo de la expresión inglesa Unconfined Vapor Cloud Explosion): Tipo de explosión química que involucra una cantidad importante de gas o vapor en condiciones de inflamabilidad, que se dispersa por el ambiente exterior; para que esto ocurra, a grandes rasgos, la cantidad de gas tiene



que superar el valor de algunas toneladas. Cuando no es así, normalmente la ignición de la masa de vapor deriva en una llamarada sin efectos mecánicos importantes.

En general, este tipo de accidentes se asocia a situaciones que determinan el escape masivo de gases licuados, gases refrigerados y líquidos inflamables muy volátiles (con una intensa evaporación), ya que en estas circunstancias se pueden generar una gran cantidad de vapores inflamables en un breve período de tiempo.

Explosión de vapor confinado (CVE, acrónimo de la expresión Confined Vapor Explosion): Tipo de explosión química que involucra gases inflamables en condiciones de confinamiento (total o parcial); normalmente se asocia a explosiones derivadas de la combustión en recintos cerrados de vapor inflamable (naves industriales, salas de trascolamiento, cámaras de aire de depósitos, sistemas de drenaje contaminados por productos volátiles, etc.).

Estallido de contenedor a presión: Explosión física derivada de la rotura repentina de un recipiente a presión, causada por la presión interior y por un fallo de la resistencia mecánica del contenedor, que provoca una dispersión violenta del fluido interior, una onda de presión y proyectiles.

BLEVE. (acrónimo de la expresión inglesa Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion): Fenómeno de estallido normalmente asociado a la situación accidental de bola de fuego. Este fenómeno puede suceder también con sustancias licuadas a presión y no inflamables cuando, en determinadas



situaciones de presión y temperatura, el recipiente que las contiene se rompe repentinamente y si está asociado al fenómeno de bola de fuego, el alcance de la magnitud física peligrosa, que caracteriza el efecto mecánico (sobrepresión), suele ser inferior al alcance de la radiación; de ahí que la planificación de emergencias sólo se realice teniendo en cuenta los daños de este último fenómeno.

3.2.2 Escenarios que determinan fenómenos peligrosos de tipo térmico

Incendio de charco (pool fire): Combustión estacionaria con llama de difusión del líquido de un charco de dimensiones conocidas (extensión), que se produce en un recinto descubierto.

Dardo de fuego (jet fire): Llama estacionaria y alargada (de gran longitud y poca amplitud) provocada por la ignición de un chorro turbulento de gases o vapores combustibles. Un ejemplo típico es el soplete

Llamarada (flash fire): Llama progresiva de difusión, de baja velocidad. No produce ondas



de presión significativas. Suele estar asociada a la dispersión de vapores inflamables a ras de suelo. Cuando éstos encuentran un punto de ignición, el frente de la llama generado se propaga hasta el punto de emisión, barriando y quemando toda la zona ocupada por los vapores en condiciones de inflamabilidad. Si el origen de los vapores es un vertido con evaporación, el fenómeno acaba en

un incendio de charco

Bola de fuego (Fire Ball): Este escenario se refiere a la bola de fuego (fireball) que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado a presión, cuando el material de la pared pierde resistencia mecánica y no puede resistir la presión interior. El calentamiento extremo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, y la probabilidad de que estalle es especialmente elevada en los casos en los que hay un contacto directo de la llama con la superficie del recipiente



3.2.3 Escenarios que determinan fenómenos peligrosos de tipo químico

Son escenarios que determinan fenómenos peligrosos asociados a la concentración de una sustancia emitida al ambiente por un escape de un producto tóxico o inflamable en forma gaseosa, o bien en forma líquida en condiciones de ser vaporizado, produce una nube de gas. Esta nube, según sea la velocidad de salida del producto, se comporta como:

Chorro gaseoso (turbulent free jet): en este caso, la dispersión del producto depende de la velocidad y de la presión de salida. Cuando el gas o vapor está suficientemente diluido y su velocidad es menor que la velocidad del viento, se dispersará a corta distancia en función de las condiciones meteorológicas.

Dispersión atmosférica: la nube, en función de las condiciones meteorológicas, se extiende y se desplaza mientras se va diluyendo. Las áreas de terreno que quedan bajo el efecto de esta nube sufrirán las consecuencias del producto contaminante.

Según la evolución del fenómeno en el tiempo, las emisiones pueden clasificarse en:

- Instantáneas (soplo), continuas (emisiones prolongadas en el tiempo) y en régimen
- Transitorio (emisiones limitadas en el tiempo y a menudo de caudal variable).

Según la densidad del producto, la dispersión puede ser neutra o gaussiana (gases o vapores con densidad similar a la del aire), o de gases pesados (productos más densos que el aire, de manera que la gravedad ejerce una influencia significativa en la evolución de la nube).

3.3 Teoría del fuego

Se llama fuego al conjunto de partículas o moléculas incandescentes de materia combustible, capaces de emitir luz visible, producto de una reacción química de oxidación violenta. Las llamas son las partes del fuego que emiten luz visible, mientras que el humo son físicamente las mismas pero que ya no la emiten.

Para poder tener una comprensión en conjunto de los diferentes factores que pueden afectar a una instalación se realiza una exposición de las principales características del fuego,

En el estudio de las características del fuego, para su aplicación al incendio, es importante conocer los mecanismos que lo originan, que lo mantienen, así como los que lo transmiten.



3.3.1 Incendios

El incendio representa una manifestación no deseada del fuego que se desarrolla sin control en el tiempo y en un momento y lugar imprevisto, provocando daños y pérdidas.

El fuego puede ser definido como un fenómeno de reacciones químicas de oxidación reducción con un elevado potencial exotérmico.

Este tipo de reacciones de oxidación reducción, implica una pérdida o ganancia de electrones, el intercambio, necesita un consumo de energía que al ser cedida al entorno, recibe el nombre de reacción exotérmica.

Los efectos de los incendios pueden resultar devastadores y ser incontrolados, por lo que la predicción de los efectos de un incendio es muy importante, tanto en lo que atañe al establecimiento de distancias de seguridad, como en la determinación de los caudales de refrigeración.

3.3.2 Fuentes de ignición

Combustible es cualquier sustancia que, en presencia del oxígeno y aportándole una cierta energía de activación, es capaz de arder. El comburente es el elemento en cuya presencia el combustible puede arder. Se considera el oxígeno como el comburente típico. Y la energía de activación, es la energía mínima que necesitan el combustible y el comburente para que se inicie la reacción. Esta energía se aporta en forma de calor.

Los focos de ignición son aquellos que aportan la energía de activación necesaria. Estos pueden ser:

- Focos térmicos, (cigarrillos, cerillas, soldadura, hornos, calderas), proceden de focos caloríficos de elevadas temperaturas.
- Focos eléctricos, (sobrecargas, chispas, cortocircuitos, cargas electrostáticas, rayos,)
- Focos mecánicos, (herramientas manuales, roces mecánicos), proceden del roce entre materiales
- Focos químicos, (reacciones exotérmicas), son todas aquellas que se producen a consecuencia del contacto con sustancias reactivas o que desencadenan reacciones exotérmicas.
- Otros tipos focos: Son menos comunes, pero pueden originar de igual manera la ignición de una mezcla. Entre ellos podemos destacar: las radiaciones ionizantes, corrientes parásitas, corriente debida a la protección catódica, Ondas electromagnéticas, los ultrasonidos.

La energía de activación varía en función de los siguientes parámetros: la mezcla del producto inflamable, la concentración, la presión y la temperatura.

En ocasiones se necesita una energía de activación muy pequeña para que se produzca la ignición.

3.3.3 Triángulo del fuego

Para que exista una combustión es necesario que se encuentren presentes tres elementos: oxígeno (comburente), calor y combustible. Se representa gráficamente por un triángulo, en el que cada uno de sus lados corresponde con uno de los elementos. Si alguno de estos lados no está presente, la combustión no se produce.

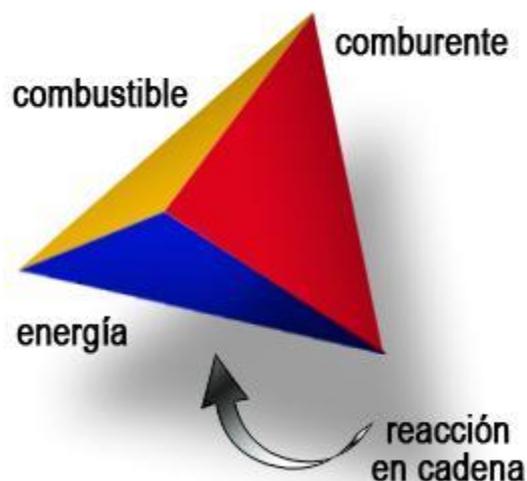
Debido a fenómenos dentro de la llama, que no se correspondían con esta similitud, se introdujo el siguiente



concepto.

3.3.4 Tetraedro del fuego

El proceso se compara con un tetraedro, al introducir un nuevo elemento, la reacción en cadena. De modo que cada una de las caras que forman el tetraedro son: Oxígeno (comburente), calor, combustible y reacción en cadena. Al igual que en el triángulo del fuego, en el tetraedro del fuego al suprimir uno de los componentes, deja incompleto el mismo y por tanto no se produce el fuego.



3.3.5 Relación comburente combustible

Solamente los gases como tales y los vapores procedentes de los procesos de fusión y o vaporización pueden desarrollar el fuego.

Para llegar a la posibilidad del inicio del fuego se ha necesitado otro factor fundamental, la energía.

3.3.6 Relación combustible energía

La relación entre oxidante y reductor solo se logra mediante el aporte de una energía necesaria que aumenta la rapidez del proceso, así, los sólidos requieren un mayor aporte de energía durante un tiempo más prolongado, mientras que en los líquidos, este tiempo y energía es mucho menor. En los gases, solo se requiere de la energía necesaria que active el proceso del fuego.

3.3.7 Temperatura de flash

Es la mínima temperatura a la que un combustible emite vapores susceptibles de mezclarse con un comburente en cantidad suficiente para que ante una energía de activación pueda producirse una combustión de dichos vapores, pero sin un proceso de continuidad.

3.3.8 Temperatura de encendido

La temperatura de autoencendido es una temperatura de escala superior a la de flash. Una vez alcanzada esta temperatura y una vez iniciada la ignición, la velocidad de aporte de los vapores emitidos es suficiente como para mantener la llama.

La temperatura de encendido representa la continuidad del fuego, ya que aún siendo interrumpida la energía de activación, la propia continuidad de la llama durante el aporte de gas o vapor, incrementa la propia temperatura y la del ambiente por su característica exotérmica. Esa continuidad solo se romperá cuando falte el combustible o el comburente.

3.3.9 Temperatura de autoencendido

Son temperaturas situadas entre los 200 y los 500 °C y concretas para cada combustible. Una vez alcanzada esta temperatura, el combustible se auto enciende sin necesidad de la presencia o el aporte de energía adicional.

3.3.10 Igniciones espontaneas

En unas condiciones determinadas de temperatura anormalmente alta, escasa ventilación y materiales combustibles en estados especiales, se puede originar un fenómeno de descomposición química oxidoreductor que finalizará con el resultado de un incendio.

3.3.11 Límites de explosividad

Los vapores de líquidos y gases combustibles tienen unos límites de mezcla que acotan las concentraciones mínima y máxima de su fase de combustible con el complemento de la mezcla, para alcanzar el 100% de la mezcla, así, el límite inferior de explosividad (LIE), es el valor mínimo de mezcla combustible comburente, por debajo del cual la concentración de vapor o gas combustible es insuficiente para crear una mezcla inflamable con el comburente.

El límite superior de explosividad (LSE) indica el valor máximo de concentración, superado el cual el vapor o gas deja insuficiente porcentaje de comburente de la mezcla inicialmente inflamable.

3.3.12 Mecanismos de transmisión del calor

La transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente a la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado del segundo principio de la termodinámica.



Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida; solo puede hacerse más lenta.

Los modos de transferencia son diferentes procesos de transporte de calor, usualmente se agrupan en tres tipos según haya también transferencia o no transferencia de materia (o fotones) como los siguientes :

Conducción: Es la transferencia de calor que se produce a través de un medio estacionario -que puede ser un sólido- cuando existe una diferencia de temperatura.

Convección: Se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido, por ejemplo: al trasegar el fluido por medio de bombas o al calentar agua en una cacerola, la que está en contacto con

la parte de abajo de la cacerola se mueve hacia arriba, mientras que el agua que está en la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la cacerola caliente.

Radiación: se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. En ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas, debido a que todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas.

3.3.13 Clases de fuego

La norma UNE EN 2:1994 y 2005 establece un total de cinco las clases de fuego, siendo:

Clase "A": Son los fuegos que involucran a los materiales orgánicos sólidos, en los que pueden formarse, brasas, por ejemplo, la madera, el papel, cartón, pajas, carbones, textiles, etc.



Se ha normalizado como simbología a utilizar un triángulo de fondo color verde en cuyo interior se coloca la letra A.

Clase "B": Son los fuegos que involucran a líquidos inflamables y sólidos fácilmente fundibles por acción del calor (sólidos licuables). Dentro de estos podemos encontrar a todos los hidrocarburos, alcoholes, parafina, cera, etc.



Se ha normalizado como simbología a utilizar un cuadrado de color rojo en cuyo interior se coloca la letra B.

Clase "C": Son los fuegos que involucran a los equipos eléctricos energizados, tales como los electrodomésticos, los interruptores, cajas de fusibles y las herramientas eléctricas, etc.



Se lo simboliza con un círculo de fondo color azul en cuyo interior se coloca la letra C.

Clase "D": Son fuegos deflagrantes, en metales alcalinos y alcalinos térreos, como así también polvos metálicos; combustionan violentamente y generalmente con llama muy intensa, emiten una fuerte radiación calórica y desarrollan muy altas temperaturas.



Sobre este tipo de fuegos NO se debe utilizar agua, ya que esta reaccionaría violentamente. Se hallan dentro de este tipo de fuegos el magnesio, el sodio, el potasio, el titanio, el circonio, polvo de aluminio, etc.

Se simboliza con una estrella de cinco puntas de fondo color amarillo en cuyo interior se coloca la letra D.

Fuegos Clase K A raíz de haberse observado una gran dificultad en la extinción de



Son fuegos que involucran Aceites de Cocina tales como Aceites Vegetales, Aceites Animales, Grasas Etc. Su Característica General es que arden a temperaturas Elevadas.
Su Símbolo es una letra K sobre un Hexágono

incendios en freidoras industriales, se hizo esta clasificación particular para este tipo de fuegos. Se lo denominó entonces Fuego K (por la inicial del vocablo inglés Kitchen que significa cocina).

Asimismo, existe otro tipo de clasificación del fuego, en función de donde se desarrolle, éste puede ser:

- Interior: Son aquellos fuegos que tienen lugar en el interior de los edificios, sin haber llegado a manifestarse en el exterior. Debido a que el fuego se está desarrollando en combustión incompleta por la falta de oxígeno, debe de ponerse especial cuidado en no aportar comburente durante su extinción.
- Exterior: Son aquellos fuegos que presentan una manifestación visible de llamas al exterior.

3.4 Mecanismos de las explosiones

Una explosión puede definirse como la generación de una onda de presión en el aire como consecuencia de la liberación de energía extremadamente rápida. Dentro de esta definición tan amplia tienen cabida diversos fenómenos físicos y químicos que, con cierta probabilidad, pueden presentarse en la industria que procesa o utiliza sustancias peligrosas (IChemE, 1994). En estas industrias las explosiones representan, junto con los incendios, los accidentes más frecuentes y destructivos (Contini, 1993), destacando las dedicadas a la fabricación de explosivos o materiales pirotécnicos, las que utilizan gases inflamables o las instalaciones que, sin haber sustancias capaces de provocar una explosión por sí mismas, disponen de recipientes donde pueden generarse elevadas presiones que al provocar su estallido liberan la energía contenida de forma violenta

Una característica especial de las explosiones que las diferencia de los demás accidentes típicos de las industrias que utilizan sustancias peligrosas es la corta duración del fenómeno, lo que impide la aplicación de medidas de mitigación que sí pueden ser empleadas frente a otros tipos de accidentes, como los grandes incendios y las fugas tóxicas. Así pues, la única forma de actuar contra las explosiones es mediante la prevención. La planificación de la emergencia comienza evaluando el posible alcance de las magnitudes peligrosas de la explosión (presión máxima, impulso mecánico y alcance de los fragmentos) y, a continuación, el nivel de gravedad encontrado debe relacionarse con las medidas de prevención que el industrial debe incorporar.

3.4.1 Características generales

La energía liberada por un explosivo depende de sus propiedades termoquímicas. Como regla general, un gramo de material explosivo genera aproximadamente un litro de gases y libera una kilocaloría en forma de calor de reacción. El que este volumen y energía liberados formen o no una onda de presión apreciable depende principalmente de la velocidad de reacción con la que transcurra el proceso.

Las transformaciones químicas que experimenta un producto cuando explota, son siempre reacciones de oxidación-reducción, que pueden ser de autodescomposición, si el aporte de oxidante de la propia sustancia es suficiente, o bien ocurrir entre oxidantes y reductores que constituyan sustancias diferentes que se encuentran formando mezclas. En general, para que se inicie una reacción de este tipo no es necesaria una energía de activación elevada y una vez desencadenada el calor liberado es suficiente para que ésta se automantenga.

Las sustancias explosivas tienen menores calores de combustión por unidad de masa que los combustibles comunes. Esto se explica porque las primeras contienen grupos oxidantes en su molécula -que no contribuyen al calor de combustión-, mientras que los combustibles convencionales no, ya que necesitan reaccionar con el oxígeno del aire. Pero si se compara el calor de combustión por unidad de masa de explosivo con el calor de combustión por unidad de masa de una mezcla estequiométrica de combustible y oxígeno, la diferencia es pequeña. Así, la detonación de 1 gramo de nitroglicerina produce 2.5 kcal y la combustión de la mezcla estequiométrica carbón-oxígeno genera 2.2 kcal/g.

3.4.2 Deflagración y detonación

El calentamiento de un explosivo puede provocar el inicio de una reacción exotérmica (combustión o descomposición, por ejemplo) y el calor resultante puede producir el aumento de la velocidad de reacción y conducir, en los primeros instantes, a una reacción autosostenida conocida como deflagración. Bajo ciertas condiciones, el frente de reacción deflagrante inicial puede alcanzar velocidad supersónica, transformándose en una onda detonante. En éste, la onda de presión se propaga a una velocidad característica a temperaturas y presiones muy elevadas hacia el explosivo sin reaccionar (Mohanty, B. 1998).

La diferencia principal entre el mecanismo de la reacción deflagrante y la detonante consiste en que en esta última la sobrepresión y temperatura generadas por la onda son capaces de producir la descomposición de los reactivos en un tiempo muy pequeño (casi instantáneo), mientras que en la deflagración el fenómeno es más lento, ya que los reactivos se activan mediante el calor liberado en la reacción, que tarda más tiempo en llegar a ellos, debido a la menor velocidad de los mecanismos de transporte.

Así, una visión más ampliada del proceso por el que la deflagración se transforma en detonación sugiere que se inicia mediante una "combustión" lenta de la masa explosiva. El calor producido por la reacción alcanza por conducción a los reactivos, que aumentan de temperatura. Este proceso se acelera cuando el calor comienza a penetrar por los poros del explosivo de forma convectiva, con lo que el transporte se vuelve turbulento, incrementando la velocidad de avance del frente de reacción, manteniendo y aumentando la onda de presión. En los explosivos confinados, la onda inicial producida se refleja al alcanzar las paredes del contenedor y regresa, impactando contra el frente de reacción, provocando un aumento de la presión y de la temperatura, lo que hace que se alcance la autoignición de los reactivos aún no combustionados de forma muy rápida, iniciando la detonación. A partir de ese momento, la velocidad de reacción está controlada por la velocidad de propagación de la onda, y no por los fenómenos de transporte de calor, de tal manera que dicha velocidad permanece estable y constante, y está gobernada por las propiedades físicas y químicas del explosivo, las dimensiones del contenedor, su grado de confinamiento y, sobre todo, por su densidad (Kirk, R. E.; Othmer, F., 2001). Esta última propiedad, que se denomina densidad de carga, puede variar en un amplio rango; así, la velocidad del frente de reacción puede alcanzar valores desde aproximadamente 1200 m/s para explosivos de baja densidad, hasta más de 9000 m/s para explosivos con densidades próximas a 2 g/cm³. En cualquier caso, para las

densidades normales de la mayoría de los explosivos, la velocidad del frente de reacción no excede de 4000 m/s (Medard, L.A., 1989).

La figura ayuda a comprender el proceso detonante, basado en la teoría de Chapman-Jouguet modificada -Coon et al. (1980) y Medard, L.A (1989)-. En ella se supone que el contenedor aún no ha estallado, distinguiéndose las siguientes zonas (Mohanty, B, 1998):

1. Productos de reacción donde predominan las sustancias gaseosas formadas a partir del explosivo sólido o líquido lo que origina presiones y temperaturas muy elevadas.
2. Reacción. Separada de la anterior por el “plano de Chapman-Jouguet (C-J)”. En ella se produce la descomposición (proceso redox). Esta zona tiene un espesor aproximado de 1 mm para la mayoría de los explosivos, pero puede alcanzar más de 10 mm para los menos inestables (Stull, D.R,1976).
3. Frente de onda. Las dos zonas anteriores forman un “pistón” cuyo “émbolo” es la onda de presión que puede alcanzar velocidades muy elevadas, antes indicadas. Cuando se alcanza el equilibrio los frentes de reacción y la onda de presión coinciden y viajan a la misma velocidad.
4. La última zona está constituida por los productos aún sin reaccionar.

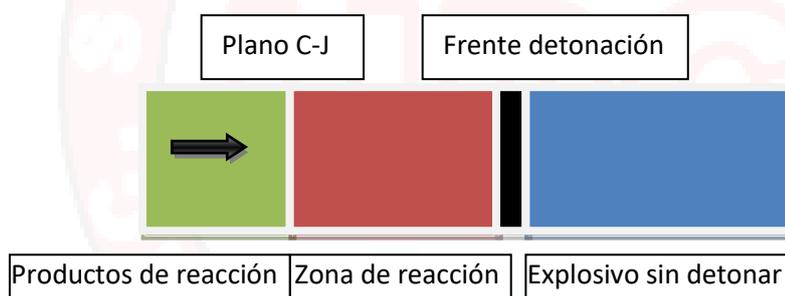


FIGURA. Esquema simplificado del proceso de detonación de un explosivo

Todo este proceso se produce en periodos de tiempo muy pequeños, por lo que la potencia desarrollada es muy elevada, rompiendo el contenedor y provocando la brusca expansión de los gases. Una parte de la energía se invierte en formar la onda de presión y la otra es fundamentalmente térmica.

El mismo compuesto o mezcla puede detonar o no, dependiendo del tipo e intensidad de la fuente de energía que produce la ignición, del grado de confinamiento, de las características físicas del material explosivo y la geometría del contenedor. Muchos explosivos detonantes, pueden arder (sin detonar) bajo condiciones especiales que eviten la formación de la onda de presión iniciadora del proceso de detonación (Kirk, R. E.; Othmer, F., 2001). Así, se ha observado que el TNT puede arder sin explotar, y el nitrato amónico (con poder explosivo mucho menor) puede detonar si se encuentra confinado

3.5 Estallido de recipientes

Las causas por las que se puede producir la rotura de un recipiente son diversas: por debilidad estructural (corrosión, erosión, fatiga, defectos de los materiales), por impactos externos, por aumento de la presión debido a diferentes causas (sobrellenado, reacción fuera de control, explosión interna...) o por combinación de los anteriores fenómenos. Así, el recalentamiento por un incendio externo produciría conjuntamente el incremento de la presión interior del recipiente y el debilitamiento y fallo de los materiales que lo constituyen.

En definitiva, el estallido puede producirse a la presión normal de operación o como consecuencia del aumento de ésta. En este último caso, es sabido que los recipientes a presión poseen dispositivos de seguridad que permiten aliviar la presión interna si ésta supera ciertos límites. La explosión ocurre cuando los sistemas de alivio no son capaces de compensar el aumento de presión o cuando dichos sistemas fallan.

En el momento del estallido la energía del fluido se invertirá en la formación de proyectiles y de una onda de presión. Además, puede producirse otra serie de consecuencias asociadas; así, la fuga de estos productos puede dar lugar a una bola de fuego, una explosión de nube de vapor, un incendio flash o a la formación de una nube tóxica. Que ocurran estas consecuencias dependerá de las características inflamables y tóxicas de los productos contenidos o generados en la combustión y de las circunstancias de cada accidente. Estos efectos asociados al estallido de los recipientes no se contemplan en el presente estudio.

El nivel de la onda de presión y el alcance de los proyectiles formados dependerán de la energía interna del fluido contenido en el recipiente y de cómo ésta se transforma en energía mecánica. La energía interna disponible dependerá de las propiedades termodinámicas y de la cantidad de producto involucrado. Los valores de las magnitudes termodinámicas dependen de las condiciones en las que se encuentre el producto en el momento del estallido, lo que a su vez se relaciona con las circunstancias propias del accidente.

El origen de la energía responsable de la rotura del recipiente puede ser físico o químico (TNO, 1997). En el primero, la energía de la explosión se debe a la expansión de un gas comprimido o a la vaporización instantánea de un líquido (BLEVE). En cuanto al segundo grupo, la energía liberada puede proceder de una reacción fuera de control, de la explosión interna de una sustancia explosiva o de una atmósfera inflamable

3.5.1 Explosiones de origen físico

Expansión de un gas comprimido:

Cuando el recipiente que contiene un gas presurizado explota, la única fuente de energía disponible para la fragmentación y la generación de la onda de presión es la expansión de ese gas. La energía liberada dependerá, por tanto, de las condiciones de almacenamiento, fundamentalmente de la presión y cantidad de sustancia involucrada.

BLEVE:

Una BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) es la explosión de un recipiente que contiene un líquido que se encuentra por encima de su punto de ebullición normal. Cuando el recipiente se rompe, el líquido se vaporiza súbitamente, pasando gran cantidad al estado gaseoso, expandiendo el líquido en ebullición y originando una onda de presión.

Según Venart et. al. (1993), la vaporización puede producirse de forma extremadamente rápida mediante un fenómeno en el que se forman burbujas microscópicas de vapor que crecen en torno a puntos de nucleación tales como impurezas, cristales o iones. Una gran parte del líquido puede vaporizarse en milésimas de segundo, dando lugar a una onda de presión que supera la resistencia del equipo, fenómeno que ha sido denominado BLCBE (Boiling Liquid Compressed Bubble Explosion). Junto al líquido que se vaporiza y que contribuye en gran parte a la formación de la onda de sobrepresión, no hay que olvidar la expansión de la fracción gaseosa presente en el recipiente en el momento del estallido, y que también aporta una cantidad importante de energía a la explosión.

Si el producto implicado es inflamable y durante el suceso alcanza una fuente de ignición, se formará un bola de fuego, produciéndose una elevada emisión de radiación térmica. Es frecuente que el fenómeno BLEVE vaya asociado a una bola de fuego, dado que la causa inicial más frecuente es la acción de un incendio externo (González Ferradás et al., 2002).

En las explosiones BLEVE de tanques cilíndricos horizontales, los fragmentos pueden alcanzar distancias considerables.

Transición rápida de fase:

Aunque este fenómeno no ocurre exclusivamente en el interior de recipientes, se ha incluido en esta sección, ya que es frecuente que así suceda.

La transición rápida de fase puede ocurrir cuando dos líquidos con temperaturas de ebullición muy diferentes entran en contacto. Si se trata de un líquido caliente y de alto punto de ebullición que contacta con uno frío de bajo punto de ebullición, se produce un rápido cambio de fase en este último, produciendo una expansión volumétrica que genera una onda que impulsa a la mezcla, esparciéndola fuera del recipiente.

La onda de sobrepresión que puede originar la transición rápida de fase está limitada por la energía puesta en juego en la vaporización. Sólo una pequeña fracción de la energía de cambio de estado es transferida a la onda, de manera que en términos energéticos una transición rápida de fase es mucho menos eficiente que un explosivo en la generación de ondas de presión.

Este fenómeno es un caso poco frecuente de explosión en la industria, ya que solamente ocurre en condiciones especiales

3.5.2 Explosiones de origen químico

Una reacción química supone al menos a dos productos que reaccionan entre sí. Si como resultado de esta reacción se generan gases y calor que se almacenan en el recipiente en donde se está produciendo dicha reacción, la presión aumenta, el recipiente se debilita, se rompe por su punto más débil y se produce la explosión por liberación súbita de gas a alta presión en el ambiente.

Todas las explosiones por reacciones químicas se producen de la misma manera, cambia el tipo de proceso, la velocidad con que se producen, la gravedad de las mismas, etc.; pero en el fondo son todas iguales.

Reacciones fuera de control:

Una reacción fuera de control se produce cuando se forman productos distintos a los esperados debido a contaminación de los reactivos, fallos en el control de temperatura, error de carga de materias primas, etc. La explosión se produce cuando el calor se libera más rápidamente de lo que los sistemas de refrigeración pueden absorber y generalmente producen un crecimiento exponencial de la temperatura que lleva asociada una fuerte elevación de la presión. Para evitarlo se usan sistemas de amortiguación, enfriamiento rápido o alivio, tales como discos de ruptura o válvulas de seguridad; en el caso de que estos sistemas fallen, o no sean capaces de despresurizar el recipiente a la velocidad adecuada, se produce la explosión.

Descomposición de un material energético:

La descomposición de una sustancia en el interior de un recipiente puede dar lugar al estallido del mismo. Se trata de sustancias que se descomponen con formación de productos gaseosos, como explosivos sólidos y otras sustancias en fase líquida y gaseosa que contienen grupos especialmente inestables (compuestos azo, diazo, diáceno, compuestos de diazonio, nitrocompuestos, nitratos/nitritos de alquilo/acilo, moléculas con enlaces peróxido, epóxidos, derivados del acetileno, fulminatos metálicos, etc. (Santamaría et al. (1999)). El comportamiento y las consecuencias son más parecidos a las de la detonación de un explosivo que a las típicas del estallido de un recipiente.

Explosión interna de atmósferas inflamables:

Los tipos de atmósferas inflamables que potencialmente pueden dar lugar a explosiones son tres: mezclas de aire y gases combustibles, aire cargado de polvo de un material combustible y aire que contiene un aerosol de un líquido inflamable.

Las explosiones de polvo ocurren en la mayoría de los casos en espacios muy confinados, tales como silos o depósitos, siendo frecuente la participación de cereales y derivados o sustancias inestables. El fenómeno de la generación de la onda de presión es un proceso progresivo, que comienza con la ignición y combustión lenta de la mezcla. En el momento de la ignición, el avance del frente de llama es laminar, pero a medida que la combustión continúa, el avance se acelera favorecido por la turbulencia creada por la expansión de los gases generados (Proust, 1996 y Vogl, 1995). A medida que la velocidad del frente de llama aumenta, la sobrepresión producida va creciendo, hasta que llega un momento en el que la presión permite la autoignición de la mezcla que está inmediatamente por

delante del frente de avance de la explosión. En este momento se produce la transición de la deflagración a la detonación, que proseguirá por el recipiente o conducto hasta encontrar un punto de liberación al exterior, normalmente una válvula de seguridad o un disco de ruptura, o bien produce el estallido del contenedor.

Las explosiones de aerosoles son menos frecuentes y menos estudiadas que las de gases y polvo (IChemE, 1994). La circunstancia que hace menos probable las explosiones de aerosoles es la dificultad para la formación y mantenimiento de éstos. Las partículas de aerosol siempre estarán acompañadas de la fase vaporizada en equilibrio con el líquido; en este sentido, la mezcla puede considerarse como una nube de vapor con las características especiales que le confiere la presencia de partículas líquidas. Kopyt et al. (1989) indican que en las nubes de aerosoles, la elevada velocidad de avance del frente de llama es debida a una combinación de factores tales como la turbulencia, la heterogeneidad, la alta densidad de la mezcla combustible y el precalentamiento de las gotículas por radiación térmica

Hay dos tipos de reacciones químicas:

- Reacciones uniformes: la reacción química se produce al mismo tiempo en toda la masa reactiva. NO es una reacción instantánea.
- Reacciones de propagación: la reacción química se inicia en un punto de la masa reactiva y desde él avanza (se propaga) sobre el resto.

3.5.3 Reacciones Uniformes

Las reacciones uniformes son aquellas donde los reactivos reaccionan en toda su masa al mismo tiempo, pero no es forma instantánea. Por lo general este tipo de reacción lleva un tiempo de producción determinado, durante el cual, toda la masa de los reactivos está reaccionando.

Este tipo de reacciones no se desarrolla como si fuera una reacción del tipo de combustión, no existe llama, los reactivos no se “queman”, es una reacción química pura, es pura química.

Estas reacciones no son accidentales, son parte del proceso de producción que por algún motivo salió de control.

La reacción puede consistir en una combinación o en una descomposición de reactivos. Una reacción uniforme es exotérmica, es decir, que genera calor. Las reacciones uniformes se desarrollan, habitualmente, dentro de un contenedor y el calor generado se disipa en el ambiente a través de sus paredes. Las reacciones uniformes son habituales en procesos químicos tales como nitración, polimerización, diazotación, descomposición y condensación.

La velocidad de una reacción uniforme sólo depende de la temperatura y concentración de los agentes de la reacción y se mantiene constante en toda la masa reactiva.

A medida que aumenta la temperatura de la masa, la reacción se acelera y finalmente alcanza el punto de autocalentamiento, en el que el calor generado supera al disipado

al ambiente por la masa (en la mayoría de los casos, las paredes de un contenedor). Puesto que se genera calor en toda la masa reactiva, pero se disipa más lentamente desde el centro que desde la superficie exterior, el centro se calienta más y aumenta su velocidad de reacción.

Esta aceleración de la reacción en la zona central continúa, hasta que el reactivo en dicha zona se consume totalmente o hasta que el centro erupciona para disipar su elevada temperatura.

Se producen reacciones uniformes en sólidos, líquidos y gases. Los gases experimentan con rapidez fenómenos de convección y difusión; de forma que el gas más caliente se desplaza rápidamente del centro a la periferia, donde el calor se disipa más fácilmente. Los líquidos se ven sometidos al mismo proceso, aunque se desplazan a menor velocidad que los gases. Los sólidos sólo transmiten calor por conducción y su velocidad de generación de calor por unidad de volumen, al igual que en los líquidos, es mayor que en los gases. En general, los sólidos presentan el mayor problema de transmisión de calor. Sin embargo, puesto que las mezclas de sólidos sólo reaccionan en los puntos de contacto entre los agentes reactivos, la mayoría de las reacciones uniformes en sólidos se producen por descomposición de compuestos y no por mezcla.

3.5.3.1 Velocidad de la Reacción

La velocidad de la mayor parte de las reacciones uniformes es una función exponencial de la temperatura de la masa.

La relación entre el calor generado por la reacción y el calor en el ambiente determina si la temperatura de la masa y, con ella, la velocidad de la reacción, se mantiene constante (cuando el calor generado es igual al disipado), disminuyendo (cuando el calor generado es inferior al disipado) o se aceleran (cuando el calor generado es superior al disipado).



Las reacciones uniformes pueden seguir dos tipos de desarrollo, de acuerdo con la temperatura de la masa y la velocidad de la reacción:

- Un desarrollo de baja temperatura, correspondiente a la parte de baja de la curva exponencial. En este tramo, el calor generado puede disiparse fácilmente en el ambiente. La velocidad de la reacción es baja, se eleva relativamente poco con la temperatura y su control es sencillo.
- Un desarrollo de alta temperatura, correspondiente a la parte alta de la curva exponencial. En este tramo, la disipación del calor generado es más difícil. La velocidad de la reacción es alta. Se eleva rápidamente con la temperatura y su control es complicado.

3.5.3.2 Reacciones Controladas

En una reacción uniforme controlada, tal como se desarrolla habitualmente en un proceso industrial, la velocidad de la reacción es constante y uniforme en toda la masa reactiva. Esto quiere decir que la temperatura de la masa se mantiene constante, por lo cual es necesario que el calor generado por la reacción se disipe totalmente en el ambiente.

La mayoría de las reacciones uniformes controladas se inician lentamente, con una subida gradual de la temperatura de la masa y de la velocidad de la reacción. Después de esta suave aceleración inicial, se estabilizan en la parte de la curva exponencial correspondiente al desarrollo de baja temperatura

3.5.3.3 Reacciones Incontroladas

Si por cualquier circunstancia la masa reactiva acumula calor o cualquier factor externo aumentase la velocidad de la reacción, ésta podría acelerarse hasta entrar en la parte alta

de la curva exponencial, correspondiente al desarrollo de alta temperatura. En estas condiciones, la disipación de calor es más difícil y si ésta no se consigue, la reacción sigue acelerándose, transformándose en una reacción incontrolada

3.5.3.4 Núcleo Caliente

Las reacciones uniformes generan calor en toda la masa reactiva. Una reacción uniforme acelerada genera más calor del que disipa. Pero el calor generado en el centro se disipa más lentamente que el generado en la periferia. Así que el centro se calienta más y su velocidad de reacción se acelera más que en el resto de la masa reactiva. Como consecuencia, en el centro de la masa reactiva de una reacción uniforme acelerada, se forma un núcleo caliente.

La acumulación de calor en el núcleo favorece el aumento de la temperatura de la masa y de la velocidad de la reacción.

La transmisión de calor del núcleo a la periferia favorece el mantenimiento o el descenso de la temperatura de la masa y de la velocidad de la reacción

3.5.3.5 Disipación de Calor

Hay tres factores que tienen una gran influencia en el calor disipado:

- La transmisión de calor dentro de la mezcla. Esta depende, en gran medida, del estado de agregación de los reactivos.
- El grado de confinamiento de la mezcla. El confinamiento no depende exclusivamente de un recipiente, sino que puede ser producido por la inercia de una gran masa reactiva sobre sí misma.
- La forma y la conductividad térmica del recipiente.

3.5.3.6 Influencia del Estado de Agregación de los Reactivos

El estado de los reactivos influye en el calor generado y en la transmisión de calor y, por lo tanto, en la velocidad de la reacción.

Los reactivos gaseosos son los que generan la menor cantidad de calor por unidad de volumen. Además, los gases se desplazan rápidamente por convección y dispersión, de manera que los gases más calientes viajan del centro a la periferia, donde su calor se disipa más fácilmente. Por tanto, las reacciones uniformes de gases son las que más fácilmente disipan el calor generado.

Los reactivos líquidos homogéneos (un líquido, una mezcla homogénea de líquidos o una disolución) generan más cantidad de calor, por unidad de volumen, que los gases. Los líquidos también se desplazan por dispersión y convección, aunque más lentamente que los gases.

Las mezclas de líquidos que constituyen dos fases diferenciadas y los líquidos que contienen sólidos sin disolver sólo reaccionan en la superficie de contacto. La velocidad de la reacción depende del área superficial de las partículas en contacto en las que tiene lugar la reacción. Si se agita la masa, se producen dos efectos contrapuestos:

- Por una parte, la agitación mejora la transmisión de calor desde el centro, lo cual tiende a disminuir la velocidad de la reacción.
- Por otra parte, la agitación pone en contacto materiales sin reaccionar, lo que puede acelerar la velocidad de la reacción.

Las mezclas de sólidos sólo reaccionan en la superficie de contacto entre los agentes reactivos, lo que hace difícil una reacción uniforme. Por ello, la mayoría de las reacciones uniformes de sólidos se producen por descomposición y no por combinación. La velocidad de generación de calor por unidad de volumen es mucho mayor que en los gases. Los sólidos sólo transmiten calor por conducción. Ambas circunstancias hacen que las reacciones uniformes de sólidos sean las que más difícilmente disipan el calor generado.

3.5.3.7 Fin de la Reacción

Las reacciones uniformes controladas se extinguen de forma natural por la consunción de los reactivos (a menos que se trate de un proceso continuo).

Las reacciones uniformes incontroladas siguen, normalmente, un desarrollo de alta temperatura y el efecto del núcleo es muy acentuado. En estas condiciones, la reacción puede terminar de tres maneras:

- La reacción se extingue por una rápida consunción o disipación del núcleo caliente.
- La reacción genera gases a alta temperatura a alta presión y se produce una explosión térmica.
- La energía acumulada en el núcleo caliente da origen a una reacción de propagación. Esto puede dar lugar a una deflagración y, en ciertos casos, a una detonación.

3.5.4 Reacciones de Propagación

En una reacción de propagación pueden diferenciarse tres zonas distintas:

- Zona de reacción (llama)
- Zona de productos (detrás de la llama)
- Zona sin reacción (frente de llama)

La reacción de propagación siempre es exotérmica. La reacción se inicia en una zona reactiva relativamente pequeña de alta temperatura, generada por una la acumulación de la energía de activación necesaria en cantidad (calor) e intensidad (temperatura) para iniciar el proceso, o por la acumulación de calor en el núcleo de una reacción uniforme. Para que la reacción se propague, el núcleo, debe elevar suficientemente la temperatura del material circundante, de forma que entre en reacción. Cuanto más



elevada sea la temperatura inicial de la masa del sistema, más fácilmente se inicia la reacción y más probable resulta la reacción de propagación, puesto que se requiere menos transmisión de energía para que entre en reacción el material circundante.

Parte del calor generado se retiene en los productos de la reacción, parte se transmite a los materiales sin reaccionar y parte se disipa en el ambiente.

Si la reacción genera gases a alta presión, se dan las condiciones necesarias para que pueda tener lugar una explosión.

Puesto que una reacción de propagación se inicia en un punto específico y se propaga a través de la masa reactiva, la velocidad de liberación de energía depende de la velocidad de propagación del frente de reacción. La velocidad de propagación varía desde cero hasta varias veces la velocidad del sonido, dependiendo de la composición (naturaleza y concentración de los reactivos), temperatura, presión, grado de confinamiento y otros factores

Hay dos tipos de reacciones de propagación fundamentalmente diferentes, en función de la velocidad de la reacción:

- Las deflagraciones, cuyo frente de reacción avanza a velocidad subsónica.
- Las detonaciones, cuyo frente de reacción avanza a velocidad sónica o supersónica y llevan asociada, por tanto, una onda de choque.

Las deflagraciones y detonaciones se propagan en gases, líquidos, sólidos, compuestos puros y mezclas monofase y multifase. Las detonaciones y deflagraciones pueden propagarse en el papel, plástico, recipientes de cristal y metal, tuberías, reactores, tanques, bidones, taladros, pozos abiertos, edificios, cuevas, túneles, etc. Muchos materiales sostienen violentas reacciones de propagación sin confinamiento externo.

Las reacciones de propagación más frecuente son las siguientes:

- Reacciones de Oxidación-Reducción.
- Reacciones de Descomposición de Compuestos Endotérmicos.
- Reacciones de Propagación Formadas a Partir de una Reacción Uniforme Incontrolada.

3.5.4.1 Reacciones de Oxidación-Reducción

- Oxidación de un combustible en una atmósfera comburente (normalmente se trata de una combustión en atmósfera de aire, aunque puede producirse también en atmósfera de oxígeno y de otros gases, como el cloro o el flúor).
- Reacción entre los componentes de una mezcla formada por sustancias oxidantes y reductoras, como la pólvora negra

3.5.4.2 Reacciones de Descomposición de Compuestos Endotérmicos

Los compuestos endotérmicos son los que se forman con una reacción endotérmica y, por tanto, contienen más energía que los elementos que los componen. Estos compuestos son inestables. Su descomposición es exotérmica y libera la energía absorbida en su formación.

- Desdosificación (descomposición con propagación de llama, conocida en inglés como disproportionation) de algunos gases, como el acetileno, el etileno, el óxido de etileno, el butadieno y el óxido nitroso.
- Descomposición de compuestos nitrogenados.
- Descomposición de peróxidos.
- Descomposición de compuestos que contienen en sus moléculas sustancias oxidantes y reductoras, como la nitroglicerina.

3.5.4.3 Reacciones de Propagación Formadas a Partir de una Reacción Uniforme Incontrolada

Esto puede producirse en procesos químicos tales como nitración, polimerización, diazotación, descomposición o condensación. Estas reacciones uniformes, si quedan fuera de control y no se consumen, ni dan lugar a una explosión térmica, pueden degenerar en una deflagración o en una detonación.

3.5.5 Energía liberada

El estudio de la distribución espacial de sobrepresiones debidas al estallido de depósitos se realiza por aplicación del "Método de Brode".

El método es únicamente aplicable a depósitos esféricos, no obstante, puede obtenerse una aproximación suficiente en depósitos de geometrías diferentes determinando un depósito esférico equivalente.

En rigor, el método es válido únicamente para sobrepresiones superiores a 0,1 bar (10 kPa), pero puede extrapolarse hasta 0,05 bar (5 kPa) con un error por defecto inferior al 20%.

El método parte de la energía total liberada en el estallido que, dependiendo de si se trata de una explosión de tipo físico o químico, se puede calcular como:

Explosión Física:

$$E = \frac{P - P_{atm}}{\gamma - 1} V$$

E: Energía liberada en el estallido (kJ).

P: Presión de los gases en el interior del tanque en el momento de la explosión (kPa).

P_{atm}: Presión atmosférica (101,3 kPa).

γ: Coeficiente de capacidades caloríficas del gas en las condiciones del estallido (adimensional).

V: Volumen del tanque (m³)

La presión de los gases en el interior del tanque en el momento de la explosión se puede estimar a partir de las condiciones de diseño del tanque. Se suele tomar como valor de cálculo 1,25 veces la presión de tarado de las válvulas de seguridad.

El coeficiente de capacidades caloríficas del gas en las condiciones de estallido se calcula teniendo en cuenta que el fluido experimenta un proceso isócoro, es decir, a V=cte. desde las condiciones nominales hasta las de estallido.

Explosión Química:

$$E = \frac{Q_r M}{P_m}$$

E: Energía liberada en el estallido (kJ).

Q_r: Calor de reacción (kJ/kmol).

M: Masa equivalente de sustancia que reacciona (kg).

P_m: Peso molecular (kg/kmol).

La masa equivalente de sustancia reaccionante no coincidirá, en general, con la contenida inicialmente en el tanque y para su determinación habrá que tener en cuenta:

3.5.5.1 Tanto por ciento de sustancia que reacciona.

Energía consumida, de la total liberada en la reacción, para la elevación de temperatura hasta el punto de ebullición y la posterior vaporización de la mezcla reactivos-productos.

Energía inicial de expansión disponible (en el caso de almacenamientos en tanques a presión).

3.5.5.2 Dilución o tanto por ciento de pureza del almacenamiento.

Conocida la energía total liberada en el estallido, determinaremos las energías disponibles para ondas de presión y para proyectiles en función del tipo de rotura del tanque. El reparto se realiza en función de los siguientes criterios:

Tipo de rotura	Fracción de la energía total utilizada en proyección de fragmentos	Fracción de la energía total disipada en ondas de sobrepresión
Frágil	0,2	0,8
Dúctil	0,4	0,6

De esta forma, si llamamos f a la fracción (tanto por uno) de la energía total que se disipa en forma de ondas de sobrepresión, las energías disponibles para ondas de presión y para misiles (E_p y E_m respectivamente) serán:

$$E_p = f \cdot E$$

$$E_m = (1 - f) E$$

Conocida E_p determinaremos la "escala de longitudes" mediante la ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{E_p}{P_{atm}}}$$

Se determina una "escala de longitudes" que relaciona distancias con sobrepresiones reducidas P .

Finalmente, la "sobrepresión" se determina mediante:

$$\Delta P = P_{atm} \cdot P$$

3.5.6 La proyección de fragmentos

El estallido de los contenedores provoca la proyección de fragmentos que en muchas ocasiones alcanzan distancias considerables y causan daños importantes al impactar contra seres humanos, edificios o estructuras.

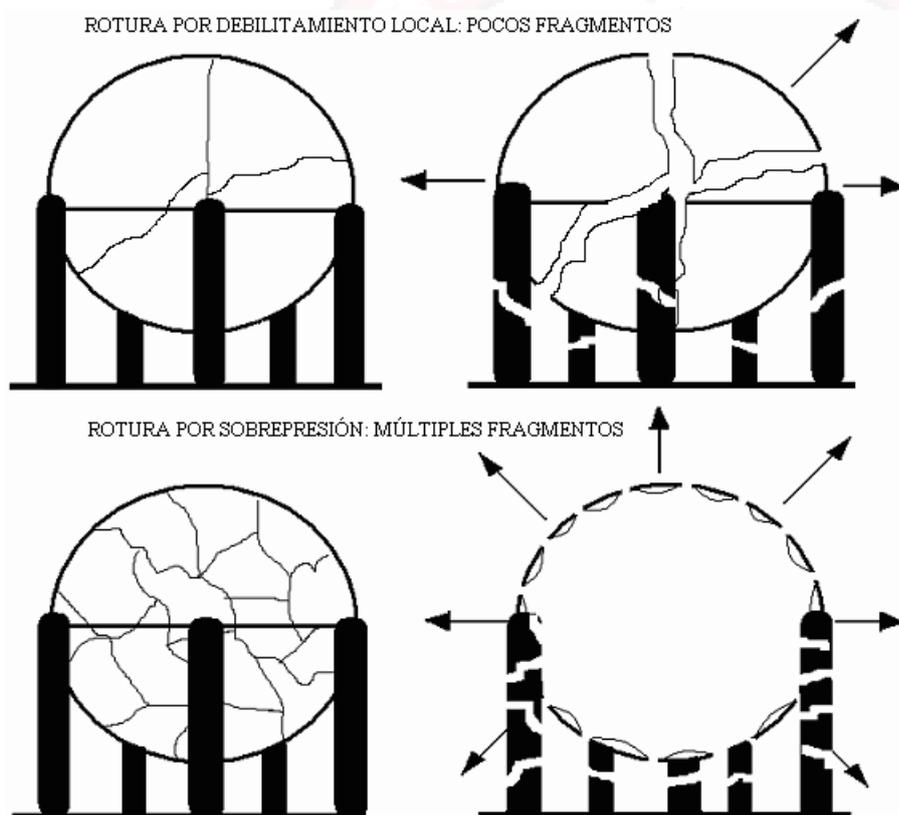
Los fragmentos provocados por las explosiones pueden ser primarios (generados por la rotura del recipiente afectado) o secundarios, como consecuencia de los efectos de ondas de presión externas sobre equipos o estructuras que provocan su rotura y la formación de fragmentos de edificaciones (muros, tejados,...) o equipos (tuberías, contenedores, estructuras de soporte,...). Su desprendimiento y aceleración dependen de su ubicación, masa y dimensiones, así como de los parámetros característicos de la onda de presión (sobrepresión e impulso) (IChemE, 1994). La formación y proyección de los fragmentos secundarios está considerada como un efecto dominó y la determinación del

número y alcance de los mismos presenta una gran incertidumbre, no incluyéndose en este trabajo.

El número de fragmentos formados en la rotura de un recipiente varía ampliamente, dependiendo de las causas de la rotura, de la geometría del contenedor y de las condiciones de almacenamiento. Las roturas de los recipientes se clasifican en dúctiles y frágiles. Las primeras, que son las más frecuentes en la industria (Lees, 1996), producen pocos fragmentos de gran tamaño, con un elevado potencial para producir daños. Las fracturas frágiles producen fragmentos de menor tamaño.

En el caso de roturas por debilitamiento del material suelen formarse escasos fragmentos (normalmente 2 en los cilindros y entre 2 y 5 en las esferas). Si, por el contrario, la rotura se produce por sobrepresión interna, la estimación del número y masa de los fragmentos debe basarse en la experiencia.

La rotura de recipientes esféricos suele producir un número elevado de fragmentos de tamaño más o menos similar. Hauptmanns (2001b) lo establece entre 3 y 19, con valores



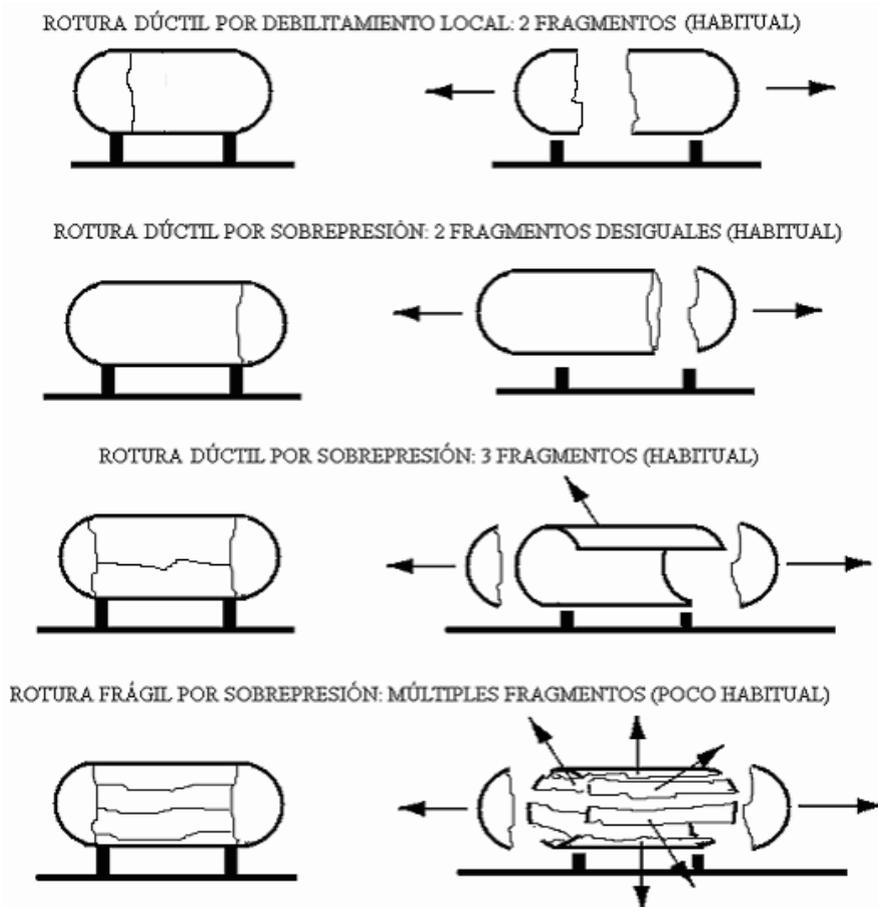
medios entre 8 y 10. Wang et al. (2000), analizando un accidente real donde se produjo la rotura de una esfera que contenía etileno, observaron la formación de siete fragmentos. TNO (1997) recomienda suponer un número de fragmentos entre 10 y 20. Lees (1996) recoge datos de rotura de dos esferas en las que se generaron 14 y 35 fragmentos, respectivamente. En la figura se indican las roturas más habituales de estos recipientes

FIGURA Tipos de roturas de recipientes esféricos

En los recipientes cilíndricos, la rotura inicial se produce normalmente en dirección axial, aunque ésta suele continuar de forma circular, provocando la aceleración y lanzamiento de los extremos semiesféricos. Es habitual que los cilindros experimenten roturas dúctiles cerca de uno de los extremos (originando dos fragmentos) o por ambos (originando tres), aunque en alguna ocasión también se ha observado la rotura frágil, originando gran número de ellos. Así, Hauptmanns (2001a) estima, basándose en los análisis realizados por Baker, Holden y Reeves, que el número medio de fragmentos originados por recipientes cilíndricos es de 2.7, mientras que Baum (2001) observa que de los 6 ensayos realizados, la

mitad de las roturas produjeron dos fragmentos, mientras que en la otra mitad se generaron tres. En un accidente descrito por Planas-Cuchi et al. (2004), el recipiente se rompió en tres fragmentos. No obstante, Lees (1996) analiza accidentes donde los recipientes cilíndricos se rompieron en un gran número de fragmentos (de diez a treinta)

FIGURA Tipos de roturas de recipientes cilíndricos



Para conocer el alcance de los fragmentos producidos en el estallido de recipientes es necesario estimar la velocidad inicial de los mismos y las condiciones aerodinámicas de su desplazamiento por el aire. La velocidad inicial es consecuencia de la aceleración provocada por dos fuerzas diferentes. Una es consecuencia de la diferencia de presiones del interior del recipiente y la atmosférica; la otra es la producida por la presión dinámica, o viento de la explosión. En la práctica, la fuerza debida a la diferencia de presiones actúa durante un tiempo muy corto, por lo que la aceleración de los

fragmentos es debida principalmente al viento de la explosión (Lees, 1996).

3.6 Explosiones BLEVE.

BLEVE es el acrónimo inglés de "boiling liquid expanding vapour explosion" (explosión de vapores que se expanden al hervir el líquido). Este tipo de explosión ocurre en tanques que almacenan gases licuados a presión y sobrecalentados, en los que por ruptura o fuga del tanque, el líquido del interior entra en ebullición y se incorpora masivamente al vapor en expansión.

La causa más frecuente de este tipo de explosiones es debida a un incendio externo que envuelve al tanque presurizado, lo debilita mecánicamente, eleva la temperatura del líquido contenido y aumenta la presión dentro del tanque. Llega un punto en que la presión alcanza valores que el recipiente no puede soportar, produciendo una fisura o ruptura del mismo. Esto ocasiona un súbito descenso de la presión, comienza el proceso de nucleación espontánea y todo el líquido contenido cambia su estado a gaseoso en forma virtualmente instantánea, aumentando su volumen cientos o miles de veces.

Si el vapor liberado corresponde a un producto inflamable, se genera una bola de fuego también en expansión. La onda expansiva de sobrepresión ocurre cuando el líquido se convierte en gas, su volumen cambia dramáticamente (leyes de Gay-Lussac y de Boyle) lo que causa esta onda de sobrepresión. La combustión del contenido ocurrirá siempre que el producto contenido sea combustible e inflamable, pero esta es una segunda explosión que es otro fenómeno conocido como "Explosión de Vapores No Confinados" o en inglés "Unconfined Vapour Cloud Explosion" (UVCE) y es consecuencia del BLEVE y no parte de él.

En una BLEVE se manifiestan las siguientes consecuencias físicas:

Sobrepresión por la onda expansiva: la magnitud de la onda de sobrepresión depende de la presión de almacenamiento, del calor específico del producto implicado y de la resistencia mecánica del depósito.

Proyección de fragmentos: la formación de proyectiles suele limitarse a fragmentos metálicos del tanque y a piezas cercanas a éste. Se trata de una consecuencia difícilmente predecible, y los fragmentos pueden proyectarse a varios cientos de metros, e incluso a miles de metros.

Radiación térmica de la bola de fuego: la radiación infrarroja de la bola de fuego suele tener un alcance mayor que el resto de efectos, y es la que causa más daños. El alcance de la radiación depende del tipo y cantidad de producto almacenado, y de la temperatura y humedad relativa ambiental.

También puede producirse el denominado efecto dominó cuando los efectos alcanzan otras instalaciones o establecimientos con sustancias peligrosas, pudiéndose generar en ellos nuevos accidentes secundarios que propaguen y aumenten las consecuencias iniciales.

Existen diversos modelos físicos propuestos por el TNO que permiten estimar la magnitud de cada tipo de consecuencias. Este efecto fue estudiado a mediados del siglo XX por el ingeniero español de la compañía Butano, S.A. (Hoy Repsol Butano) D. Narciso Belinchón, siendo pionero en el estudio de este tipo de siniestros.



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.

3.6.1 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:

3.6.1.1 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.

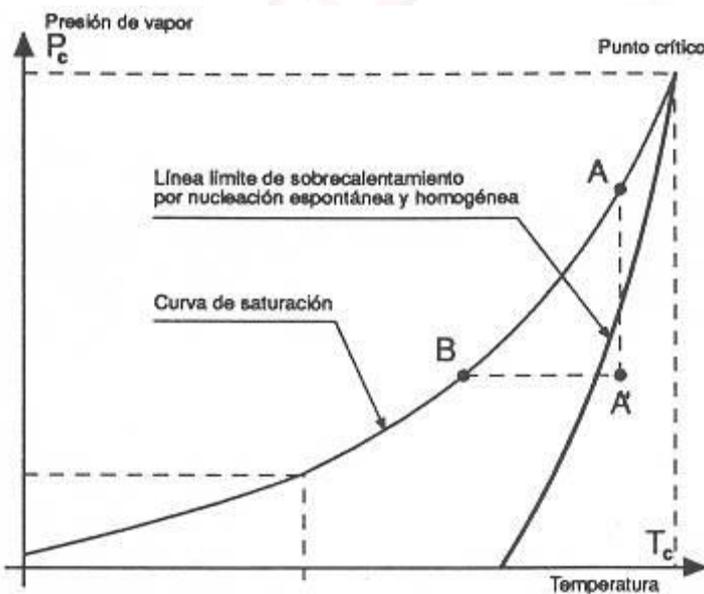
3.6.1.2 Bajada súbita de la presión (isoentrópica) en el interior del recipiente

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.

3.6.1.3 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.

FIGURA: 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 espontanea 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.

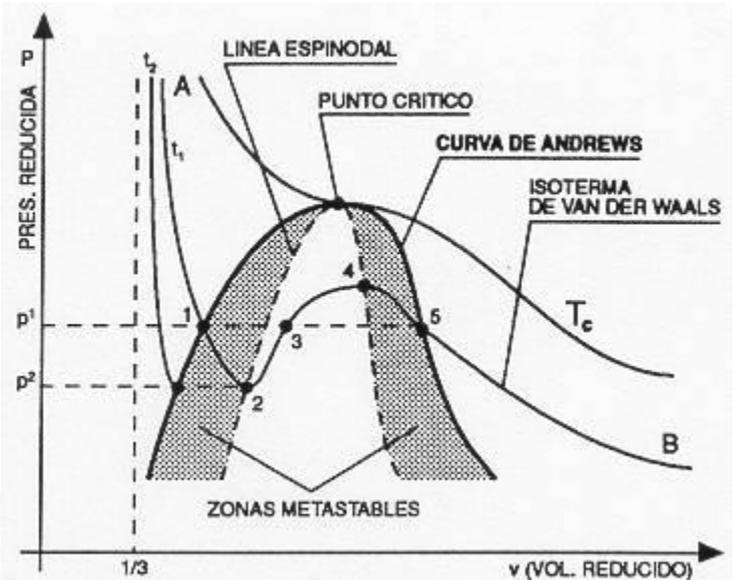
Precisamente en estos puntos límites de inestabilidad 2 y 4 le corresponde un mínimo y un máximo de la ecuación de estado, por lo que en ellos la pendiente de la tangente a la curva es cero.

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

FIGURA 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:

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

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

3.6.2 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:

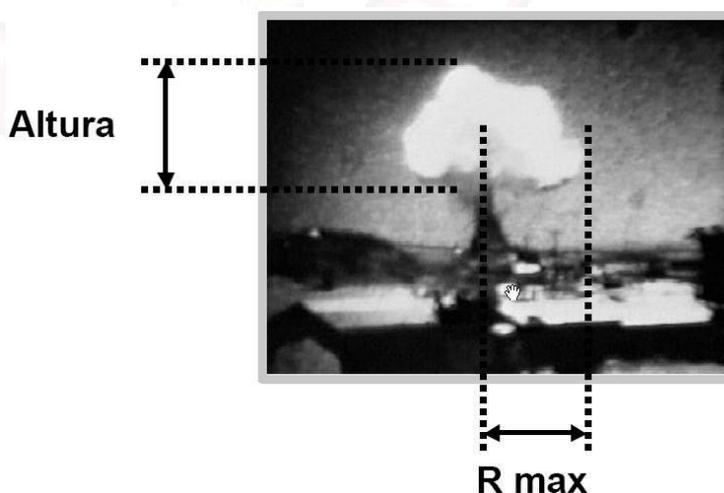
- Radiación térmica.
- Sobrepresiones por la onda expansiva.
- Proyección de fragmentos metálicos.

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 explotado podrá alcanzar distancias considerables, incluso de hasta 1000 m.

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.

3.6.2.1 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

Método 1

Las ecuaciones de Hasegawa y Sato interrelacionan a la masa (M) del gas licuado con el diámetro (D) de la bola de fuego, el tiempo de duración (T) y el calor de la radiación térmica $Q_{\text{máx}}$ que se recibe a la distancia R.

Diámetro (D) de la bola de fuego

$$D = 5,25 M^{0,314}$$

Donde:

M = kilos

D = metros

Tiempo de duración (T)

$$T = 1,1449 M^{0,362}$$

donde:

T = segundos

Calor de la radiación térmica

$$Q_{\text{máx}} = (828 M^{0,771})/R^2$$

donde:

$$Q_{\text{máx}} = \text{kW/m}^2$$

R = metros

Estas ecuaciones de Hasegawa y Sato se completan con la expresión de Fay y Lewis para la altura de la bola de fuego (H):

$$H = 12,73 V^{1/3}$$

donde:

H = metros

V = volumen en m³ del vapor combustible a presión y temperatura ambiente.

El efecto de la radiación térmica sobre las personas se puede calcular partiendo de la ecuación de Eisemberg que relaciona a la dosis Δ con el tiempo de exposición y la irradiación media recibida, en la forma:

$$\Delta = t \gamma^{4/3}$$

siendo:

Δ = Dosis recibida

t = Tiempo de exposición

γ = Irradiación recibida

donde γ es el producto de los coeficientes correspondientes a la transmisión atmosférica (función a su vez de la humedad relativa y de la distancia), un coeficiente geométrico de visión (función del diámetro de la bola de fuego calculado y de la distancia entre el centro de la bola de fuego y el cuerpo irradiado) y del valor de la intensidad media de la radiación, o flujo radiante por unidad de superficie y tiempo.

Método 2

Secuencia extraída del material del Curso Normalizado de Seguridad Contra Incendios y Emergencias con Gases Inflamables – Cuarto Módulo “Incendio en Gases Inflamables” por César Duque & Asociados

$$\text{Radio}_{\max} = 29 M^{1/3}$$

$$\text{Altura} = 0,75 D_{\max}$$

$$\text{Tiempo} = 4,5 M^{1/3}$$

donde :

M = kilos. Masa vaporizada del producto. Puede ser entre el 32 y 65%.

T = segundos

R y Altura = metros

Método 2

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

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

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:

$$E = fr \cdot W \cdot Hc / p \cdot D^2 \cdot t$$

Siendo

fr un coeficiente de radiación que puede oscilar entre 0,25 y 0,40. El coeficiente fr 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).

Hc = 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.

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

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

3.6.3 BLEVE por “Nucleación Espontánea”

Robert C. Reid y A. King, han aplicado la teoría cinética de los gases a la prevención de las llamadas explosiones por BLEVE.

Una de las principales conclusiones de estos investigadores es que el fenómeno conocido como “nucleación espontánea” se produce en líquidos, en determinadas circunstancias de presión y temperatura, y, particularmente, en todos los gases licuados. Sin embargo, dicha nucleación espontánea, que origina la evaporación de una gran masa del líquido (o gas licuado) y que parece ser la más específica condición para que se produzcan las temidas explosiones por BLEVE, sólo ocurre en determinadas circunstancias. Las condiciones concretas en las que tienen lugar no se consideran todavía suficientemente experimentadas, por lo que siguen en investigación constante, pues aunque tienen unos fundamentos teóricos claros, falta todavía por realizar mucho trabajo experimental y el cálculo de los parámetros de las constantes físico-químicas en las que pueden darse las BLEVES de la mayoría de los gases licuados.

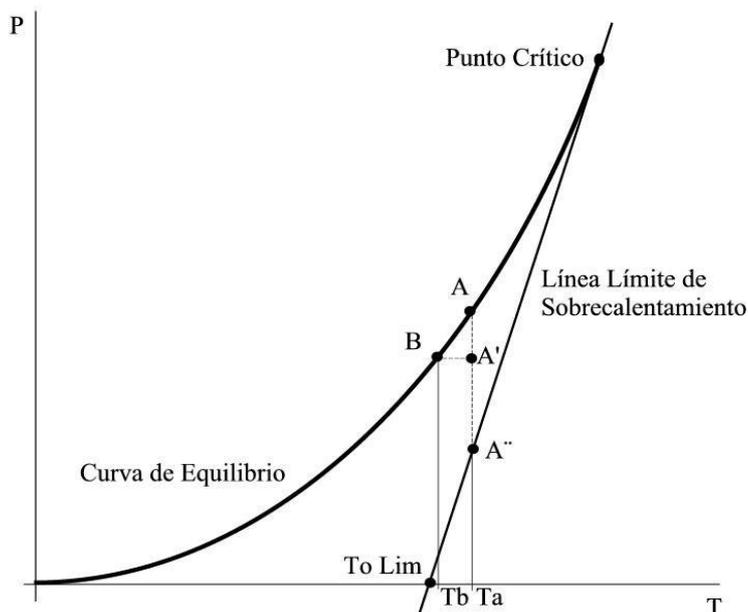
Hagamos ahora un análisis de comportamiento de un gas licuado cuando modificamos su presión y temperatura; este análisis lo haremos siguiendo la curva de equilibrio de esa sustancia (ver figura).

En determinadas condiciones, puede existir la posibilidad de tener un gas licuado, o un líquido, a una temperatura bastante superior a la que debería estar si estuviese a una presión inferior a la que le corresponde en su curva de saturación.

Por ejemplo, partiendo de un producto en las condiciones definidas en A, si mediante algunas de las maneras que luego explicaremos, conseguimos bajar su presión, sin que cambie su temperatura, hasta un punto como A', este punto estará “sobrecalentado” (a temperatura T_A) pues la presión a la que le correspondería estar en la curva de equilibrio es la representada por el nuevo punto B, cuya temperatura de saturación es T_B . A estos productos, principalmente gases licuados, cuando están en estas condiciones de

temperatura se les llama “sobrecalentados” y están en equilibrio metaestable, que puede romperse por la actuación de una mínima perturbación. La inestabilidad en los líquidos sobrecalentados se puede caracterizar por la diferencia entre la temperatura real del líquido en el estado dado y la temperatura teórica de ebullición del líquido a la misma presión. Para el caso que hemos supuesto, paso A - A', la diferencia de temperaturas es $T_A - T_B$.

FIGURA- Sobrecalentamiento de Gases Licuados



Experimentalmente, el sobrecalentamiento se puede lograr o bien a base de conseguir calentar a presión cte. un producto por encima de su punto de ebullición sin que se transforme en vapor, o bien, por disminución de la presión a temperatura cte. Sin embargo, para lo que nos interesa, la manera en la que, en caso de accidente de recipientes, se puede dar en la práctica, es cuando sucede una disminución brusca de la presión (por expansión isoentrópica). Es decir, una bajada de presión de A a A', e incluso a A'', que es el punto de corte de la vertical de descenso de la presión hasta la línea límite de sobrecalentamiento donde puede suceder la nucleación espontánea y por lo tanto la BLEVE.

La explosión del tipo BLEVE por nucleación espontánea, se puede producir con cualquier líquido si se cumplen conjuntamente las siguientes condiciones:

- a) Que se trate de un gas licuado o de un líquido muy caliente y a presión (líquido sobrecalentado).
- b) Que se produzca una súbita bajada de la presión en el interior del recipiente. Ello puede ser originado por una fisura o agujereamiento de la chapa, entrada en funcionamiento de un disco de ruptura no diseñado adecuadamente y aplicado directamente al depósito o recipiente, etc.

Que se den condiciones de presión y temperatura tales que se pueda producir el fenómeno de “nucleación espontánea” con lo que se originaría una evaporación “en masa” rapidísima, tipo “flash”, generada por la ruptura del equilibrio metaestable ante citado, como consecuencia del sobrecalentamiento del líquido caliente o gas licuado

a) Gases Licuados y Líquidos Sobrecalentados

Que el gas licuado, en el sentido que antes definíamos, esté a una temperatura bastante superior (no es suficiente que esté a 2 o 3°C por encima) de la que tendría ese mismo

fluido a la presión atmosférica normal (aprox. 1 atmósfera) es una cosa bastante corriente. En la mayoría de los gases licuados (GLP, Amoníaco, Cloro), algunos gases criogénicos (CO₂, Nitrógeno, etc.), se dan estas condiciones.

También existen líquidos que están por encima de su temperatura de ebullición, cuando los recipientes que los contienen, por la causa que sea, entran en contacto con fuentes importantes de calor y estando bien cerrados, incrementan su presión. Es corriente el caso de líquidos que se calientan mucho cuando se ven involucrados en incendios que afectan a las inmediaciones de sus envases (o a otros recipientes próximos).

Las categorías de productos que en principio pueden producir BLEVE por nucleación espontánea son:

- a) Todos los gases licuados almacenados a la temperatura ambiente (tanto combustibles como no).
- b) Los líquidos que, accidentalmente, entren en contacto con focos importantes de calor.

El común denominador para que exista la posibilidad de que se puedan producir BLEVE es que sean gases licuados o líquidos muy calientes. Evidentemente es la primera condición necesaria pero, en absoluto, suficiente. Para ello es preciso que estén contenidos en recipientes herméticos

b) Bajada Brusca de la Presión

La segunda condición necesaria para que se pueda producir una BLEVE por nucleación espontánea es que haya un descenso súbito de la presión interna en el recipiente o tanque que contenga el líquido

Cualquier fallo o fisura que se produzca en las paredes del recipiente, así como la entrada en funcionamiento de algún dispositivo de aplicación directa sobre el recipiente que libere, incontrolada y súbitamente, la presión, puede ser, en ciertos casos, y dependiendo de las circunstancias, el origen desencadenante de una BLEVE.

Dicha fisura puede ser producida, principalmente, por causas mecánicas (grietas en la chapa del recipiente, impactos sobre el recipiente, choque o vuelco de una cisterna a presión en su transporte, etc.).

Normalmente los líquidos y en particular los líquidos inflamables, no suelen estar presurizados. Por ello, aunque hubiese un impacto o choque sobre el tanque que lo contiene no se producirá la BLEVE. Si se produce un impacto o choque, evidentemente puede haber fuga del producto e incluso producirse un incendio, pero es bastante improbable, en las condiciones antedichas, que se produzca una BLEVE.

También puede producirse por causas térmicas. En efecto, el calentamiento excesivo de la chapa del recipiente o contenedor produce una pérdida de la resistencia mecánica del metal, con lo que sus paredes pueden llegar a ser incapaces de aguantar la presión del recipiente, que, además, habrá aumentado con el calentamiento, produciéndose entonces las grietas o fisuras que pueden iniciar una BLEVE.

Por ejemplo, los aceros habitualmente empleados en recipientes para contener GLP pueden fallar (agrietándose o rajándose) a presiones de unos 14 a 20 kg/cm², por el sólo hecho de calentar la chapa a unos 650 a 700°C, ya que la resistencia mecánica de estos aceros, a dichas temperaturas, se reduce a, aproximadamente, el 30% de la que tiene a las temperaturas normales.

En este caso, como se ha dicho antes, el calor proporcionado no solo debilita la chapa, sino que, además, incrementa la presión interna en el recipiente con lo que el efecto del aumento de la temperatura es doblemente pernicioso.

Volviendo al caso de los líquidos inflamables, si un foco de calor, o incendio, incide sobre la chapa de los recipientes que los contienen, siendo los recipientes herméticos, aumentará la presión con lo que una BLEVE si fuese entonces posible.

c) Comportamiento de las Válvulas de Seguridad en las BLEVES

Hablando de los descensos bruscos de la presión habría que decir que, desgraciadamente, las válvulas de seguridad o de alivio de sobrepresiones y los orificios de venteo pueden, como es su misión, descargar parte del vapor producido por la ebullición del líquido si, por ejemplo, el recipiente resulta expuesto al fuego, pero no podrán evitar que la chapa del recipiente vaya subiendo de temperatura, dependiendo de la intensidad del foco calorífico que sea, con lo que la BLEVE, seguirá siendo posible. Lo que sí podrá lógicamente hacer la válvula de seguridad es retrasar el momento de aparición de la BLEVE y aligerar algo de carga del depósito, pero no evitará, desgraciadamente, que pueda generarse por causas térmicas.

Asimismo, la válvula de seguridad, puede funcionar perfectamente y no evitar la BLEVE producida por un choque o impacto físico (descarrilamiento, colisión, etc.) de una cisterna o recipiente que lleve un gas licuado, pues la presión no se incrementará, apreciablemente por el impacto con lo que, dicha válvula, normalmente, no tiene por qué abrirse. Sin embargo, el choque sí que puede producir fisuras o grietas que liberen la presión hasta una presión cercana a la atmosférica. Ello puede entonces generar una BLEVE. Por lo tanto tampoco se evitan las BLEVES, originadas por causas mecánicas, mediante el uso de válvulas de seguridad.

Aunque no hay pruebas de sucesos que realmente hayan ocurrido al respecto, sí podemos afirmar, al menos desde un punto de vista teórico, que puede darse el caso de que una válvula de alivio sea el origen de una BLEVE si se dan, desgraciadamente, estas dos condiciones, al mismo tiempo:

- 1) Que esté tarada a una presión superior a aquella cuya correspondiente temperatura (en la curva de equilibrio de presiones-temperaturas) sea más elevada que la de corte de la línea "Superheat Limit Locus" con el eje de temperaturas (50°C en la fig. 3). Es decir, que esté en la zona de la derecha de la curva donde el líquido está sobrecalentado, por lo que la nucleación espontánea es allí posible.
- 2) Que sea una válvula de seguridad de un gran caudal con lo que, al abrirse, permitirá la evacuación en pocos instantes de una gran cantidad de fluido por lo

que producirá una bajada muy rápida de la presión con el consiguiente peligro de BLEVE.

No obstante lo anterior, se podría argumentar que es difícil que ocurra pues, por lo menos, la segunda condición es difícil que suceda ya que la válvula de alivio, si está bien diseñada, construida y contrastada, por su concepción, se abrirá sólo hasta liberar el exceso de presión hasta su presión de cierre. Con ello, en cuanto llegue a esta presión, volverá a cerrar impidiendo así que se despresurice hasta una presión cercana a la atmosférica que, recordemos, es lo que suele desencadenar la BLEVE.

Aceptemos tal punto de vista. Todo ello es cierto pero queda apuntada la posibilidad de que, si la válvula de alivio tiene demasiado caudal y el resorte tiene mucha "inercia", ósea, tiende a cerrarse después de que la presión en el depósito ha descendido bastante por debajo de la teórica de cierre, es posible una BLEVE. Todos sabemos que la inercia al cierre es un caso que, en la



práctica industrial, se da mucho más de lo que deseáramos. Si todo lo anterior es posible, al menos teóricamente, en válvulas que funcionen bien, qué decir de una válvula de seguridad que no funcione correctamente al cierre. Entonces sí que podemos afirmar que una válvula de alivio mala o estropeada puede ser el origen de peligrosísimas BLEVES.

Por supuesto que, con lo dicho anteriormente, se entenderá perfectamente que un disco de ruptura, que esté aplicado directamente al recipiente y que se rompa por exceso de presión, puede muy bien, en determinadas condiciones, producir una BLEVE. Si el disco va colocado en serie, como es frecuente en los nuevos diseños, con la válvula de alivio, hará que sea, lógicamente, más difícil que la ruptura de dicho disco, sea el origen de una posible BLEVE.

d) Producción de la Nucleación Espontánea por Sobrecalentamiento de Líquidos

La tercera y más específica condición que debe ocurrir para que pueda darse una explosión BLEVE, es que cómo se ha dicho anteriormente, el fluido esté sobrecalentado, es decir, en una zona del diagrama cuyas condiciones de presión y temperatura favorezcan el fenómeno de nucleación espontánea para que se produzca una evaporación en masa rapidísima, en milésimas de segundo, que haga de desencadenante de la explosión BLEVE. Esta teoría de la nucleación espontánea, aunque todavía se están haciendo pruebas experimentales, parece confirmar dichas hipótesis.

Si tenemos, por ejemplo como se ha dicho antes, un gas licuado o un líquido muy caliente encerrado en un depósito y en equilibrio con su vapor a la presión correspondiente en las condiciones de equilibrio y, por la razón que sea, falla la chapa del depósito produciéndose una grieta o agujero, se generará una rápida caída de la presión. Entonces el líquido debería empezar a hervir y a bajar su temperatura a través de

toda su masa hasta un valor compatible con la nueva presión (que, normalmente, a los pocos segundos, será la presión atmosférica). En concreto para el caso del Propano (dado por KING) debería bajar a las siguientes condiciones $T \approx -42^{\circ}\text{C}$ y $P = 1 \text{ atm}$. Sin embargo, la iniciación del proceso de ebullición necesita de la existencia, dentro de la masa del líquido, del suficiente número de núcleos iniciadores de la ebullición. Es el caso que en los primeros instantes no existe en los tanques de GLP dichos núcleos por lo que, en contra de lo expresado teóricamente, la ebullición, por unos breves momentos, no tendrá lugar. Habrá, por tanto, un gas licuado por encima de la temperatura a la que teóricamente estaría en equilibrio, a la presión atmosférica. Tal equilibrio, pues, no se



produce, al menos en los primeros instantes, por la inexistencia de los núcleos iniciadores de la ebullición. Ese desequilibrio puede dar lugar o no, dependiendo de las condiciones, a una explosión BLEVE por nucleación espontánea. Sino, por lo menos producirá una ebullición violenta y una BLEVE por escape masivo de gas licuado, como luego veremos, que puede rajarse el depósito.

Analizaremos el caso concreto del Propano que creemos muy explicativo y que, por similitud y haciendo las correspondientes gráficas, se puede aplicar a la mayoría de los gases licuados.

Sean las curvas de la figura en la que vemos representada, por una lado, la curva de equilibrio del líquido/gas en función de la presión y la temperatura (curva de presión de vapor) y, por otro, la gráfica que representa, sobre los mismos ejes de coordenadas, la línea límite donde es posible el sobrecalentamiento del líquido, en inglés "Superheat Limit Locus", que representa el límite a partir del cual el Propano líquido puede existir sin que se produzca la nucleación espontánea ni, por tanto, la explosión BLEVE. A partir de dicha línea la nucleación tiene lugar instantánea y espontáneamente la explosión BLEVE.

Tomemos un depósito de Propano a la temperatura ambiente (unos 20°C). Viendo la curva de equilibrio habrá fase de gas y fase de líquido, en equilibrio, a una presión de unas 8 o 9 atmósferas. Existen, pues, condiciones de saturación. Suponemos que las paredes de este depósito, accidentalmente, entran en contacto con un fuego o foco de calor, la temperatura aumentará y, por tanto, la presión. Supongamos que llega a unos 40°C situándose en las condiciones del punto B: Si en este momento, bien por impacto, o por falla del material, o por la causa que sea, se abre una grieta o agujero, la presión descenderá bruscamente según una línea vertical hasta alcanzar las condiciones del punto E. Aunque, como se ha indicado antes, en los primeros momentos no habrá en la masa del propano suficientes núcleos iniciadores de la ebullición con lo que se producirá, por tanto, el referido "desequilibrio", no habrá BLEVE por nucleación espontánea, ya que el líquido no está en la zona donde se puede producir la nucleación espontánea. Pasado unos instantes y debido a dicho desequilibrio ocurrirá una ebullición violenta del líquido pero, como no se habrá alcanzado la línea de sobrecalentamiento, no es previsible que se produzca una explosión por BLEVE nucleación espontánea ya que, como se ha dicho repetidamente, no habrá nucleación espontánea. Por supuesto que se vaporizará una

gran cantidad de propano en pocos segundos que producirá efectos violentos e, incluso, puede rajarse el depósito y producir una BLEVE por liberación de gas licuado. Si, por el contrario, no se produjese la ruptura del depósito, vaporización menos violenta, por el agujero o grieta saldría propano que, probablemente, si encuentra una chispa o llama, entraría en ignición.

Supongamos, como una segunda hipótesis, que el fallo del material ocurre en las condiciones del punto C, es decir, a unos 55°C. Sucede que, entonces, su rápida despresurización tendrá lugar por la línea vertical hasta una presión de unas 3,3 atmósferas, punto D, donde sí se producirá la nucleación espontánea al haber alcanzado "la Superheat Limit Locus" pudiendo entonces ocurrir una explosión BLEVE en una fracción de milisegundos, pues se rompe el equilibrio metaestable del líquido sobrecalentado. Aquí, más que abrirse el depósito, lo que se produce es un auténtico estallido del mismo, como una bomba, que se proyecta en pedazos de metralla "al vaporizarse súbitamente un gran volumen del propano contenido.

Un volumen de propano líquido, cuando se evapora, genera unos 280 volúmenes de vapor. Para líquidos inflamables, la vaporización súbita, en caso de BLEVE, puede ser del orden de una 10%. Para los gases varía entre un 25% para gases criogénicos y un 50% para gases no criogénicos.

La energía de esta explosión en función directa de la masa total del fluido que tuviera el depósito y de la diferencia de presión entre la presión de vapor del punto donde se halle en equilibrio en aquel momento y la correspondiente presión del punto de corte en la línea de sobrecalentamiento. Es curioso, pues, comprobar que la explosión BLEVE, para la misma masa, puede ser más violenta si el fallo del depósito tiene lugar a temperaturas y presiones bastante más bajas que las del punto crítico que en las proximidades de éste y eso aunque la energía acumulada cerca del punto crítico sea, paradójicamente, bastante mayor.

3.6.4 LA ONDA DE PRESIÓN

El efecto más característico de una explosión es el brusco aumento de la presión que se produce en el aire circundante y que se propaga en forma de onda en todas las direcciones libres del espacio. La forma, características y magnitud de la onda dependen del tipo de explosión, del entorno y de la distancia al origen del accidente.

La máxima presión alcanzada por la onda en un punto dado se conoce como "pico de presión estática" o "sobrepresión estática", P_s . El periodo de tiempo en el que la presión es superior a la presión atmosférica (P_0), se conoce como "duración de la fase positiva", t_p . A dicho período suele seguirle una "depresión" o fase negativa, que no se tiene en cuenta a efectos de cálculo de consecuencias dado que su valor absoluto máximo es mucho menor que el de la fase positiva.

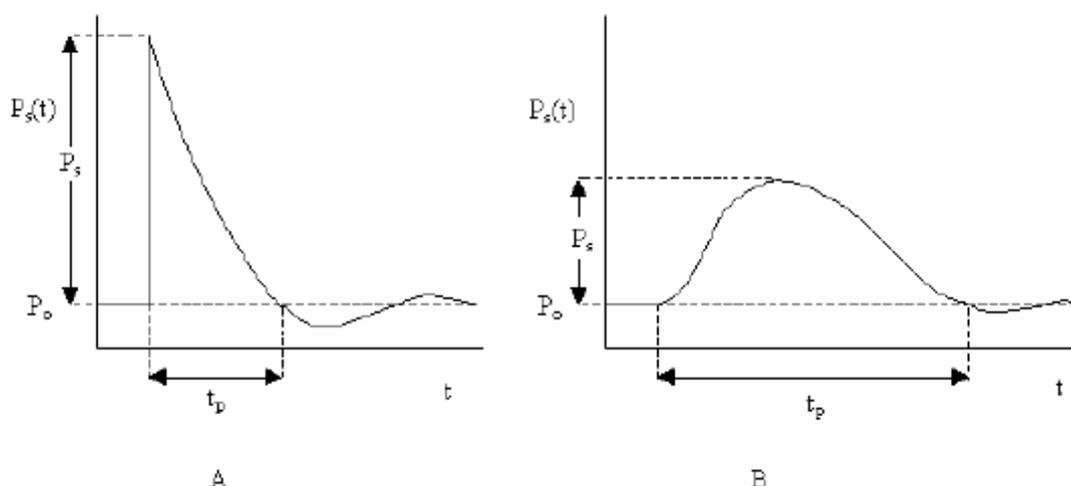


FIGURA Evolución de la sobrepresión con el tiempo para explosiones detonantes(A) y deflagrantes (B).

Se distinguen dos perfiles de la onda de presión: el detonante y el deflagrante (figura A y B). El primero es más agudo, de manera que el valor máximo se alcanza súbitamente. En una explosión deflagrante, la velocidad de aumento de la presión es mucho más lenta. Otra diferencia significativa de ambos tipos de ondas es que la duración de la fase negativa de las detonantes es mayor que la de las deflagrantes. La onda detonante conforme avanza y se aleja del origen de la explosión, se va suavizando y su perfil acaba siendo similar al de la onda deflagrante. La diferenciación de la onda detonante y deflagrante está también relacionada con la audibilidad de las mismas, de manera que sólo la primera es audible, aspecto que se comenta en el apartado 2.3.5.

Además del pico de sobrepresión y la duración de la fase positiva, la onda está también caracterizada por el “impulso mecánico” ejercido sobre cualquier objeto, en adelante “impulso” (i), que se define según la expresión:

$$i = \int_0^{t_p} P_s(t) dt$$

Para calcular el valor del impulso los perfiles sobrepresión-tiempo se pueden modelizar como triángulos (ver figura); de esta forma el valor del impulso mecánico puede calcularse mediante (TNO, 1989):

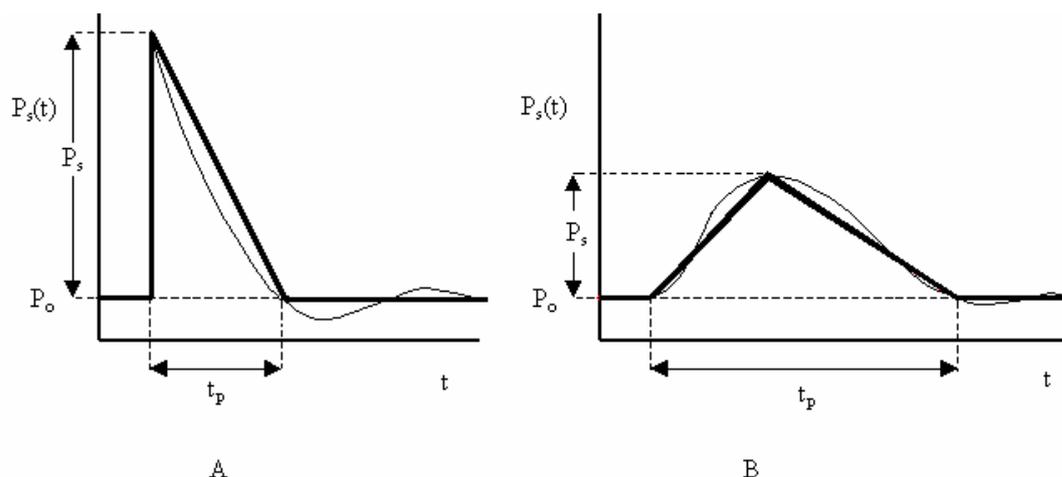


FIGURA Simplificación esquemática de la onda de presión detonante (A) y deflagrante (B).

Otras dos propiedades importantes asociadas a las ondas de presión son la presión dinámica (Q) y la presión reflejada (P_r). La primera es consecuencia del “viento de la explosión” arrastrado por el avance de la onda (IchemE, 1994), pudiendo provocar el derribo de obstáculos desplazables. Esta presión no actuará sobre superficies paralelas al avance de la onda. Su expresión es (TNO, 1989):

$$Q = \frac{1}{2} \rho_s U^2$$

donde ρ_s es la densidad del aire (kg/m^3) a la presión máxima de la onda y U la velocidad de desplazamiento de la onda (m/s).

El valor de Q puede expresarse en función de la sobrepresión estática mediante (TNO, 1989):

$$Q = \frac{5}{2} \left(\frac{P_s^2}{7P_o + P_s} \right)$$

De la ecuación anterior se deduce que para valores bajos de P_s , la presión dinámica es menor que la estática, pero a partir de valores de la sobrepresión estática superiores a $5 \cdot 10^5$ Pa, la presión dinámica superaría a la anterior. Hay que reseñar que tales valores de la sobrepresión estática son prácticamente inalcanzables en explosiones reales, salvo para posiciones muy cercanas al centro de la explosión. Por este motivo, a efectos de planificación de emergencias, la presión dinámica podrá considerarse siempre menor que la estática.

La presión reflejada (P_r) es la presión estática que se alcanza en el momento inmediatamente posterior al choque de la onda de presión contra una superficie rígida y

viaja en la misma dirección y sentido opuesto a la incidente, tal como se muestra en la figura.



FIGURA Reflexión de una onda de presión en el choque perpendicular contra un obstáculo (Stull, D.R., 1976).

En el caso de que el choque se produzca con un determinado ángulo de incidencia con respecto al obstáculo, α_1 , la onda incidente y la onda reflejada (que viaja con retraso con respecto a aquélla pero casi en la misma dirección) se combinan cerca de la superficie de impacto, formando una nueva onda M casi perpendicular a dicha superficie, denominada frente Mach ("Mach stem"). Como se indica más adelante, la onda reflejada viaja a una velocidad mayor que la incidente, lo que permite que la alcance. El punto donde las tres ondas (incidente, reflejada y Mach) se unen se denomina punto triple. Éste es el caso típico de la reflexión de una onda de presión contra el suelo; en la figura se muestra una secuencia cronológica de este proceso

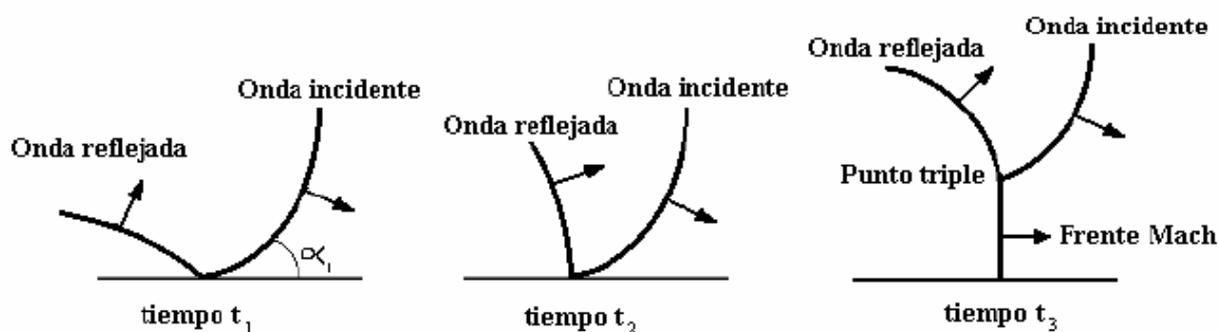


FIGURA. Secuencia de formación del punto triple y del frente Mach en la reflexión de la onda de presión contra el suelo (Mohanty, B., 1998).

Tanto si la onda incidente choca de forma perpendicular contra el obstáculo como si lo hace con un determinado ángulo, la onda reflejada formada viaja a mayor velocidad, puesto que se desplaza a través de aire precomprimido y precalentado (a causa del paso de la onda incidente). Esto se debe a que la velocidad de desplazamiento de las ondas mecánicas depende de las características del medio, cuya expresión para el aire (considerado ideal) es:

$$U = \sqrt{\frac{1.4RT}{\mu_a}}$$

siendo U la velocidad de desplazamiento de la onda (m/s), R la constante de los gases ideales ($R \approx 8 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$), T la temperatura absoluta (K) y μ_a la masa molecular media (0.029 kg/mol).

Según la ecuación la velocidad de desplazamiento de la onda de presión se eleva al aumentar la temperatura del medio.

La velocidad de desplazamiento de la onda reflejada (U_r) está relacionada con la sobrepresión estática de la onda incidente. Esta dependencia puede expresarse, según TNO (1989), mediante la ecuación:

$$U_r = c_0 \left(1 + \frac{6P_s}{7P_0} \right)^{1/2}$$

donde c_0 es la velocidad del sonido en el aire (m/s). Por lo tanto, cuanto mayor sea la sobrepresión de la onda incidente, mayor será la velocidad de la onda reflejada.

La sobrepresión de la onda reflejada, para el caso de choque frontal, puede estimarse mediante la siguiente expresión (Mohanty, 1998):

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

Donde γ_a es la razón de los calores específicos del aire a presión y volumen constantes.

Teniendo en cuenta la ecuación y el valor de γ_a (1.4), se obtiene:

$$P_r = \frac{8P_s^2 + 14P_sP_0}{P_s + 7P_0}$$

Si $P_s \ll P_0$, la ecuación se transforma en

$$P_r \approx \frac{14P_sP_0}{7P_0} = 2P_s$$

O al contrario, si $P_s \gg P_0$, la ecuación se convierte en:

$$P_r \approx \frac{8P_s^2}{P_s} = 8P_s$$

Así pues, la sobrepresión reflejada será siempre superior -de 2 a 8 veces- a la sobrepresión estática de la onda incidente

El tiempo t_s de duración de la onda se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{3S}{U}$$

Por tanto, el frente de onda genera el desplazamiento de una masa central de aire y/o gases desde el centro de la explosión, a través del aire, generando una onda de presión positiva y otra posterior de succión. La fuerza explosiva ronda los 500 Km/h y los mayores daños se producen en una distancia crítica estimada en 6-7 metros. La onda de sobrepresión, la más dañina, suele durar 5 segundos, y la de succión 2 segundos, salvo en las explosiones atómicas (duración estimada de la onda de sobrepresión 1 minuto, y la de succión 10-15 minutos).

La onda de presión se ve afectada por la interacción entre la explosión y la construcción, siendo la estructura un obstáculo, por lo que la onda de presión en su desplazamiento será perturbada. Esta perturbación será la carga sobre el obstáculo, que en este caso es la estructura

3.6.5 Cálculo de Alcance de proyectiles

La onda de presión que se genera en una explosión de un depósito o en una BLEVE, provoca la formación de un cierto número de fragmentos (partes del propio depósito, valvulería, conexiones, etc.) con una energía cinética, a los que se denomina proyectiles o misiles, que pueden ser desplazados a distancias verdaderamente significativas. La estimación de este tipo de consecuencias, es un problema cuya solución no es nada fácil ya que depende de la energía de la explosión, de la trayectoria y de la distancia que alcanzan, problemas todos ellos de difícil determinación.

Una aproximación a la solución de este tipo de problema, parte de la energía que se genera en una explosión física o química, o bien procedente de una BLEVE. Parte de esta energía total forma ondas de presión y parte (E_f) transporta los fragmentos a determinadas distancias.

El cálculo se lleva a cabo teniendo en cuenta que no existe rozamiento con el aire, con lo que el efecto es el más desfavorable posible. De la misma manera, el ángulo inicial de cálculo que se usará será el de 45° , es decir, el ángulo en virtud del cual la distancia alcanzada será la máxima.

Se necesitarán el peso total del depósito que se va a destruir, el número de fragmentos en los que se despedazará éste, la energía disponible para proyectiles y la altura a la que se encuentra el depósito desde el suelo.

3.6.5.1 Descripción

La energía disponible para la proyección de fragmentos, E_f es una fracción de la energía total y constituye la energía cinética de los fragmentos. Cualquier fragmento tendrá, por tanto la siguiente velocidad:

$$U_0 = \sqrt{\frac{2E_f}{M_f}}$$

M_r : masa total del recipiente (kg).

Para el cálculo de la velocidad en función de la distancia r , se utiliza la siguiente relación:

$$U(r) = U_0 \exp\left(-\frac{C_w A_f \rho r}{M_f}\right)$$

C_w : coeficiente aerodinámico del fragmento (adimensional)

A_f : superficie del fragmento perpendicular a la trayectoria (m^2)

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

M_f : Masa del fragmento (kg)

Indicando con h la altura del lanzamiento del fragmento considerando un tiempo de vuelo:

$$t = (2h/g)^{0,5}$$

El modelo calcula la máxima distancia de alcance r_m a través de la siguiente iteración:

$$r_{m+1} = \frac{h U(r_m)}{gt}$$

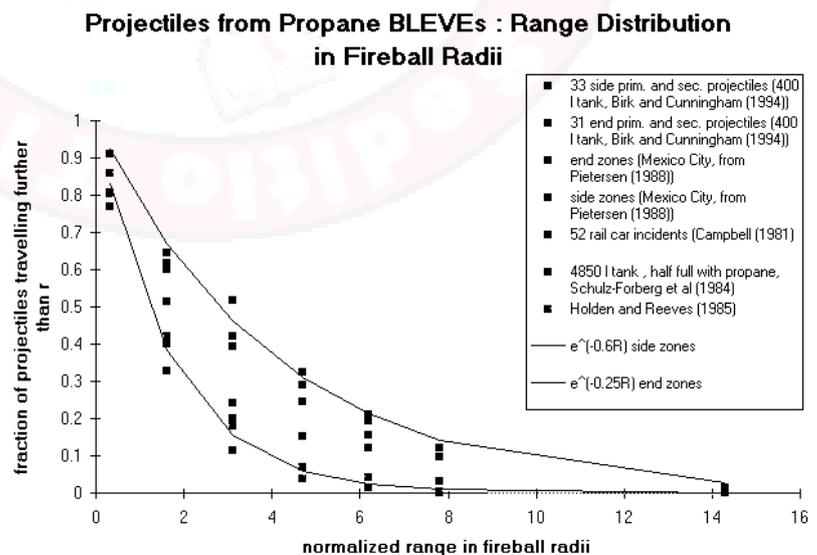
El número de fragmentos se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$N^{\circ} \text{ fragmentos} = -3,77 + 0,0096 V$$

V : volumen del depósito (m^3)

Válido para depósitos comprendidos entre 700 y 2.500 m^3 .

FIGURA Distribución de proyectiles en función de la distancia

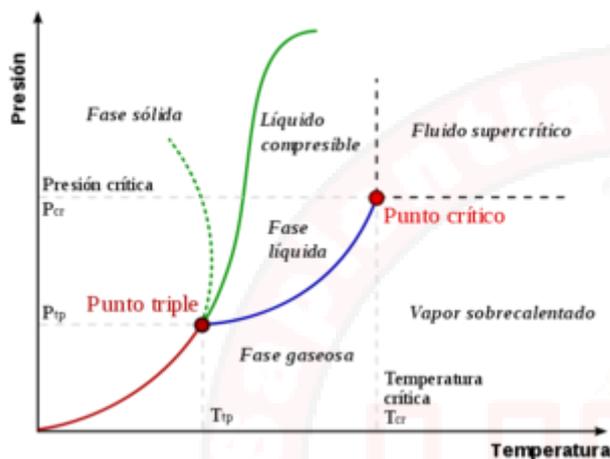


En la imagen siguiente se presenta el rango de distribución de proyectiles en función de la distancia normalizada al número de radios de la bola de fuego para diversos casos (Ref: A. M. Birk, P. Eng. - BLEVE Research. Normalized projectile ranges for propane BLEVEs. Queen's University at Kingston).

3.7 Vaporización de líquidos derramados

3.7.1 Estado Vapor

El vapor es el estado de agregación de la materia en el que las moléculas interaccionan débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares adoptando la forma y el volumen del



recipiente que las contiene y tendiendo a expandirse todo lo posible, es decir, que es la fase gaseosa de una sustancia a diferencia de que ésta se encuentra por debajo de su temperatura crítica.

El vapor es la zona por debajo de la línea vertical que representa la temperatura crítica.

Aunque utilizamos los términos gas y vapor de manera indistinta, rigurosamente existe una diferencia. Un gas es una sustancia que normalmente se encuentra en el estado

gaseoso a temperaturas y presiones ordinarias; un vapor es la forma gaseosa de cualquier sustancia que constituye un líquido o un sólido a temperaturas y presiones normales, mientras que un gas perfecto requiere el proceso de licuefacción, para pasar al estado líquido. Cuando se habla de temperaturas y presiones normales se refiere a 25°C y 1 atm. Ejemplo: Hablamos de vapor de agua y oxígeno gaseoso.

En la gráfica, el vapor es la llamada fase gaseosa, encerrada, por la línea vertical que representa la temperatura crítica y las curvas azul (curva de vaporización) y roja curva de sublimación, que representan las temperaturas y presiones específicas en las que coexisten los estado de la materia de líquido-gas y sólido-gas respectivamente y así convirtiéndose en vapor. Este diagrama de fases muestra los cambios de estado de la materia.

La curva con puntos de color verde muestra el comportamiento anómalo del agua y en general, el de todos los materiales que cuando se funden sufren una contracción de volumen específico. La curva de fusión (en color verde) marca el punto de fusión para cada par (temperatura, presión). La curva de vaporización, en azul, lo mismo para el punto de ebullición, y la curva de sublimación, en rojo, muestra la presión de sublimación para cada temperatura. Se muestra como ellos varían con la presión. El punto de unión entre las tres curvas verde, azul y rojo es el punto triple. El punto crítico se ve en el otro extremo de la curva azul de vaporización.

El vapor sobrecalentado es el gas que se encuentra por encima de su temperatura crítica pero por debajo de su presión crítica.

3.7.2 Vaporización

La vaporización es el principal proceso mediante el cual una sustancia cambia de estado líquido a gaseoso.

Se denomina ebullición cuando el cambio de estado ocurre por aumento de la temperatura en el interior del líquido; el punto de ebullición es la temperatura a la cual un líquido determinado hierve (a una presión dada), y permanece constante mientras dure el proceso de cambio de estado.

Se le denomina evaporación cuando el estado líquido cambia lentamente a estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial. A diferencia de la ebullición, la evaporación se produce a cualquier temperatura, siendo más rápida cuanto más elevada esta.

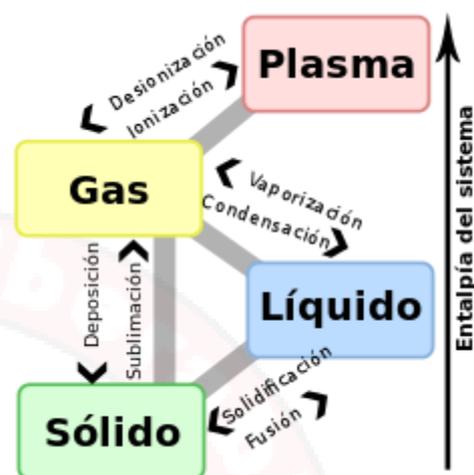


FIGURA diferentes transiciones de fase su relación con la variación de la entalpía.

3.7.3 Entalpía de vaporización

La entalpía de vaporización es la cantidad de energía necesaria para que la unidad de masa (kilogramo, mol, etc.) de una sustancia que se encuentre en equilibrio con su propio vapor a una presión de una atmósfera pase completamente del estado líquido al estado gaseoso. Se representa por ΔH_{vap} , por ser una entalpía. El valor disminuye a temperaturas crecientes, lentamente cuando se está lejos del punto crítico, más rápidamente al acercarse, y por encima de la temperatura crítica las fases de líquido y vapor ya no coexisten.

3.7.4 Accidentes con Evaporación

Tanto para el cálculo de las posibles explosiones de vapor no confinado, como para el cálculo de nubes tóxicas, consecuencia de la evaporación de una sustancia líquida, es preciso conocer la cantidad de gas o vapor que se forma como consecuencia de una fuga de líquido o de líquido y gas.

Los modelos matemáticos intentan predecir la cantidad de gas o vapor que se desprende de un derrame de líquido en determinadas condiciones de presión, temperatura, velocidad del viento, tipo de suelo, etc.

Se pueden almacenar sustancias líquidas a temperatura ambiente (líquidos no hirvientes), que al derramarse forman un charco de líquido que se evapora. También se pueden almacenar sustancias gaseosas en forma líquida por dos procedimientos: almacenándolos a temperatura ambiente (entre 5 y 15 °C aproximadamente) y a una presión mayor que la presión atmosférica (caso de los gases licuados bajo presión), o bien

almacenándolos a presión atmosférica pero enfriándolos hasta su temperatura de ebullición (gases licuados por refrigeración).

Los casos más utilizados en la industria son los almacenamientos de gases licuados bajo presión a temperatura por encima de su temperatura de ebullición a presión atmosférica. Los almacenamientos de gases licuados de petróleo (butano, propano, etc.), como otros tipos de gases muy utilizados en la industria: cloro, amoniaco, oxígeno, etc. son en su inmensa mayoría de este tipo.

Por tanto, hay que distinguir varios casos posibles de vaporización de líquidos:

1. Líquidos sobrecalentados: son los procedentes de líquidos almacenados bajo presión a temperatura mayor que su temperatura de ebullición normal.
2. Líquidos hirvientes: son aquéllos procedentes de gases licuados por enfriamiento.
3. Líquidos no hirvientes: sustancias líquidas almacenadas a temperatura ambiente.

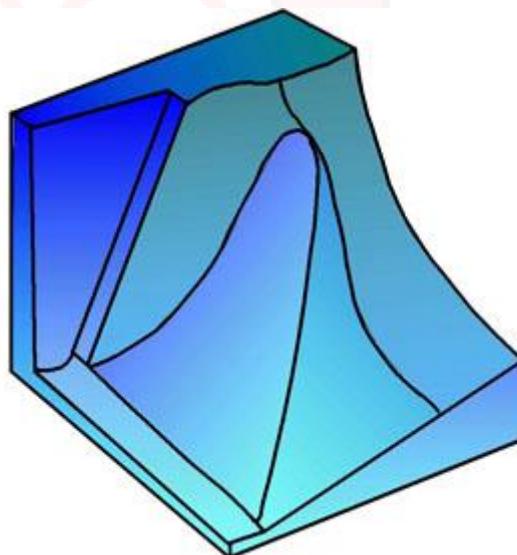
En general, los procesos de transferencia de calor que se producen entre un charco de líquido y el medio hacen que la sustancia pase a la fase de vapor en un tiempo determinado. El esquema simplificado de abajo presenta dichos procesos.

3.7.4.1 Evaporación de líquidos sobrecalentados

Cuando se produce una pérdida de contención o fuga en un depósito con un gas licuado bajo presión en su interior, se produce un descenso súbito de su presión hasta la presión atmosférica. Las presiones de almacenamiento son normalmente las correspondientes a las presiones de vapor a las temperaturas de almacenamiento para todos los gases licuados. Este proceso de pérdida de presión da lugar a una evaporación súbita o "flash" ayudado además por estar sobrecalentado, es decir, por encima de su temperatura de ebullición.

Esta evaporación súbita hace que se arrastren considerables cantidades de líquido con el gas en el momento de la fuga. Parte de este líquido se evapora rápidamente y parte va a formar un charco si el caudal de fuga es considerable y el tiempo es relativamente largo.

Tras esta rápida evaporación inicial, el charco formado enfría el suelo y la evaporación transcurre con mayor lentitud que la inicial. En cualquier caso, el caudal de evaporación depende de las condiciones ambientales, de la presión de almacenamiento (su presión de vapor), temperatura, velocidad del aire, etc.



La evaporación inicial del líquido se calcula a partir del balance de energía, en la que se iguala la cantidad de calor necesario para la evaporación y la cantidad de calor proporcionado por la masa de gas licuado.

$$m_v = m_o \left[1 - e^{-\frac{c_p(T_o - T_{eb})}{h_u}} \right]$$

Donde:

m_v : masa vaporizada en la evaporación rápida inicial (kg)

m_o : masa inicial de gas licuado (kg)

c_p : calor específico del gas licuado [J/(kg ·K)]

h_v : entalpía de vaporización del gas licuado (J/kg)

T_o : Temperatura inicial del gas licuado (K)

T_{eb} : Temperatura de ebullición del gas licuado (K)

Posteriormente a esta evaporación súbita o flash, el resto de la masa total de líquido forma un determinado charco que se encuentra a su temperatura de ebullición, formando lo que se llama un líquido hirviente.

3.7.4.2 Evaporación de líquidos hirvientes

Estas situaciones se producen en la evaporación de derrames de gases licuados por refrigeración (enfriamiento) que se encuentran a su temperatura de ebullición y en la evaporación de derrames procedentes de gases licuados a presión después de la evaporación súbita inicial. La evaporación se produce por la presencia de un líquido que se encuentra a su temperatura de ebullición.

Datos necesarios: temperatura, conductividad y difusividad térmicas del terreno; temperatura de ebullición y entalpía de vaporización del producto derramado; superficie del charco.

Se obtiene la cantidad total evaporada en función del tiempo que dure la evaporación. Dicho tiempo, vendrá fijado por las salvaguardias tecnológicas de la instalación.

Se produce una transferencia de calor entre el suelo y el líquido que depende de las características del sustrato, del líquido, del tiempo transcurrido y de la temperatura del sustrato.

La transferencia de calor es:

$$q_s = \frac{\lambda_s (T_s - T_{eb})}{\sqrt{\pi \alpha_s t}}$$

Donde

q_s : flujo de calor (W/m²)

λ_s : conductividad térmica del sustrato (W/m · K)

T_s : temperatura del sustrato (K)

T_{eb} : temperatura de ebullición del gas licuado (K)

α_s : coeficiente de difusividad del sustrato (m²/s)

t : tiempo transcurrido (s)

El flujo de evaporación en función del tiempo es:

$$m_e = \frac{\lambda_s (T_s - T_{eb})}{h_v \sqrt{\pi \alpha_s t}}$$

Por tanto, la cantidad vaporizada depende en gran medida de las características del suelo. En la tabla adjunta se presentan características de difusividades y conductividades de determinados suelos.

Material del sustrato	Conductividad térmica W/m K	Difusividad térmica $\alpha_s \cdot 10^7$ m ² /s
Suelo arenoso seco	0,32	2,0
Arena seca	0,32	2,3
Suelo arenoso húmedo (> 8%)	0,62	2,3
Suelo ligero seco	0,35	2,8
Suelo medio húmedo (> 8%)	0,94	4,3
Madera	0,24	4,5
Suelo denso seco o ligero húmedo	0,87	5,2
Suelo denso húmedo o mampostería	1,3	6,4
Suelo promedio	0,9	4,3
Hormigón denso	1,73	8,5
Rocas promedio	3,46	10,3
Grava	2,51	11,0
Rocas densas	3,46	12,9
Acero al carbono	45,0	127,0

Tabla.- Propiedades térmicas de sustratos típicos

En la realidad, el tamaño de un determinado charco viene limitado por las barreras arquitectónicas de que disponga la instalación de almacenamiento. Si no existen cubetos, el modelo predice la formación de un charco de forma circular con un determinado espesor. Si existen cubetos de retención, el charco toma una forma igual a la del cubeto.

3.7.4.3 Evaporación de líquidos no hirvientes

Son aquellas sustancias líquidas a temperatura ambiente y que se almacenan a esta temperatura. El resultado es la formación de un charco de líquido no hirviente, a partir del cual tiene lugar una evaporación más o menos intensa. Se aplica un modelo de cálculo aplicable a líquidos a temperatura ambiente almacenados a presión atmosférica.

En estos casos, la evaporación del líquido se produce por la difusión de sus propios vapores, así como del efecto de arrastre del viento. Se describe un modelo simplificado.

Los valores obtenidos mediante este modelo corresponden al estado transitorio y son, por tanto, máximos. En estado estacionario, es el aporte energético el que limita el caudal evaporado, obteniéndose valores menores que los calculados por este modelo.

Datos necesarios: velocidad del viento a 10 metros del terreno y presión atmosférica, temperatura, peso molecular y presión de vapor del líquido; radio del charco (para charcos circulares) o radio equivalente (para charcos contenidos en cubetos); presión parcial del vapor en la atmósfera (normalmente podrá tomarse como nula).

El modelo permite obtener una cota superior para el caudal de evaporación de un líquido subenfriado. Integrando este caudal puede obtenerse la cantidad total evaporada. El tiempo de duración de la evaporación se determinará en función de las salvaguardias tecnológicas de la instalación de que se trate. En ningún caso se postulará una duración tal que se produzca la evaporación de una cantidad de líquido mayor que el derramado.

El flujo másico de evaporación viene dado por la expresión:

$$G_{\text{subenf}} = 2,406 \cdot 10^{-7} u_{10}^{0,78} r_p^{-0,11} \frac{M \cdot P_{\text{atm}}}{T_1} \ln \left[1 + \frac{P_1 - P_{\infty}}{P_{\text{atm}} - P_1} \right]$$

Donde

G_{subenf} : flujo másico de vaporización de líquidos subenfriados ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

u_{10} : velocidad del viento medida a 10 metros del suelo (m/s)

r_p : radio del charco o radio equivalente en charcos dentro de cubetos (m)

M : peso molecular (kg/kmol)

P_{atm} : presión atmosférica (Pa)

T_1 : temperatura de la fase líquida (K)

P_1 : presión parcial de vapor de saturación del líquido que se evapora (Pa)

P_{∞} : presión parcial de vapor del líquido que se evapora en la atmósfera (Pa , normalmente cero)

Para sustancias cuya presión de vapor sea inferior a 20.000 Pa y que no se encuentren inicialmente en la atmósfera, puede utilizarse la expresión simplificada:

$$G_{\text{subenf}} = 2,406 \cdot 10^{-7} u_{10}^{0,78} r_p^{-0,11} \frac{M}{T_1} P_1$$

El caudal de evaporación vendrá dado por:

$$\frac{dm}{dt} = G_{\text{subenf}} \cdot A_b$$

donde

A_b es la superficie máxima que puede ser ocupada por el charco del líquido. Esta superficie del charco viene determinada por la existencia de cubeto u otros obstáculos que impidan la extensión del líquido derramado. Entre dichos obstáculos se encuentran las propias irregularidades del terreno, cuya profundidad media z_t determina el espesor máximo del charco. Si la masa de líquido derramada es m_f la superficie que como máximo puede cubrir el charco se puede estimar como:

$$A_{b_{\text{max}}} = \frac{m_f}{\rho_l z_t}$$

$A_{b_{\text{max}}}$: superficie del charco de líquido que se evapora (m^2)

m_f : cantidad de líquido derramada (kg)

ρ_l : densidad de la fase líquido (kg/m^3)

z_t : espesor máximo del charco (m)

3.8 Dispersión de nubes de gases, vapores y aerosoles: formación de nubes tóxicas e inflamables

Cuando se produce una emisión de un gas o vapor a la atmósfera, ya sea procedente de una fuga de gas propiamente dicha o como consecuencia de la evaporación de un charco de líquido, dicho gas en contacto con la atmósfera sufre una dispersión por dilución del gas en la atmósfera y se extiende en ella arrastrado por el viento y las condiciones meteorológicas.

Los tipos de emisiones, por tanto dependen de la naturaleza del gas (propiedades termodinámicas) y de la continuidad o discontinuidad de la emisión.

Una de las características principales que condiciona la evolución de un gas/vapor en la atmósfera es su densidad, distinguiéndose tres posibilidades:

- Gases ligeros: densidad inferior a la del aire.
- Gases pasivos o neutros: densidad similar a la del aire.



- Gases pesados: densidad mayor que la del aire.

A efectos prácticos no se puede hablar, en la mayoría de los casos, de un comportamiento puro de gas ligero neutro o pesado, ya que los factores que influyen en él son múltiples y variables en el tiempo y una mezcla gas/aire puede evolucionar como un gas pesado sin serlo debido a:

- Peso molecular del gas.
- Temperatura del gas.
- Temperatura y humedad del aire ambiente.
- Presencia de gotas líquidas arrastradas en la emisión.
- Reacciones químicas en la nube, etc.

Otra característica importante es la duración del escape, que puede dar lugar a:

1. Escapes instantáneos formando una bocanada ("puf").
2. Escapes continuos sin depender del tiempo, formando un penacho ("plume").
3. Escapes continuos dependiendo del tiempo.

Los modelos tratan de calcular las concentraciones de gases que se encuentran a una determinada distancia del foco emisor, tanto para gases tóxicos como inflamables, así como las cantidades de gas inflamable que se encuentran entre los límites de inflamabilidad de sustancias inflamables. De este último apartado se trata en el modelo de explosiones de vapor no confinado, UVCE.

Como se ha comentado anteriormente, la dispersión de un gas puede proceder de una fuga de gas de un depósito o tubería a presión y como consecuencia de la fuga de líquido que se evapora. Esto implica analizar el proceso desde dos puntos de vista:

1. Dispersión de chorro turbulento, a partir de una fuga de gas a presión.
2. Dispersión de nube neutra, para gases sometidos únicamente a las turbulencias atmosféricas.

3.8.1 Dispersión de chorro turbulento

Modelo simplificado de chorro de gas o vapor, a partir de una fuga de gas procedente de un depósito o tubería a presión. Para gases inflamables, el modelo se podría aplicar para determinar la longitud de un dardo de fuego, si se produjese la ignición del chorro, además de para la determinación de la dispersión de gas que formaría una hipotética explosión de vapor. Para fugas de gases tóxicos, se requiere posteriormente un análisis de la dispersión atmosférica del gas proveniente del chorro.

El proceso se analiza suponiendo que el impulso del chorro domina el proceso de mezcla de los gases atmosféricos con el gas fugado.

- El gas se comporta como perfecto.

- La temperatura del gas se iguala de manera instantánea a la del aire ambiente.
- La densidad del gas está entre 0,5 y 1,9 kg/m³.
- El efecto del viento es despreciable.
- El orificio de salida es circular.
- El flujo de salida es crítico.

Los datos que se necesitan para la realización del modelo son los siguientes:

1. Coeficiente de contracción de la vena fluida.
2. Presión y temperatura iniciales en la tubería o depósito.
3. Diámetro del orificio de salida
4. Propiedades del gas: peso molecular, viscosidad dinámica, límites de inflamabilidad, relación de calores específicos a presión y volumen constantes

Se comienza calculando el caudal másico de la fuga de gas (Q en kg/s) y seguidamente se verifica la condición de aplicabilidad del modelo:

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot C_D \cdot D \cdot \mu} > 25000$$

Donde:

Re: número de Reynolds (adimensional)

Q: caudal másico de fuga (kg/s)

C_D: coeficiente de contracción de la vena fluida (adimensional)

D: diámetro del orificio de salida (m)

μ: viscosidad dinámica del gas (N·s/m²)

Se definen distintas densidades relativas del gas con respecto a la del aire:

ρ'_{gr}: densidad relativa del gas en el interior de la tubería:

ρ'_o: densidad relativa del gas en el orificio

ρ'_{oeq}: densidad relativa equivalente del gas en el orificio de salida, asumiendo expansión adiabática

ρ'_{ga}: densidad relativa del gas en condiciones ambiente

Se determina el diámetro de orificio equivalente para que se conserve el balance de masa:

$$D_{eq} = D_{sal} \left(\frac{\rho_o'}{\rho_{oeq}'} \right)^{1/2}$$

Suponiendo que la dispersión transversal del gas sigue una distribución exponencial, se calcula la concentración volumétrica de gas en un punto con la expresión:

$$C(x, y) = C(x, 0) \exp \left[-b_2 \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right]$$

Siendo $C(x, 0)$ la concentración de gas sobre el eje del chorro a una distancia x del orificio, que se calcula como:

$$C(x, 0) = \frac{1 + \frac{b_2}{b_1}}{0,32 \frac{x}{D_{eq}} \frac{\rho_{ga}'}{(\rho_{ga}')^{1/2}} + 1 - \rho_{ga}'}$$

y b_1 y b_2 parámetros de ρ_{ga}' que vienen dados por las siguientes expresiones:

$$b_1 = 50,5 + 48,2 \cdot \rho_{ga}' - 9,95 \cdot (\rho_{ga}')^2$$

$$b_2 = 23 + 41 \cdot \rho_{ga}'$$

Todas estas ecuaciones son válidas solamente para gases cuya densidad esté dentro del rango comentado en las hipótesis.

3.8.2 Dispersión de nube neutra: modelo gaussiano de difusión

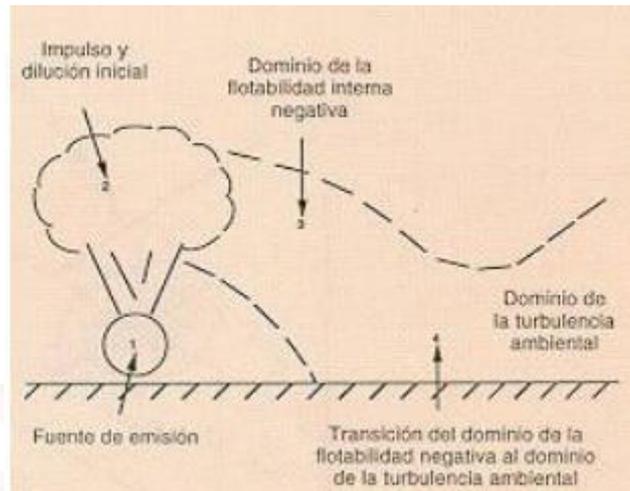
Se utiliza un modelo gaussiano de dispersión de contaminantes y se analiza la difusión atmosférica de éstos. Así podremos conocer la concentración de los contaminantes en función de la localización de un punto respecto a la fuente, de la variable tiempo, condiciones meteorológicas, topografía del terreno, etc.

El modelo gaussiano de fuente puntual continua que se va a tratar en este documento supone como hipótesis de partida que las concentraciones de contaminante en cualquier punto considerado viento abajo están estabilizadas y no dependen del tiempo. Este modelo describe el comportamiento de los gases/vapores de fuerza ascensional neutra, dispersados en la dirección del viento y arrastrados a la misma velocidad, es lo que se denomina modelo de Pasquill-Guifford para bocanadas de gases neutrales. Los modelos gaussianos son, en la mayoría de los casos, los más recomendables.

El modelo requiere de una serie de simplificaciones:

- La densidad del gas es superior a la del aire.

- No se tienen en cuenta las posibles acumulaciones de sustancias que pueden producirse.
- No es aplicable para velocidades del viento menores a 0,5 m/s, puesto que se enmascara el efecto de turbulencia.
- Las clases de estabilidad atmosférica no se pueden aplicar a dispersiones de gases sobre el mar.
- No se tienen en cuenta posibles reacciones del gas en el interior de la nube.
- Condiciones meteorológicas adversas: nieblas, calmas prolongadas.
- Topografía complicada: terrenos muy irregulares, grandes elevaciones cerca del foco emisor.



En definitiva han de emplearse siempre que ello sea posible, conjuntamente con medidas experimentales que sirvan para su validación y calibración.

Los datos necesarios para la ejecución del modelo son los siguientes:

1. Velocidad del viento y categoría de estabilidad atmosférica.
2. Posición en la que se requiere determinar la concentración.
3. Altura del punto de emisión.
4. Dimensiones aproximadas de la fuente: fuente puntual para sustancias tóxicas y bocanada instantánea para gases inflamables.
5. Tiempo de duración de la emisión.
6. Características de rugosidad del terreno.
7. Límites de inflamabilidad para sustancias inflamables

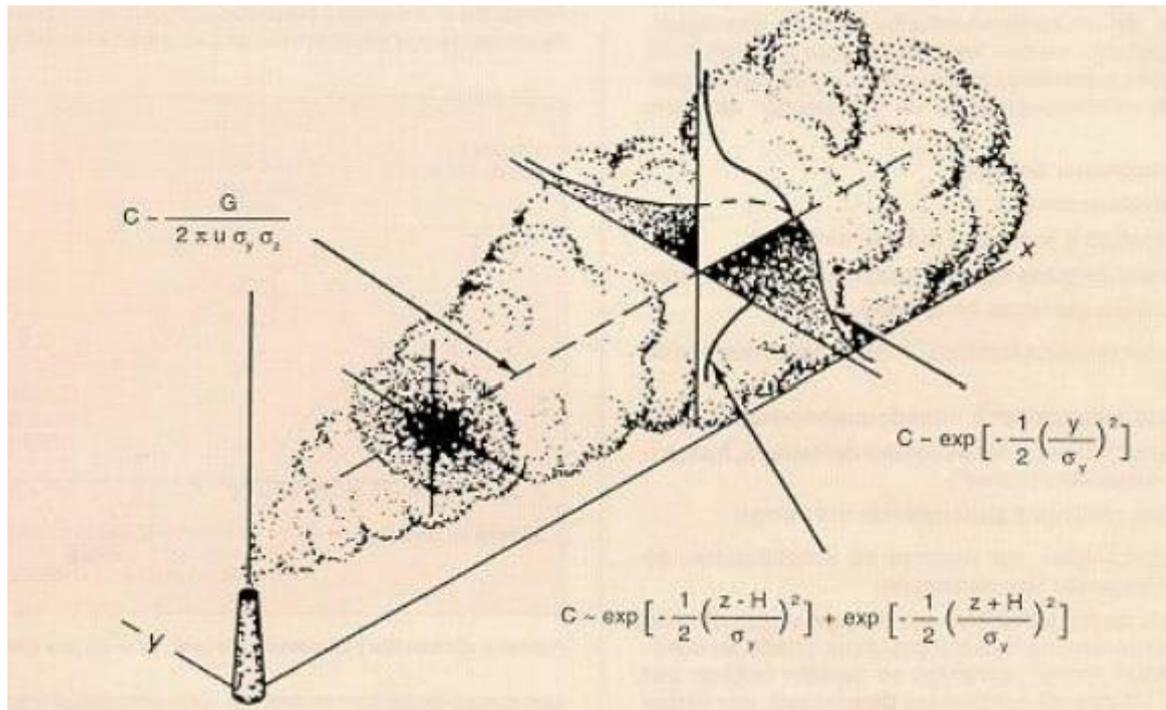


FIGURA Los tres términos de la ecuación gaussiana del penacho: concentración en el eje central y términos vertical y lateral

Se determina la distribución de concentraciones de nubes de gases:

- Para gases tóxicos o contaminantes: determinación de zonas en donde se superan los umbrales de peligrosidad definidos.
- Para gases inflamables: determinación de las zonas en las que el gas se encuentra en condiciones de deflagrar que es la concentración comprendida entre los límites de inflamabilidad.

3.8.2.1 Determinación de la cantidad de gas que deflagra.

$\sigma_y, \sigma_z^*, \sigma_x$: coeficientes de difusión en los tres ejes del espacio. Se calculan a partir de las curvas de Pasquill-Guifford según el tipo de estabilidad atmosférica existente.

Las ecuaciones del modelo gaussiano son, en forma resumida,

Fuente puntual continua

$$C(x,y,z) = \frac{M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]$$

Fuente puntual instantánea

* Velocidad del viento < 1m/s

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{(2\pi^{3/2})\sigma_y\sigma_z\sigma_x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right]\right\}$$

* Velocidad del viento > 1 m/s

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right]\right\}$$

M: tasa de emisión de contaminantes (g/s)

U: velocidad del viento (m/s)

Los coeficientes σ_y , σ_x son las dispersividades en las direcciones x e y respectivamente, mientras que σ_z^* es la dispersividad vertical corregida. Dichas dispersividades se determinan mediante las expresiones:

$$\sigma_x = 0,13 x$$

$$\sigma_y = a x^b$$

$$\sigma_z = c x^d$$

Los parámetros a, b, c, y d dependen de las categorías de estabilidad. Las dispersividades así determinadas son válidas para distancias del emisario comprendidas entre 100 y 10.000 m.

La dispersividad vertical corregida es la que tiene en cuenta la topografía del terreno al que se aplica el modelo gaussiano y se relaciona con la σ_z mediante las expresiones:

$$\sigma_z^* = C_{z0} \sigma_z$$

$$C_{z0} = (10 z_0)^{0,53 x - 0,22}$$

El valor z_0 introduce una aproximación a la rugosidad del terreno, distinguiendo varios casos posibles.

Categoría de rugosidad del terreno	Ejemplos	Zo(m)
Tierra llana	Huerta con pocos árboles	0,03
Tierra cultivable	Cultivos, huertas con árboles, aeropuertos	0,10
Tierra cultivada	Área abierta con matorrales, casas dispersas	0,30
Zona residencial	Área con edificación densa pero baja, bosques, instalaciones industriales bajas	1,0
Zona urbana	Ciudad con edificios altos, instalaciones industriales con obstáculos elevados	3,0

Valores típicos de la rugosidad del terreno

La aplicación del modelo será función de la distancia en la dirección del viento (coordenada x) del punto en el que se desee determinar la concentración, de la velocidad del viento (u), del tiempo de duración de la emisión (t), así como de las cotas de los puntos en los que se determina la concentración.

Una de las variables meteorológicas más importantes es la determinación de la estabilidad atmosférica. La estabilidad atmosférica es una variable que nos indica las condiciones en las que se encuentra la atmósfera desde el punto de vista de la dispersión de vapores. Atmósferas estables indican poca dispersión y atmósferas inestables indican mejores condiciones para la dispersión.

En la tabla se resumen las categorías de estabilidad de Pasquill, dependiendo de determinadas condiciones atmosféricas.

Velocidad del viento km/h (m/s)	DÍA			NOCHE	
	Grado de insolación			Cantidad de nubes	
	Alta	Moderada	Ligera	≥ 4/8 **	≤ 3/8
≤ 7,24 (2,01)	A	A-B	B	--	--
7,24 (2,01) -- 10,78 (3)	A-B	B	C	E	F
10,78 (3) -- 18,02 (5)	B	B-C	D	D	D
18,02 (5) -- 21,56 (6)	C	C-D	D	D	D
> 21,56 (6)	C	D	D	D	D
Notas					
* Se aplica siempre a cielos cubiertos de día o de noche					
**Gradación del cielo cubierto medida en octavos de cielo que está cubierto por nubes					
A: Condiciones muy estables			D: Condiciones neutras*		
B: Condiciones inestables			E: Condiciones estables		
C: Condiciones ligeramente inestables			F: Condiciones muy estables		

Tabla de estabildades atmosféricas según la velocidad del viento considerada

El resultado del modelo permite obtener las distancias a las que se dan concentraciones peligrosas, así como obtener isopletas (líneas que unen puntos de la misma concentración).

En el caso de sustancias inflamables, integrando la expresión general sobre el volumen en el que la concentración del gas se halla entre los límites de inflamabilidad proporciona la máxima cantidad de materia inflamable en condiciones de deflagrar en función del tiempo. Este dato es el que se utiliza para la determinación de las explosiones de vapor no confinadas.

Por otra parte, se puede determinar la cantidad de gas que existe entre los límites de inflamabilidad a partir de estos valores para cada sustancia concreta.

La tabla de abajo presenta algunas características de inflamabilidad de determinadas sustancias

Sustancia	L. I. I. aire (% vol.)	L. S. I. aire (% vol.)	Punto de inflamación (°C)	Temperatura de autoignición (°C)	Reactividad
Acetaldehído	4,0	60,0	-40	140	media
Acetileno	1,5	100	<-84	305	alta
Acetato de vinilo	2,6	13,4	-8	385	alta
Amoniaco	15,0	29,0	<-33	630	baja
Acrilonitrilo	2,8	28,0	-5	480	media
Benceno	1,2	8,0	-11	555	media
Bromuro de metilo	8,6	20,0	<4	535	baja
Butano	1,9	8,5	-138	365	media
1,3-Butadieno	1,4	16,3	-85	415	media
1-Buteno	1,6	10,0	-185	380	media
Cloruro de vinilo	3,6	31	-77	470	media
Dimetilamina	2,6	12,3	-18	390	baja
Epiclorhidrina	2,3	34,4	28	385	baja
Etano	3,0	12,5	<-89	515	media
Etanol	3,4	19,0	12	370	media
Etileno	2,7	34,0	-121	425	media
Formaldehído	7,0	73,0	-67,2	430	alta
Gasolina	0,6	8,0	<-20	220	media
Hexano	1,2	7,8	-22	240	media
Hidrógeno	4,0	76,0	--	400	alta
Metano	5,0	16,0	<-161	537	baja
Monóxido de carbono	12,0	75,0	<-191	605	baja
Nafta	1,0	7,5	>28	280	alta
Óxido de etileno	2,6	100	-18	429	alta
Óxido de propileno	1,9	37,0	-37	550	alta
Propano	2,1	9,5	-187	470	media
Propileno	2,0	11,1	-108	460	media
Tolueno	1,2	7,0	4	535	media
Sulfuro de carbono	1,0	60,0	-40	100	alta
Sulfuro de hidrógeno	4,0	46,0	<-60	260	alta

Características de inflamabilidad y reactividad de algunas sustancias más utilizadas

Con los resultados obtenidos para gases tóxicos, se podrá determinar en qué puntos la concentración de la sustancia tóxica superaría la IPVS (Concentración de tóxico inmediatamente peligrosa para la vida y la salud), o un tanto por ciento determinado de él, con lo que definimos las zonas de riesgo.

3.9 Explosiones de vapor no confinadas (UVCE)

Las explosiones que se consideran aquí, son las denominadas explosiones de nubes de vapor no confinadas, traducción de la expresión inglesa Unconfined Vapour Cloud Explosión, y de ahí su acrónimo UVCE, que de ahora en adelante utilizaremos.

Se puede definir como deflagración explosiva de una nube de gas inflamable que se halla en un espacio amplio (aunque con ciertas limitaciones), cuya onda de presión alcanza una sobrepresión máxima del orden de 1 bar en la zona de ignición.

Este tipo de explosiones se originan debido a un escape rápido de gran cantidad de gas o vapor inflamable que se dispersa en el aire o por evaporación rápida de un líquido inflamable para formar una nube de características inflamables mezclada con el aire. Cuando un gas inflamable se encuentra una fuente de ignición (normalmente superficies calientes, chispas, motores eléctricos, etc.), una parte de esta masa de gas (la que se encuentra entre los límites de inflamabilidad de la sustancia de que se trate), deflagra por efecto de la fuente de ignición y se produce la explosión. Normalmente son deflagraciones y en raras ocasiones se transforman en detonaciones.



Puede que no llegue a alcanzarse la deflagración, con lo que se originaría una llamarada, incendio súbito de nube de gas, incendio flash o "flash fire". La frontera entre este tipo de situaciones no está muy clara y depende de la velocidad de combustión de la mezcla, las características del vapor. En estos incendios flash, los efectos de presión son despreciables frente a los efectos térmicos derivados de la inflamación de la mezcla vapor inflamable-aire.

El modelo parte de los resultados que se derivan de la dispersión de los vapores inflamables. Se calcula la cantidad de gas que existe entre los límites de inflamabilidad de la sustancia de que se trate, lo que determina un volumen de gas inflamable. Si antes de que se produzca la dispersión total de una nube inflamable, ésta encuentra un punto de ignición, se producirá su explosión, que generará unas ondas de presión causadas por la expansión/contracción del aire.

Se utiliza el modelo de Sachs, mediante la correlación de la sobrepresión directa máxima y del impulso con la energía y velocidad de propagación de la llama de la deflagración. Este método proporciona una estimación del efecto según la distancia para una explosión grave de hidrocarburos que puedan proporcionar hasta $5 \cdot 10^{12}$ J de energía.

El modelo se basa en correlaciones empíricas. Si la energía total de explosión es mayor que $5 \cdot 10^{12}$ J, no hay suficiente información para los efectos del daño. Para valores bajos de la energía total de explosión hay suficientes datos como para hacer una estimación.

Entalpía de combustión y concentración estequiométrica de la sustancia que deflagra.

Velocidad del sonido en las condiciones del accidente.

En primer lugar, se determina la longitud característica de Sachs mediante la expresión:

$$LS = \left[\frac{V_0 E_c}{P_{atm}} \right]^{1/3}$$

En la que V_0 es el volumen ocupado por una mezcla estequiométrica de la masa que deflagra con aire, y E_c la energía de combustión por unidad de volumen, que para una mezcla estequiométrica es aproximadamente de $3,5 \times 10^6$ J/m³.

LS: Longitud característica de Sachs (m)

V_0 : Volumen ocupado por mezcla estequiométrica de la masa que deflagra con aire (m^3)

E_c : Energía de combustión por unidad de volumen (aproximadamente $3,5 \cdot 10^6$ J/ m^3)

P_{atm} : Presión atmosférica (P_a)

Entonces, la sobrepresión máxima directa relativa de Sachs puede determinarse mediante:

$$PS = c \frac{LS}{r}$$

PS: Presión reducida de Sachs (P_a)

c: Constante de reactividad del producto

LS: Longitud característica de Sachs (m)

r: Distancia (m)

El valor de la constante c depende de la reactividad de la sustancia que deflagra. Así se establece una clasificación en sustancias de reactividad baja, media y alta basándose en la velocidad de llama. En caso de no conocerse la reactividad de la sustancia, se considerará alta. El siguiente cuadro muestra el valor de c para cada una de las categorías de reactividad.

Reactividad	c
baja	0,02
media	0,06
alta	0,15

A partir de la sobrepresión de Sachs, puede determinarse la sobrepresión máxima directa como:

$$\Delta p = P_{atm} \cdot PS$$

Por otra parte, se determinan la duración característica de Sachs y la duración de la fase de sobrepresión positiva. A partir de ahí se determina el impulso específico por unidad de volumen transmitido por la onda de presión:

$$I = \frac{\Delta p t_+}{2}$$

I: Impulso específico de la onda de presión (Pa · s)

t_+ : Duración de la fase de sobrepresión positiva (s)

Δp : Sobrepresión (Pa)

3.10 Dardo de fuego (jet fire)

Tanto en las conducciones como en los depósitos de gas a presión, la aparición de una pequeña fisura en las paredes trae como consecuencia la descarga del gas contenido formando un chorro de gas a presión. Si durante la descarga este chorro entra en contacto con una fuente de ignición, el resultado será la formación de un incendio en forma de chorro o, como normalmente se le llama, dardo de fuego o "jet fire".



Los efectos de este tipo de accidentes son fundamentalmente los causados en el entorno por el calor generado e irradiado desde el dardo.

Para modelizar el dardo de fuego se ha utilizado el modelo de Chamberlain (1987) propuesto por el "Yellow Book" del TNO. Este modelo calcula tanto la forma del dardo, representado como un cono truncado; como la radiación superficial emitida por dicho cono, considerado como cuerpo sólido.

A partir de la radiación superficial emitida desde el dardo, y junto con el cálculo del factor de visión y la transmisividad atmosférica determinamos tres distancias que nos delimitan zonas de peligrosidad de la radiación emitida por el dardo:

Zona de intervención: delimita la zona alrededor del dardo de fuego sometida a una radiación de 5 kW/m^2 con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos.

Zona de alerta: delimita la zona alrededor del dardo de fuego sometida a una radiación térmica de 3 kW/m^2 .

Zona de efecto dominó: se refiere a la zona donde elementos cercanos al punto de fuga pueden llegar a sufrir daños importantes por efecto de la radiación térmica generada por el propio dardo, como para dar lugar a nuevos accidentes. Por ejemplo, si un depósito de propano estuviese dentro de esta zona, podría dar lugar a un BLEVE. En el caso del análisis de consecuencias en gasoductos, al no existir otros equipos próximos, este resultado quedará anulado.



Las hipótesis de partida que utiliza el modelo son las siguientes:

- No se tiene en cuenta la formación de hollín en la combustión de los gases, ni por tanto su influencia sobre el poder emisor superficial del dardo.
- La transmisividad atmosférica es debida únicamente al vapor de agua presente, despreciándose el efecto del dióxido de carbono y otros gases.

Limitaciones

- El modelo no es capaz de calcular con certeza lo que ocurre en la sombra de la llama, ya que ésta está elevada del suelo.
- Las distancias calculadas representan la hipótesis más grave posible dentro del supuesto incidental estudiado, no teniéndose en cuenta la dirección hacia la que está orientado el dardo. Estas distancias se dan como radios desde el lugar de la fuga, quedando incluidos dentro de las distintas zonas de peligro lugares no afectados por la radiación prevista por el modelo.

Datos necesarios

- **Datos de la sustancia descargada:** Peso molecular, temperatura de llama, calores específicos a presión y volumen constante, coeficiente de Poisson y calor de combustión.
- **Datos del almacenamiento o tubería:** Presión y temperatura en tubería y/o almacenamiento.
- **Datos de condiciones ambientales:** Temperatura, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento y humedad relativa.

El modelo calcula las dimensiones físicas del dardo de fuego y la radiación térmica que sufriría un receptor a una distancia determinada. Dicho de otro modo, la distancia a la cual un objeto está expuesto a una determinada radiación térmica.

3.10.1 Cálculo del diámetro efectivo de la fuente

Determinación de la velocidad de salida del dardo

$$u_j = M_j \sqrt{\frac{\gamma R_c \cdot T_j}{W_g}} \quad [\text{m/s}]$$

R_c : constante de los gases ideales (8,314 J/mol°K)

W_g : peso molecular del gas (kg/mol)

T_j : temperatura de salida del dardo = $T_{\text{atm}} \left(\frac{P_{\text{atm}}}{P_e} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

M_j : número de Mach = $\sqrt{\frac{2 \left(\frac{P_e}{P_{\text{atm}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 2}{\gamma-1}}$

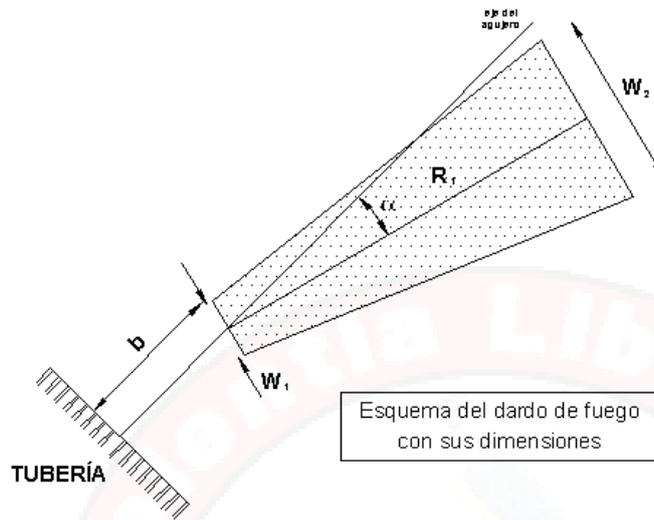
3.10.2 Determinación del diámetro efectivo de la fuente

NOTA: el diámetro efectivo de la fuente representa el diámetro de la garganta en una tobera imaginaria por la que se descarga un caudal de aire igual al de la descarga del gas en cuestión.

$$[m] \quad D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot m'}{\pi \cdot \rho_{\text{air}} \cdot u_j}}$$

$$\rho_{\text{air}}: \text{densidad del aire} = \frac{P_{\text{atm}} \cdot W_{\text{air}}}{R_c \cdot T_{\text{atm}}}$$

W_{air} : peso molecular del aire (kg/mol)



3.10.3 Cálculo de la forma del dardo

Longitud del dardo sin viento

$$L_{b0} = Y \cdot D_s \text{ [m]}$$

Zona de no ignición del dardo (lift-off)

$$b = \left[0,185 \cdot e^{(-20R_w)} + 0,015 \right] \cdot L_b$$

Longitud del dardo

$$R_1 = \sqrt{L_b^2 - b^2 \cdot \text{sen}^2 \alpha} - b \cdot \text{cos} \alpha$$

3.10.4 Cálculo del calor generado por combustión

$$Q = m' \cdot \Delta H_c \text{ [J/s]}$$

donde: ΔH_c : entalpía de combustión (J/kg)

3.10.5 Cálculo del poder emisor superficial

$$SEP = \frac{F_s \cdot Q}{A} \text{ [J/m}^2\text{s]}$$

con F_s : (fracción de calor radiado desde la superficie del dardo) = $0,21 \cdot e^{(-0,00323u_j)} + 0,11$

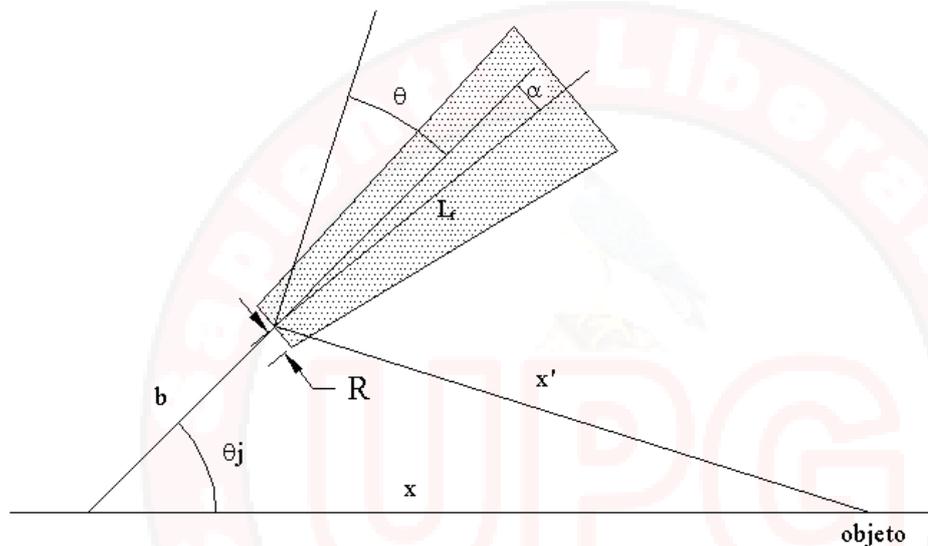
3.10.6 Cálculo del flujo de calor recibido a una distancia determinada

Determinación de la transmisividad atmosférica

$$\begin{aligned} \text{Si } 2 \cdot 10^4 < P_v \cdot x < 10^7 & \quad \tau_a = 1,3940 - 0,1366 \cdot \log(P_v \cdot x) \\ \text{Si } P_v \cdot x < 2 \cdot 10^4 & \quad \tau_a = 1,491 - 0,2164 \cdot \log(P_v \cdot x) + 0,0132 \cdot \log^2(P_v \cdot x) \end{aligned}$$

Determinación del factor de visión

El factor de visión lo calculamos según la siguiente geometría:



$$F_g = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}$$

Cálculo del flujo de calor a una determinada distancia

$$q(x) = SEP \cdot F_v \cdot \tau_a \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Este modelo nos servirá por tanto para cualquier tipo de fugas en tubería o depósito, siempre que conozcamos la presión en el interior y podamos suponer que ésta permanece constante.

Con él, podremos estimar tanto las dimensiones del dardo de fuego formado, como la radiación que llegaría a distintas distancias o, de otro modo, la distancia a la que nos llega una determinada radiación.

3.11 Incendios de charco (pool fire)

Como consecuencia de un derrame, fuga o escape de líquidos inflamables, se forma un charco de líquido cuya extensión dependerá de la geometría y naturaleza del suelo. Por evaporación se generan gases inflamables si la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de ignición de la sustancia, lo que puede conducir a un incendio del

propio charco. Al incendiarse se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión.

El incendio también puede tener lugar en el interior de un tanque de almacenamiento de líquidos inflamables.

Los efectos perniciosos de estos accidentes son fundamentalmente de dos tipos:

- La radiación térmica generada por los incendios.
- Los efectos de los posibles gases tóxicos generados en la combustión.



El modelo que proponemos permite calcular la velocidad de combustión y la radiación térmica que sufre un receptor sometido a un determinado incendio. Se estudian los incendios de líquidos que arden en forma circular o alargada (dentro de los cubetos).

Se utilizan modelos basados en ecuaciones semiempíricas clásicas para determinar la velocidad de combustión, que combinadas con otras determinan la radiación térmica y el flujo térmico incidente.

El cálculo de la emitancia y la emisividad específica de la llama, así como el factor de visión y la absorción de la radiación por el humo y la atmósfera (fundamentalmente debido a la humedad relativa) conducen a los resultados finales de la radiación de calor a distintas distancias.

En concreto, se estudian los modelos tipo "charco" circulares. En el caso de charcos dentro de cubetos, se realiza como si fuera un charco circular, a partir de la superficie equivalente del charco.



Este modelo sólo ha sido validado para el caso de incendios en estado estacionario sobre tierra. No se considera el incendio sobre agua. Se supone también que la llama es de forma cilíndrica. No obstante, puede ser aplicado también a llamas de base rectangular si la relación entre el lado mayor y el menor es menor de dos.

El modelo no tiene en cuenta la influencia sobre el poder emisor de la llama de la posible formación de hollín, ni la influencia del viento sobre la forma y dimensiones de ésta.

Datos necesarios :

- Entalpías de vaporización y combustión del producto que arde, así como su temperatura de ebullición normal y el calor específico.
- Densidad del aire y presión parcial de vapor de agua.
- Diámetro equivalente de la llama.

En primer lugar se determina el flujo másico de evaporación en la superficie del charco como:

a) Para líquidos muy volátiles (punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente):

$$G_{ev} = 10^{-3} \frac{H_c}{H_v}$$

G_{ev} : flujo másico de evaporación [kg/m²]

H_c : entalpía de combustión [J/kg]

H_v : entalpía de vaporización [J/kg]

b) Para líquidos con punto de ebullición superior a la temperatura ambiente:

$$G_{ev} = \frac{10^{-3} H_c}{c_1 (T_b - T_1) + H_v}$$

c_1 : calor específico del líquido [J/(Kg K)]

T_b : punto de ebullición normal [K]

T_1 : temperatura del líquido [K]



Si no hubiese obstáculos que impidiesen la extensión del charco de líquido, la máxima superficie que éste podría llegar a ocupar sería:

$$A_{b_{max}} = \frac{dm/dt}{G_{ev}}$$

dm/dt : caudal másico de fuga [kg/s].

La superficie del charco que deberá considerarse en los cálculos será el valor mínimo entre el valor anterior y el área delimitada por los obstáculos que impidan la extensión del charco de líquido derramado.

Conocido el diámetro de la llama (que se corresponderá con el diámetro del charco o el diámetro equivalente del cubeto que arde), puede determinarse la "esbeltez" de la llama como:

$$\frac{L}{D} = 42 \left[\frac{G_{ev}}{\rho_{aire} \sqrt{g D}} \right]^{0,45}$$

ρ_{aire} : densidad del aire (normalmente 1,232 Kg/m³)

D : diámetro de la llama [m]

g : aceleración de la gravedad (9,8 m/s²)

L : altura de la llama [m]



De la relación anterior podemos despejar el valor de L para, sustituyéndolo en las expresiones de la figura siguiente, calcular los factores de visión horizontal y vertical de un elemento de superficie:

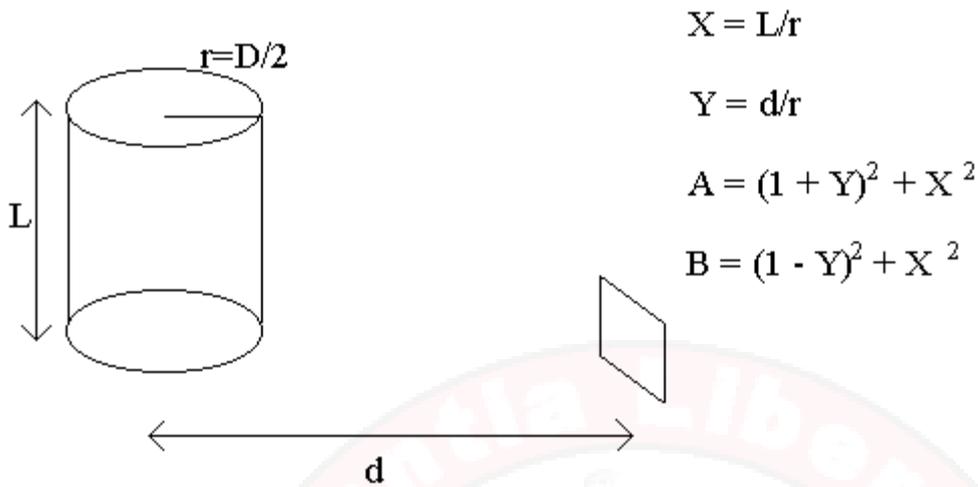


FIGURA 1.- Geometría del incendio de charco con llama cilíndrica

El factor de visión máximo para una superficie será:

$$F_{\max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

La transmitancia atmosférica global se determina como una función del producto de la presión parcial de vapor de agua en la atmósfera y la distancia entre la llama y el punto donde se quiere determinar el flujo de radiación.

En ausencia de información fiable se tomará la transmitancia igual a la unidad. Finalmente, el flujo radiante global que alcanza a una superficie expuesta es:

$$q/A = \tau F_{\max} E$$

La duración del incendio (siendo m la masa total derramada) se estimará en la siguiente cantidad:

$$t_c = \frac{m}{A_b G_{ev}}$$

3.12 Fugas en recipientes y conducciones

La mayoría de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, comienzan con una fuga de su lugar de confinamiento (depósitos, tuberías, reactores, válvulas, bombas, etc.), por lo que hay que prestar una especial atención a este fenómeno.

Hay que distinguir tres tipos de fugas atendiendo al fluido de que se trate:

1. Fugas de líquidos: derrames de sustancias líquidas de un continente cuando el fluido permanece líquido durante el proceso.

2. Fugas de gas/vapor: escapes de sustancias en fase gas de un continente. El cálculo exige tratamientos distintos si el fluido almacenado es gas a presión o si es un vapor en equilibrio con un líquido.
3. Fugas bifásicas: mezclas de gas y líquido a menudo resultantes de la ebullición del líquido en las condiciones de descarga.

Según la duración y tamaño del escape:

- Fuga instantánea: colapso del recipiente por vertido muy rápido de su contenido.
- Fuga continua o semicontinua: pérdida de contenido de magnitud y duración limitadas.

El objetivo principal de un modelo de fugas adecuado consiste en describir correctamente dos variables:

- La cantidad de fluido liberada, y
- Las condiciones de presión y temperatura de la sustancia fugada.

Este último aspecto es el más difícil de considerar, puesto que en las fugas se producen procesos de transferencia de energía entre el continente y su entorno. La simplificación de estas transferencias de energía hace que los modelos aplicados traten dos tipos de procesos:

- a) **Adiabático:** es aquel proceso que se realiza sin transferencia de calor con el exterior. Se produce cuando el fluido sufre grandes cambios de densidad muy rápidamente o cuando el recipiente está térmicamente aislado. Es el caso de los procesos en los que el calor que recibe el recipiente desde el exterior, durante el tiempo que dure la fuga, es prácticamente despreciable frente a la energía del fluido que contiene el recipiente.
- b) **Isothermo:** es aquél que se produce sin cambio de temperatura. Se suele producir cuando no hay cambios importantes de densidad (líquidos), o el proceso es lento y el fluido en el recipiente tiene una inercia térmica suficiente o cuando la presión en el recipiente se mantiene casi constante durante la fuga.

Para estudiar la emisión debe conocerse la fase en que sale del recipiente. Como norma general puede adoptarse la siguiente: si el escape procede de un recipiente que contiene líquido a presión, normalmente saldrá líquido si la abertura está por debajo del nivel de líquido y vapor o mezcla de vapor y líquido si está por encima del nivel del líquido. Además debe tenerse en cuenta que para una diferencia de presión dada, el caudal másico de emisión es normalmente mucho mayor para un escape en fase líquida o mezcla de vapor y líquido que para gas o vapor. En la figura se muestran los tres tipos de fugas concurrentes en un almacenamiento de gas licuado.

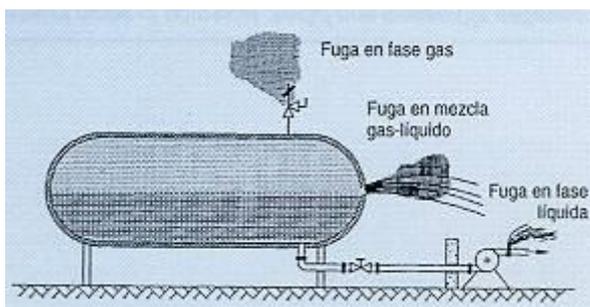


FIGURA Tres tipos de fugas en almacenamiento de gases licuados

3.12.1 Fugas de líquidos

Para el estudio de estos casos, es necesaria la resolución de las ecuaciones que se obtienen a partir de los balances de masa y energía que sirven para determinar la cantidad de líquido fugada.

En el caso de flujos de líquidos procedentes de recipientes, la presión en el punto de fuga se considerará igual a la suma de la presión sobre la superficie del líquido más la presión hidrostática del peso de la columna de líquido hasta el agujero de salida.

El modelo usado comporta las siguientes hipótesis para la realización de los cálculos:

- No existen entradas o salidas de fluidos desde el recipiente o equipo, distintas a las de la fuga.
- El orificio por el que se produce la fuga se asimila a uno circular cuyo diámetro es pequeño con respecto al diámetro del recipiente o equipo y grande con respecto al espesor de la pared.
- No existen gradientes de temperatura en el fluido interior contenido en el recipiente o equipo.
- La superficie libre del líquido es horizontal.
- Los gases y vapores se comportan como gases perfectos.
- Los vapores se separan perfectamente y no arrastran gotas de líquido.
- Los cambios de estado en el interior del recipiente, equipo o cisterna son adiabáticos y en los procesos isoterms no ocurren cambios de fase.
- La presión del producto fugado en un punto suficientemente alejado del de la fuga, es la atmosférica.
- Los líquidos son sustancias puras o asimilables a sustancias puras.

Los recipientes o cisternas para los que se calcula idealmente en el desarrollo del modelo son prismáticos verticales. Para otras geometrías, deben tenerse en cuenta ciertas recomendaciones del modelo.

3.12.1.1 Datos a suministrar para la realización del modelo

1. Coeficiente de contracción de la vena fluida. Para orificios situados en la pared del recipiente, equipo o cisterna y por el estudio de ciertas experiencias de estudios anteriores, hemos tomado el valor de 0,6.
2. Densidad, calor específico y calor de vaporización del líquido, evaluados a una temperatura media estimada previamente, entre las correspondientes a los instantes inicial y final.
3. Presión y temperatura iniciales.
4. Alturas del nivel inicial del líquido y del orificio de salida.
5. Área efectiva del orificio u agujero que se supone puede ocurrir en el accidente.

3.12.1.2 Aplicación y resultados

Para la aplicación de los modelos anteriormente descritos sobre cálculos de fugas, deben hacerse las correspondientes hipótesis de los procesos que posiblemente van a ocurrir (adiabático o isotérmico) y que caracterizan la evolución de la fuga. En nuestro caso, como hemos dicho el proceso será isotérmico. En cualquier caso, el resultado que se obtiene es la cantidad total descargada durante el tiempo estimado de duración de la fuga.

La duración de la fuga vendrá limitada por los tiempos de respuesta ante emergencias de los equipos de socorro, emergencia o Bomberos, o por las posibles salvaguardias tecnológicas de los equipos. En particular, las válvulas de presión-vacío, las válvulas de exceso de flujo y otros dispositivos de seguridad.

Si la fuga se desarrolla, o va seguida de un incendio, se suele considerar que ésta persiste hasta el vaciado total del recipiente, equipo o cisterna, ya que el acceso de los equipos de emergencia al recipiente ardiendo, se verá enormemente dificultada por los efectos de la radiación térmica derivados del incendio.

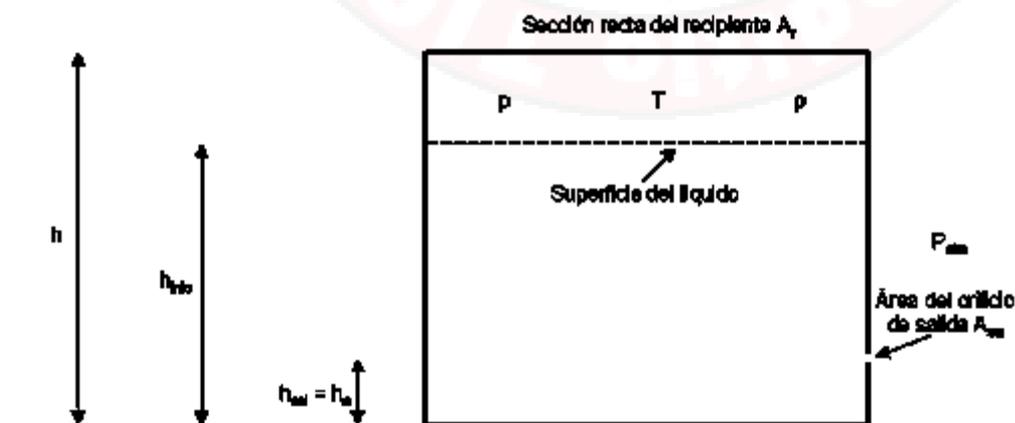
3.12.1.3 Descripción

El modelo se basa en la aplicación de la ecuación de balance de masa y de cantidad de movimiento y energía de la ecuación de Bernoulli al esquema de un depósito de almacenamiento de líquido de la figura de abajo.

$$p + \rho gh + \left(\rho v^2 / 2 \right) = \text{cte.}$$

donde:

- p: presión absoluta (Pa)
- ρ : densidad del líquido (kg/cm³)
- h: altura respecto a un nivel de referencia (m)
- g: aceleración de la gravedad (m/s²)
- v: velocidad del líquido (m/s)



Esquema del sistema utilizado para el estudio de fuga de líquido

La combinación de estas ecuaciones nos da el caudal instantáneo de salida en función de las propiedades del fluido, presión en el recipiente y niveles de líquido y del orificio de salida:

$$\frac{dm}{dt} = C_D A_{sal} \rho_1 \left\{ 2 \left[\frac{p - p_{atm}}{\rho_1} \right] + g(h - h_{sal}) \right\}^{0.5}$$

donde:

- m: cantidad de líquido fugado (kg)
- C_D: coeficiente de contracción de la vena fluida (adimensional)
- A_{sal}: superficie del orificio (m²)
- ρ: densidad del líquido (kg/cm³)
- p: presión (Pa)
- p_{atm}: presión atmosférica (Pa)
- g: aceleración de la gravedad (m/s²)
- h_{sal}: altura del punto de emisión (m/s)

Si la materia estaba almacenada como líquido bajo presión y su temperatura era superior a su punto de ebullición normal, la caída de presión que sigue a la fuga provoca que el líquido hierva, de manera que parte de él se vaporiza instantáneamente. La fracción de líquido fugado es:

$$f_g = 1 - \exp \left\{ \frac{c_l}{H_v} (T_b - T_1) \right\}$$

donde:

- f_g: fracción vaporizada (adimensional)
- c_l: calor específico de la fase líquida (J/kg K)
- H_v: entalpía de vaporización (J/kg)
- T_b: temperatura de ebullición (K)
- T₁: temperatura de la fase líquida (K)

La variación del caudal con el tiempo se obtiene sustituyendo en esta fórmula los valores de p y h en función del tiempo, que dependen del tipo de proceso:

Fugas isotermas: el valor de la presión es constante a lo largo del proceso de fuga e igual a la presión de almacenamiento, que para el caso de fluidos almacenados a presión coincide con la de saturación del líquido a la temperatura del contenido. La variación del nivel del líquido está relacionada con el caudal de fuga según:

$$\frac{dm}{dt} = -\rho_1 A_r \frac{dh}{dt}$$

Fugas adiabáticas: la presión interior varía al aumentar el espacio ocupado por el vapor según se vacía el depósito, pues al descender el nivel del líquido y evaporarse parte de él se enfría, disminuyendo su temperatura y en consecuencia, su presión de vapor.

Según esta apreciación, la cantidad de fluido fugado durante los instantes i e $i+1$ se obtiene como:

$$m_{i,i+1} = \frac{1}{2} (t_{i+1} - t_i) \left\{ \left[\frac{dm}{dt} \right]_i + \left[\frac{dm}{dt} \right]_{i+1} \right\}$$

$$p + \rho gh + (\rho v^2/2) = \text{Cte.}$$

Para el estudio del movimiento de fluidos se deben recordar algunos conceptos fundamentales.

El caudal volumétrico Q_v es el producto de la velocidad v del fluido por el área A de la sección transversal del flujo.

El caudal másico Q_m es el producto de la velocidad v del fluido por el área A de la sección transversal y por la densidad ρ del fluido.

Recibe el nombre de velocidad másica G el producto de la velocidad v del fluido por la densidad ρ del mismo.

Esta ecuación es válida para un flujo estacionario, no viscoso e incompresible y se cumple en dos puntos cualesquiera de una línea de corriente. Si consideramos como línea de corriente la vena del líquido que pasa por el orificio del recipiente y aplicamos la ecuación anterior a un punto 1 situado en la superficie de nivel del líquido y a otro punto 2 situado exactamente en el centro de la sección del orificio de salida, se tendrá:

$$p_1 + \rho gh_1 + (\rho v_1^2/2) = p_2 + \rho gh_2 + (\rho v_2^2/2)$$

Si el diámetro del recipiente es grande respecto al diámetro del orificio, la velocidad v_1 de descenso de la superficie del líquido se puede considerar nula.

p_1 = presión absoluta en el recipiente a nivel del líquido. Si el recipiente está abierto o en comunicación con la atmósfera, esa presión p_1 será la atmosférica p_a y si está cerrado y sometido a otra presión, p_1 será la presión de saturación p_v o cualquier presión genérica P_h .

$P_2 = p_a$ (presión atmosférica)

La expresión anterior se podrá escribir de la siguiente forma:

$$P_h - P_a + \rho g (h_1 - h_2) = \rho v^2/2$$

$h_1 - h_2 = h$ = diferencia de altura entre el nivel del líquido y el orificio de salida.

y la velocidad teórica de salida del líquido será:

$$v_2 = [2 (P_h - P_a) / \rho + 2 gh]^{1/2}$$

El caudal másico de emisión Q_m se define como la masa de fluido que sale por unidad de tiempo y su expresión es:

$Q_m = \text{área de sección efectiva} \cdot \text{velocidad} \cdot \text{densidad}$

El área de la sección efectiva es el producto del área A de la sección transversal del orificio por un coeficiente de contracción C_c . La velocidad real es menor que la teórica calculada debido al rozamiento y a la viscosidad, por lo que la velocidad teórica viene afectada por un coeficiente de velocidad C_v . El coeficiente de descarga C_d se define como la relación entre el caudal real que sale por un orificio y el teórico. Puede expresarse también en función de C_v y de C_c , es decir $C_d = C_v \times C_c$ con lo cual se tiene en cuenta la influencia del rozamiento y la contracción de la vena de corriente por el orificio de salida. El coeficiente de descarga C_d es aproximadamente 0,62 para un orificio de borde afilado y la unidad para una boquilla de borde redondeado. Para un tramo muy corto de tubería o una boquilla externa conectadas a un recipiente, este coeficiente es aproximadamente 0,81.

El caudal másico Q_m será:

$$Q_m = C_d A_p [2 (\rho_h - \rho_a) \rho^{-1} + 2gh]^{1/2}$$

Si la presión de almacenamiento es la atmosférica, se tendrá $\rho_h = \rho_a$ y la expresión anterior se transforma en:

$$Q_m = C_d A_p (2gh)^{1/2}$$

En caso de escape de un gas licuado, el caudal de emisión disminuye rápidamente debido a la caída de presión y temperatura conforme va escapando (proceso adiabático) para lo cual se necesita su estudio particular, aunque en primera aproximación y si se considera una emisión de corta duración en un recipiente a presión, pueden aplicarse las fórmulas presentadas.

Durante la emisión la altura h varía con el tiempo y depende de la forma y posición del recipiente. Para un recipiente cilíndrico vertical con una sección transversal A_g (área proyectada sobre el suelo) y con una altura inicial h_0 de líquido, se demuestra matemáticamente que la masa m escapada en el tiempo t es:

$$m(t) = C_d A_p (2gh_0)^{1/2} t - \left(\frac{C_d^2 A_p^2 \rho}{2A_g} \right) t^2$$

y el caudal másico Q en función del tiempo t es:

$$Q_m(t) = C_d A_p (2gh_0)^{1/2} - \left(\frac{C_d^2 A_p^2 \rho g}{A_g} \right) t$$

3.12.1.4 Fuga en una tubería

Cuando el escape se produce en un orificio de una tubería, se puede considerar como un escape de un recipiente al cual esté conectada. Si la tubería es corta y no existe una bomba de trasiego, el caudal másico se puede calcular con las fórmulas anteriores.

En el caso de conducciones largas, hay que tener en cuenta la fricción del líquido en las paredes de la tubería. Los codos, reducciones, válvulas y otros accesorios, aumentan las resistencias al paso del fluido y se contabilizan en forma de longitud equivalente de

tubería o según la pérdida de carga que ocasionan. La pérdida de carga se da en alturas de columna del líquido (m) y la pérdida equivalente de presión en unidades de presión (Pa).

La pérdida de carga en un flujo estacionario a través de una tubería de sección circular se calcula mediante la expresión de Darcy - Weisbach.

$$h_f = f \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

h_f = pérdida de carga (m)

f = factor de fricción de Moody

l = longitud de tubería (m)

d = diámetro de tubería (m)

v = velocidad del líquido (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

El factor de fricción de Moody f depende de la rugosidad relativa de la pared interna de la tubería (razón entre la rugosidad absoluta ϵ y el diámetro d de la tubería) y del número de Reynolds Re .

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} = \frac{vd}{\nu} \quad \nu = \mu/\rho$$

Re = número de Reynolds (adimensional)

ρ = densidad del líquido (kg/m³)

μ = viscosidad dinámica o absoluta (N s/m²)

ν = viscosidad cinemática (m²/s)

El número de Reynolds Re es un parámetro adimensional de gran importancia en el estudio del flujo de fluidos y con la experimentación se ha encontrado que para valores de Re menores que aproximadamente 2000 el flujo es generalmente laminar y para valores superiores a 4000 el flujo es generalmente turbulento. No existe un cambio brusco de flujo laminar a turbulento, sino que la transición se produce gradualmente a medida que aumenta la velocidad. El valor concreto de la velocidad dependerá de la geometría y de la rugosidad de la tubería. Cuando el número de Reynolds Re está comprendido entre 2000 y 4000 el flujo está cambiando rápidamente de laminar a turbulento y la frecuencia con que se presenta el flujo turbulento aumenta a medida que el Re se acerca a 4000.

El factor o coeficiente de fricción de Moody puede deducirse matemáticamente y su valor es $f = 64/Re$ en el caso de régimen laminar. Para régimen turbulento no se dispone de relaciones matemáticas sencillas para obtener el valor de f en función del número de

Reynolds y además los investigadores de este campo han encontrado que sobre el valor f también influye la rugosidad relativa de la tubería. La fórmula más aceptada para todas las tuberías es la ecuación de Colebrook:

$$1/\sqrt{f} = -2\log\left[\left(\frac{\epsilon}{3,7d}\right) + \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right)\right]$$

En esta ecuación la incógnita f está en forma implícita y su resolución debe hacerse por iteración partiendo de un valor aproximado. Otra forma de resolverla es mediante un diagrama que da las relaciones existentes entre el coeficiente de fricción f , el número de Reynolds Re y la rugosidad relativa ϵ/d .

Puede observarse que para tuberías lisas el valor ϵ/d es muy pequeño y puede despreciarse el primer término entre paréntesis de la ecuación anterior quedando en la forma:

$$1/\sqrt{f} = -2\log(2,51/Re\sqrt{f})$$

que se transforma en:

$$1/\sqrt{f} = 2\log(Re\sqrt{f}) - 0,8$$

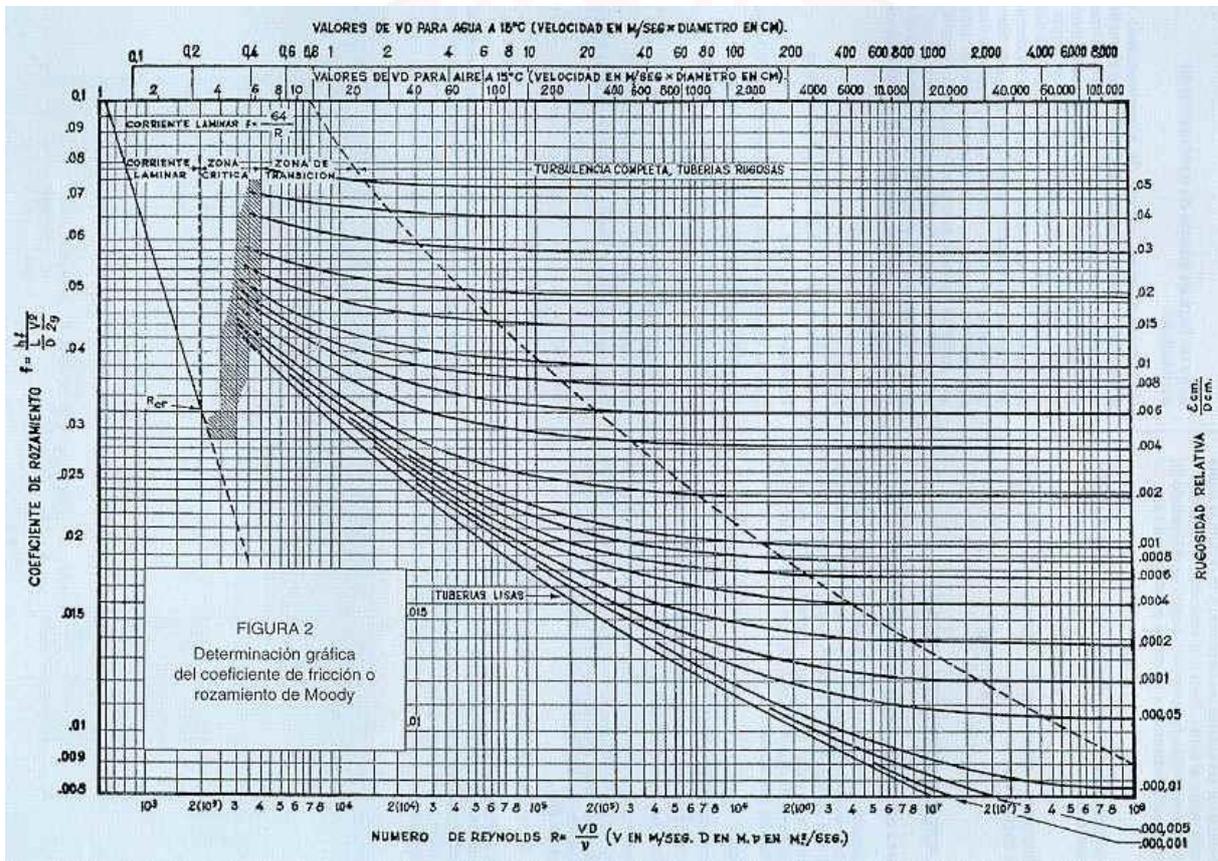
En la ecuación de Colebrook, para números de Reynolds Re muy grandes, el segundo término del paréntesis es despreciable y en tales casos la viscosidad no influye prácticamente y el coeficiente de fricción f tan solo depende de la rugosidad relativa ϵ/d de la tubería. Este hecho se pone de manifiesto en el diagrama ya que las curvas se vuelven horizontales para números de Reynolds elevados.

Tabla: Valores de la rugosidad absoluta ϵ

TUBERÍA O REVESTIMIENTO	ϵ mm
Tubos estirados de acero	0,0024
Tubos de latón o cobre	0,0015
Fundición revestida de cemento	0,0024
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024
Fundición centrifugada	0,003
Fundición asfaltada	0,06 - 0,18
Fundición	0,12 - 0,6
Acero comercial y soldado	0,03 - 0,09
Hierro forjado	0,03 - 0,09
Hierro galvanizado	0,06 - 0,24
Madera	0,18 - 0,9
Hormigón	0,3 - 3
Acero robionado	0,9 - 9

La rugosidad de la superficie de una tubería tiene una importancia considerable para valores elevados del número de Reynolds como puede observarse en el diagrama. En la tabla se dan valores de la rugosidad absoluta para diversos materiales. Cuando las tuberías están corroídas, el valor de la rugosidad aumenta y puede ser hasta diez veces mayor.

Para el cálculo de la pérdida de carga es necesario partir de una velocidad v del líquido, que en el caso de una tubería será inferior al calculado en el escape directo de un recipiente unido a ella. En el caso corriente de la existencia de una bomba impulsora se conocería el caudal en función de la altura manométrica, con lo cual se podría calcular la velocidad del líquido para el diámetro existente de la tubería. Conociendo la velocidad, se podrá calcular el número de Reynolds y mediante el diagrama de la figura se obtendrá el factor de fricción de Moody y en consecuencia se podrá calcular la pérdida de carga h_f del tramo de tubería hasta el punto en que se considere el posible escape.



Para el flujo de un líquido a través de una tubería, las pérdidas de carga por fricción están dadas por

$$\sum h_f = h_{ff} + h_{fa} + h_{fc}$$

$\sum h_f$ = pérdida por fricción total

h_{ff} = pérdida de carga por fricción debida a la tubería

h_{fa} = pérdida de carga por fricción debida a accesorios

h_{fc} = pérdida de carga por fricción debida a aumento o contracción brusco de la vena líquida

Para la pérdida de carga por fricción en la tubería ya se ha indicado el proceso a seguir.

La pérdida de carga por fricción debida a cada accesorio instalado y a contracciones bruscas de la conducción se expresa mediante la fórmula:

$$h_f = kv^2/2g$$

Una lista de valores del coeficiente k se expone en las siguientes tablas

Tabla Valores del coeficiente k para el cálculo de la pérdida de carga

ACCESORIO	PÉRDIDA DE CARGA
De depósito a tubería- conexión a ras de la pared (pérdida a la entrada)	$0,50v_2^2/2g$
- tubería entrante	$1,00v_2^2/2g$
- conexión abocinada	$0,05v_2^2/2g$
De tubería a depósito (pérdida a la salida)	$1,00v_1^2/2g$
Ensanchamiento brusco	$(v_1-v_2)^2/2g$
Ensanchamiento gradual (tabla 4)	$k(v_1-v_2)^2/2g$
Venturímetros, boquillas y orificios (C_v = Coef. de velocidad)	$(1/c_v^2 - 1)v_2^2/2g$
Contracción brusca (tablas 3 y 4)	$kv_1^2/2g$
Codo 45°	$k=0,35$ a $0,45$
Codo 90°	$k=0,50$ a $0,75$
Tes	$k=1,50$ a $2,00$
Válvulas de compuerta(abierta)	$k = \text{aprox. } 0,25$
Válvulas de control (abierta)	$k = \text{aprox. } 3,0$
Válvula de retención (charnela)	$k = \text{aprox. } 2$

Nota. Subíndice 1 = Aguas arriba. Subíndice 2 = Aguas abajo

Tabla: Coeficiente k para contracción brusca del diámetro de tubería.

A_2/A_1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k	0,5	0,45	0,36	0,20	0,07	0

Tabla Valores del coeficiente k para tuberías con contracciones y ensanchamientos. (Según King, *Handbook of Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co.)

CONTRACCIÓN BRUSCA		ENSANCHAMIENTO GRADUAL PARA UN ÁNGULO TOTAL DEL CONO						
d_1/d_2	K	4°	10°	15°	20°	30°	50°	60°
1,2	0,08	0,02	0,04	0,09	0,16	0,25	0,35	0,37
1,4	0,17	0,03	0,06	0,12	0,23	0,36	0,50	0,53
1,6	0,26	0,03	0,07	0,14	0,26	0,42	0,57	0,61
1,8	0,34	0,04	0,07	0,15	0,28	0,44	0,61	0,65
2,0	0,37	0,04	0,07	0,16	0,29	0,46	0,63	0,68
2,5	0,41	0,04	0,08	0,16	0,30	0,48	0,65	0,70
3,0	0,43	0,04	0,08	0,16	0,31	0,48	0,66	0,71
4,0	0,45	0,04	0,08	0,16	0,31	0,49	0,67	0,72
5,0	0,46	0,04	0,08	0,16	0,31	0,50	0,67	0,72

A veces interesa determinar la distancia que alcanza el escape de un chorro de líquido desde una abertura horizontal de un depósito para determinar si puede sobrepasar un cubeto de retención y la distancia hasta incidir sobre el suelo. Para una velocidad de descarga v (previamente calculada con lo indicado en el apartado 3), la distancia horizontal x recorrida en el tiempo t es:

$$x = vt$$

y la distancia vertical y , diferencia de cotas entre orificio y suelo es:

$$y = gt^2/2$$

Eliminando t entre estas dos ecuaciones, la distancia x alcanzada es:

$$x = v(2y/g)^{1/2}$$

3.12.2 Fuga de gas o vapor

Se utilizan las ecuaciones del flujo de un gas perfecto a presión a través de un orificio para calcular los caudales de fuga de gases o vapores a presión.

3.12.2.1 Hipótesis y limitaciones

Se supone que el producto fugado se comporta como un gas perfecto. Por tanto, el método es aplicable únicamente para gases y vapores que se encuentren a presiones y temperaturas suficientemente alejadas de las críticas. Además se deben cumplir las mismas limitaciones que las fugas de líquido.

3.12.2.2 Datos necesarios

- Coeficiente de contracción de la vena fluida. Para orificios situados en la pared del recipiente, equipo o cisterna y por el estudio de ciertas experiencias de estudios anteriores, hemos tomado el valor de 0,6.
- Masa molecular y relación de calores específicos a presión y volumen constantes del gas.
- Presión y temperatura iniciales del continente.
- Área efectiva de la abertura, elegida para el orificio característico del fallo considerado.

3.12.2.3 Aplicación y resultados

El método estima el caudal fugado de un gas o vapor tóxico o inflamable de depósitos de almacenamiento o tuberías.

Se obtiene el caudal de descarga de un gas o un vapor que, integrado en el tiempo, permite el cálculo de la cantidad descargada.

La duración de la fuga vendrá limitada por las salvaguardias tecnológicas de la instalación afectada. No se puede postular una duración tal que supere el contenido del depósito.

Si la fuga va seguida de un incendio se considerará que ésta persiste hasta el total vaciado del recipiente.

3.12.2.4 Descripción

El caudal másico de gas o vapor fugado de un recipiente, viene dado por la expresión:

$$\frac{dm}{dt} = \phi C_d A_{sal} \rho \left\{ \frac{M}{8,314 T} \gamma \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right\}^{0,5}$$

donde:

ϕ : coeficiente de criticidad del flujo (adimensional)

m: cantidad fugada (kg)

C_d : coeficiente de contracción de la vena fluida (adimensional)

A_{sal} : superficie efectiva del orificio de salida (m^2)

ρ : densidad del gas a temperatura ambiente (kg/m^3)

M: masa molecular ($kg/kmol$)

T: temperatura del gas (K)

γ : relación de calores específicos a presión y volumen constante (adimensional)

Según esta relación, la variación del caudal fugado con el tiempo depende de cual sea la evolución de la presión y de la temperatura.

En este caso también hay que distinguir entre fugas de gas isotermas y adiabáticas.

Fugas isotermas: se recomienda la utilización de un esquema de resolución de diferencias finitas. Se divide el salto de presión entre la inicial (P_0) y la atmosférica en N intervalos regulares. Se determina el coeficiente γ y el caudal de fuga, ya que la temperatura se mantiene constante e igual a la inicial del recipiente T_0 .

Entre dos instantes la masa fugada es:

$$m_{ii+1} = \frac{M(p_i - p_{i+1})}{8314T_0} V$$

donde:

m : cantidad fugada (kg)
 M : masa molecular (kg/kmol)
 p_i : presión en el instante i (Pa)
 V : volumen del recipiente (m^3)
 T_0 : temperatura inicial del gas (K)

Fugas adiabáticas: se recomienda la utilización de un esquema de resolución de diferencias finitas. Se divide el salto de presión entre la inicial (P_0) y la atmosférica en N intervalos regulares correspondientes a instantes de tiempo. En el instante inicial, $t_0=0$, se conocen las condiciones de presión y temperatura que serán las iniciales P_0 y T_0 .

Entre dos instantes la masa fugada es:

$$m_{ii+1} = \frac{MV}{8314} \left\{ \frac{p_i}{T_i} - \frac{p_{i+1}}{T_{i+1}} \right\}$$

donde:

m : cantidad fugada (kg)
 M : masa molecular (kg/kmol)
 p_i : presión en el instante i (Pa)
 V : volumen del recipiente (m^3)
 T_i : temperatura en un instante determinado i del gas (K)

3.12.3 Fugas bifásicas

En determinados casos el fluido sale por una perforación mezclados en fase líquida y vapor. Se producen principalmente en líquidos almacenados bajo presión a temperaturas más altas que su punto de ebullición normal, ya que, en el momento de la fuga de líquido, se produce una evaporación súbita o flash parcial a medida que se derrama por el agujero o tubería, produciendo una caída de presión en su interior.

4 Consecuencias de los accidentes

En el momento en el que se produce la explosión, la onda de presión generada, así como sus características básicas, sobrepresión e impulso, interaccionan con el ambiente que les rodea, desplazando y comprimiendo todo aquello que se encuentran a su paso, por lo que dependiendo de su posición respecto de la carga explosiva, de las dimensiones,

forma, naturaleza y composición, se generan fuerzas y esfuerzos. Estos generan una serie de daños sobre las personas, los equipos instalaciones y estructuras. Estos daños son muy variables, pero los más importantes son los asociados a los puntos críticos del hombre, bien por su sensibilidad, bien por su peligrosidad.

Los efectos asociados a la onda de presión, pueden clasificarse como:

- a) Efectos primarios: los efectos primarios de la onda de presión, tienen su origen en las compresiones y expansiones del aire que puede producir fenómenos de deformación y fenómenos vibratorios, que afecten a las estructuras o edificios, a los equipos e instalaciones y a las personas.
- b) Efectos secundarios: estos tienen lugar cuando las deformaciones y tensiones dinámicas producidas superan las características de resistencia de las estructuras y estas se colapsan. El fallo, origina la formación de fragmentos que, debido al impulso de la onda de presión, actúan como proyectiles, cuyo impacto origina daños adicionales.
- c) Efectos terciarios: este tipo de daños, son los daños causados por la onda de presión al desplazar el cuerpo contra el suelo y provocarle el impacto contra otros objetos y estructuras.

4.1 Daños sobre las personas

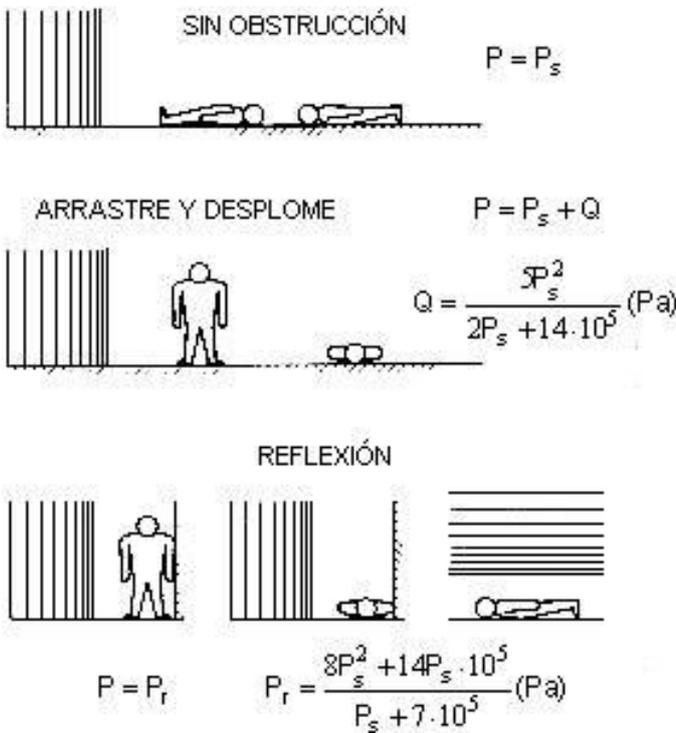
La onda de presión generada tras una explosión, al incidir sobre las personas, debido a la gran cantidad de energía que se genera, ejerce una serie de efectos directos, que puede provocar un conjunto de lesiones, afectando a los órganos de las personas, fundamentalmente al tímpano y pulmón, pero además cabe destacar los posibles daños derivados del desplazamiento y colisión del cuerpo contra objetos o estructuras.

4.1.1 Gravedad de las lesiones

La gravedad de las lesiones, depende de los siguientes factores:

- Del lugar donde se produce la explosión, de tal forma que en los espacios abiertos tendremos una onda de sobrepresión, pero en zonas cerradas, la onda de presión choca y rebota, generando nuevas ondas de presión, con mayor grado de lesión.
- La gravedad de las lesiones, también depende de la distancia de la víctima al centro de la explosión.
- De la potencia de la onda expansiva y de la velocidad de propagación de la misma.
- La gravedad de las lesiones, depende también de las medidas de protección que se hayan adoptado, así como de sus coeficientes de absorción.
- De la resistencia del individuo.
- De la posición del individuo o de cómo incide sobre él la onda de presión.

Es muy importante considerar la posición de la personas y de las paredes de las estructuras respecto a la dirección de propagación de la onda de choque para calcular el efecto total, por lo que se pueden presentar los siguientes casos:



Sin obstrucción: 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). De esta manera el cuerpo de la persona, ofrece la mínima resistencia a la onda.

Arrastre y desplome: el cuerpo se encuentra perpendicular a la dirección de propagación de la onda, sin que se produzca efecto de reflexión de la onda, 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. De esta manera

el cuerpo ofrece la máxima resistencia a la onda.

Reflexión: el cuerpo se encuentra cerca de una superficie plana, perpendicular a la dirección de propagación de la onda de sobrepresión. Se produce una reflexión de la onda. El valor de la presión es el de la presión reflejada es: $P = P_r$

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

Tabla: 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 irre recuperables	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) 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:

Valor local integrado del impulso debido a la onda de presión, de 150 milibar. segundo (15000 Pa. s).

Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 milibar (12500 Pa).

Valor umbral para zona de alerta:

Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 milibar. segundo (10000 Pa.s).

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.

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

Tabla. 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 irre recuperables	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) 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:

Valor local integrado del impulso debido a la onda de presión, de 150 milibar. segundo (15000 Pa. s).

Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 milibar (12500 Pa).

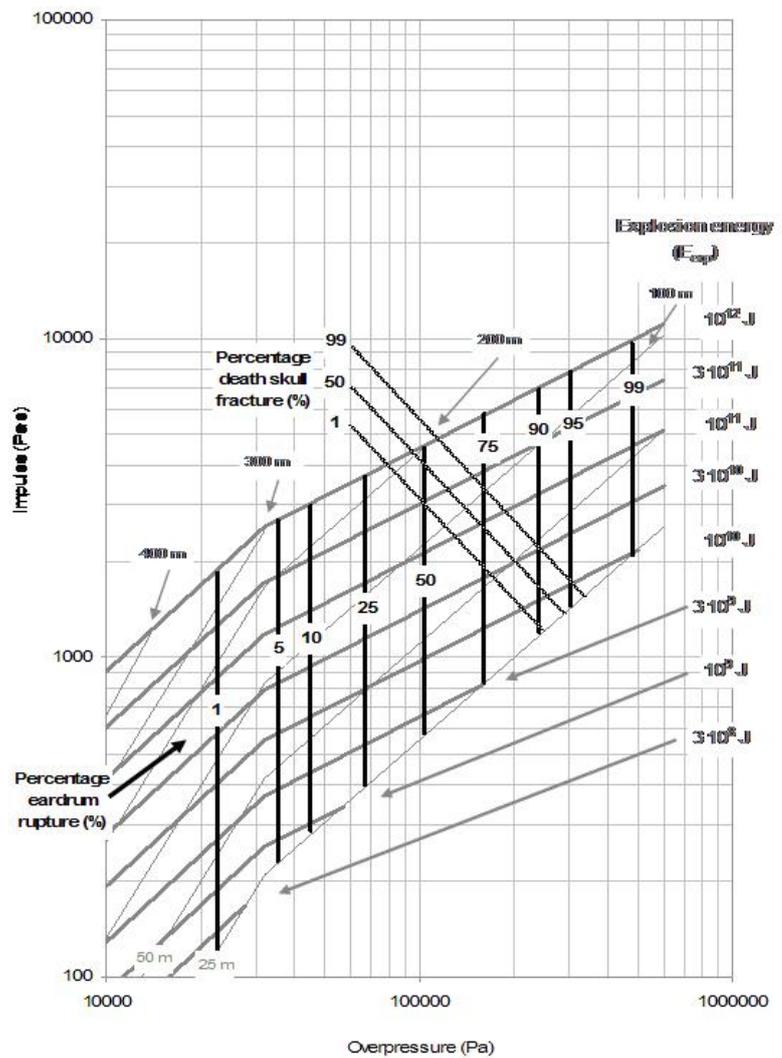
Valor umbral para zona de alerta:

Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 milibar.segundo (10000 Pa.s).

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.



4.1.2 Tipos de lesiones por onda expansiva

Los tipos de lesiones producidas sobre las personas por el impacto de la onda expansiva se pueden clasificar en tres tipos:

- Lesiones primarias: son aquellas que se produce únicamente por el efecto directo de la onda de presión sobre el organismo.
- Lesiones secundarias: son producidas por el desplazamiento secundario de los proyectiles generados por la explosión, que golpean a la víctima. Estas lesiones pueden ser penetrantes o no.
- Lesiones terciarias: se generan por el desplazamiento del cuerpo y el consiguiente impacto de este contra objetos circundantes.

4.1.3 Tipos de daños sobre las personas

Se consideran como principales, los siguientes.

a) Daños en el oído, rotura de tímpano.

El oído es una parte muy sensible del organismo frente a la sobrepresión impulsiva. Se sabe que la probabilidad de daño no depende de la duración de la fase positiva de la onda y por consiguiente, del impulso. Los daños producidos por ondas de larga y corta duración son similares.

La figura muestra el porcentaje de población expuesta que sufriría rotura timpánica (líneas negras) o moriría por golpe en el cráneo (líneas semi-punteadas) en función de la distancia (líneas delgadas grises) y de la energía de la explosión (líneas gruesas grises) para el estallido de recipientes cilíndricos

b) Daños pulmonares, hemorragia pulmonar.

Los daños producidos al pulmón, dependen directamente de la sobrepresión y de la duración de la fase positiva de la onda y, por consiguiente, del impulso.

Los diferentes tipos de lesiones pulmonares que se pueden producir son:

- Hemorragias intrapulmonares.
- Contusiones pulmonares.
- Estallidos alveolares que provocan embolias gaseosas cerebrales y coronarias.
- Neumotórax.

c) Desplazamiento del cuerpo

La sobrepresión puede provocar que el cuerpo sea desplazado y posteriormente colisione contra el suelo o contra algún obstáculo, objeto o estructura, (paredes, equipos, etc.), evidentemente, en este choque pueden producirse daños incluso de mayor gravedad que los originados inicialmente.

Se pueden dividir estos en:

Daños por impactos en la cabeza.

Según la velocidad del impacto, se pueden producir daños en la cabeza. En la siguiente tabla se establece la relación entre la velocidad del impacto y el criterio de daño.

Daños por impacto en la cabeza

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3	Seguro
4	Umbral
5,5	50%
7	100%

Daños por impactos del cuerpo.

Respecto de los daños ocasionados por la colisión de todo el cuerpo contra un obstáculo, se establece en la siguiente tabla, la relación entre la mortalidad por impacto y la velocidad de este.

Daños por impacto en el cuerpo

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3	Seguro
6,5	Umbral
16,5	50%
42	100%

d) Daños por impactos.

Las consecuencias de los impactos de los fragmentos contra el cuerpo, que como se ha visto, pueden ser de tipo primario, originados por la propia rotura del recipiente y pertenecen al mismo, o secundarios, que son aquellos que están originados por las ondas de presión al actuar sobre todo aquello que encuentra a su paso, consecuencia del efecto dominó. Los fragmentos, también pueden ser de tipo penetrante o de tipo no penetrante, que solo golpean.

La sobre presión establece un impulso que arrastra los objetos

Se establece la siguiente relación entre el impacto de objetos no penetrantes de 4,5 Kg de peso que impactan contra la cabeza o la columna vertebral y la velocidad del impacto.

Daños por impacto

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
3	Umbral de seguridad
4,5	Daño probable
7	Daño seguro

Además, los fragmentos con una energía cinética a partir de 40 ó 60 J pueden ocasionar lesiones graves.

Relación entre objetos penetrantes de vidrio de 10 g y la velocidad de impacto.

Daños por impactos de objetos de vidrio

Velocidad de impacto (m/s)	Criterio
15	Umbral para heridas en la piel

30	Umbral para heridas graves
55	Heridas graves 50%
90	Heridas graves 100%

e) Radiación térmica.

Las consecuencias de la radiación térmica sobre las personas, son las quemaduras. Cuya gravedad depende de la intensidad de la radiación (Kw/m²), así como de la dosis recibida. Según sea la profundidad de las quemaduras, estas se clasifican en: quemaduras de primer grado, quemaduras de segundo grado, o quemaduras de tercer grado.

En función de la radiación térmica, se establecen los siguientes niveles de daño para diferentes flujos térmicos.

Efectos de la radiación térmica

Radiación térmica KW/m ²	Efecto
1,4	Se considera inofensivo para las personas sin ningún tipo de protección especial.
1,7	Mínimo necesario para causar dolor.
2,1	Mínimo necesario para causar dolor después de 1 minuto.
4,0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 s. Quemaduras de primer grado.
4,7	Radiación máxima tolerable para personas sin protección Causa dolor en 15 a 20 s. Heridas después de 30 s Radiación máxima tolerable por personas protegidas,(bomberos).
11,7	El acero delgado, aislado parcialmente, puede perder su integridad mecánica.
12,7	La madera puede prender después de una larga exposición. Las protecciones termoplásticas de los cables eléctricos se funden.
25,0	El acero delgado aislado puede perder su integridad mecánica
37,5	Suficiente para causar daños a equipos de proceso, colapso de estructuras
60	Radiación máxima tolerable del cemento
200	Radiación máxima tolerable del hormigón armado
30 – 300	Radiación máxima tolerable del vidrio
400	Radiación máxima tolerable de pared de ladrillo

Tiempo de umbral de dolor frente a radiación térmica

Kw/m ²	Tiempo de exposición umbral de dolor (s)
1,00	Día soleado
1,74	60
2,33	40
2,90	20
4,73	16

6,94	9
19,87	2

La radiación térmica puede calentar notablemente el aire circundante y ello puede producir efectos en las personas. La siguiente tabla establece las consecuencias de la exposición de las personas al aire caliente.

Efectos de la temperatura del aire sobre las personas

Temperatura en °C	Respuesta fisiológica
125	Bastantes dificultades para respirar
140	Tolerable durante 5 minutos
150	Temperatura límite para escapar
160	Dolor rápido insoportable, piel seca
180	Heridas irreversibles en 30 s
205	Menos de 4 minutos de tiempo de tolerancia del sistema respiratorio, con la piel mojada

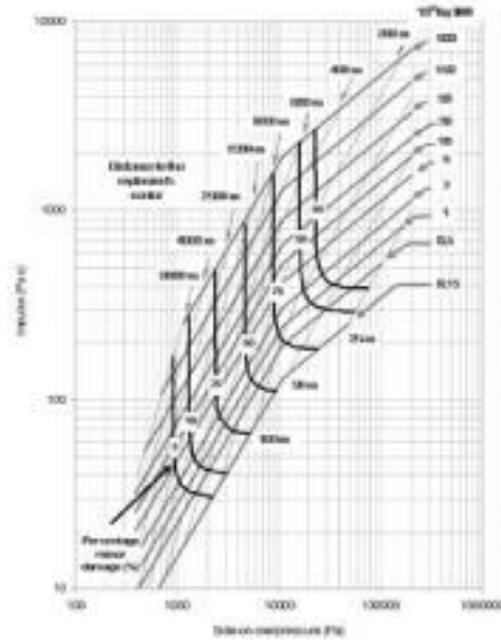
4.2 Daños sobre las estructuras

Al igual que ocurre con los daños ocasionados a los humanos, los provocados por las ondas sobre las estructuras dependen de la sobrepresión y del impulso. Dado que los edificios suelen albergar personas en su interior, resulta de gran importancia considerar los daños a los mismos por las posibles repercusiones en sus moradores. Cabe señalar que, en general, los edificios son más sensibles a las explosiones que los seres humanos expuestos directamente a las mismas.

Para estimar las consecuencias provocadas por la detonación de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables sobre los edificios, se seleccionan las principales ecuaciones PROBIT que permiten evaluar los daños sobre los edificios (daño menor rotura de ventanas, desplazamiento de puertas y marcos, daños a tejados...-, daño estructural mayor - además de los efectos anteriores, fractura y/o destrucción de algunas paredes- y desplome -demolición parcial o total del edificio-).

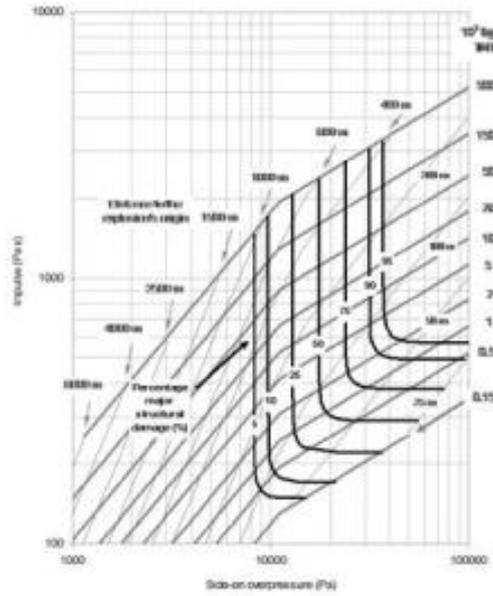
Combinando las curvas características presión-impulso (F. Díaz Alonso et al. 2006) con las ecuaciones PROBIT indicadas, se procede a una representación gráfica que permite la determinación directa del daño en función de la distancia al origen de la explosión, utilizando únicamente la masa de TNT equivalente como parámetro de entrada.

A continuación se representan las figuras que permiten determinar el porcentaje de edificios afectados por daño menor, daño estructural mayor y desplome para las explosiones provocadas por la detonación de explosivos, material pirotécnico y sustancias inestables.

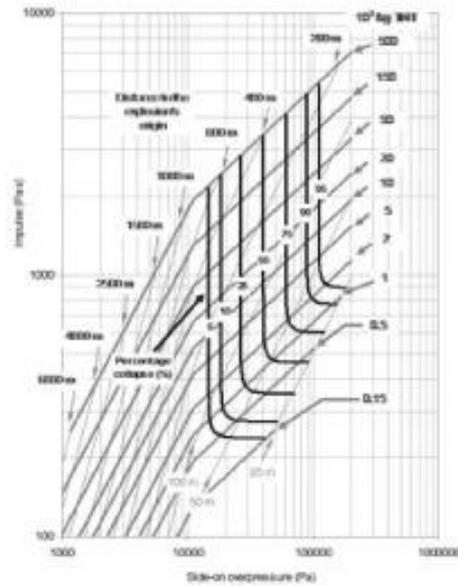


Porcentaje de edificios que sufriría daño menor (líneas negras) en función de la distancia (líneas delgadas grises) y de la masa de TNT equivalente (líneas gruesas grises) para la detonación de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables.





Porcentaje de edificios que sufriría daño estructural mayor (líneas negras) en función de la distancia (líneas delgadas grises) y de la masa de TNT equivalente (líneas gruesas grises) para la detonación de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables.



Porcentaje de edificios que se desplomarían (líneas negras) en función de la distancia (líneas delgadas grises) y de la masa de TNT equivalente (líneas gruesas grises) para la detonación de sustancias explosivas, pirotécnicas o inestables.

La tabla siguiente establece valores aproximados que relacionan los daños estructurales con la sobrepresión máxima.

Daños estructurales	Sobrepresión (bar)
Destrucción total	1,00 a 2,00
Demolición total	0,80
Destrucción de maquinaria pesada, 3500 kg.	0,68 a 0,70
Destrucción total de edificios	
Destrucción completa de viviendas	0,48
Vuelco de vagones de tren	0,43
Daños irrecuperables	0,40
Postes de madera como los de teléfono arrancados	0,34
Daños menores en maquinaria pesada, 1500 kg. Estructuras de acero arrancadas. Cemento roto de edificaciones ligeras	0,27
Rotura de tanques de almacenamiento de crudo	0,23
Daños estructurales importantes	0,18
Destrucción casas de ladrillo en un 50%	0,17
Daños graves reparables	0,15
Destrucción parcial de muros	0,14
Colapso de tejados y paredes	0,13
Distorsión de vigas de acero	0,09
Daños estructurales menores	0,028 a 0,050
Cristales rotos y bastidores de ventanas	0,069
Destrucción de estructuras de madera	0,068
Cristales rotos en un 90%	0,040
Cristales rotos en un 50%	0,010
Cristales grandes rotos	0,0021
Rotura de vidrios por causa del ruido	0,0028
Rotura de pequeñas ventanas	0,0069

La tabla siguiente establece valores aproximados que relacionan los daños a las personas con la sobrepresión máxima.

Relación de daños a las personas con la sobre presión

Daños Personales	Sobrepresión (bar)
Mortandad del 99%	5,00
Mortandad del 50 %	4,06
Mortandad del 1 %	3,29
Umbral de muerte por lesiones de pulmón	0,70
Umbral de rotura de tímpano	0,35
Umbral de la zona de intervención	0,125
Umbral de zona de alerta	0,050
Ruido fuerte (143dB)	0,0028
Ruido molesto (137dB)	0,014

En la siguiente tabla se muestran los efectos que determinadas combinaciones sobrepresión-impulso provocan sobre edificaciones

Relación de la sobrepresión impulso con el porcentaje de daño

Porcentaje de daño	Descripción de daño	Sobre presión (bar)	Impulso (bar s)
80 %	Parcialmente demolido	0,350	0,128
40 %	Daño severo. Demolición	0,345	0,121
25 %	Daño moderado. Reparable	0,276	0,112
10 %	Daño leve. Reparable	0,186	0,023
0,180		0,079	
0,131		0,058	
0,124		0,062	
0,117		0,058	
0,110		0,011	
0,090		0,032	

4.3 Definición de las zonas objeto de planificación: valores umbrales.

El control y la planificación ante los riesgos de accidentes graves en los establecimientos industriales se han de fundamentar en la evaluación de las consecuencias de los fenómenos peligrosos que pueden producirse si se materializan los mismos.

El análisis de consecuencias se lleva a cabo determinando la extensión de las zonas previsiblemente afectadas por el accidente, denominadas zonas de planificación y efectuando un cuidado inventario de elementos vulnerables contenidos en ella.

Se distinguen tres zonas, que de acuerdo con la Directriz Básica se definen como sigue:

- **Zona de intervención:** es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.
- **Zona de alerta:** es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos de población.
- **Zona de efecto dominó:** es aquella en la que la concatenación de efectos causantes de riesgo que multiplica las consecuencias, debido a que los fenómenos peligrosos pueden afectar, además de los elementos vulnerables exteriores, otros recipientes, tuberías o equipos del mismo establecimiento o de otros establecimientos próximos, de tal manera que se produzca una nueva fuga, incendio, estallido en ellos, que a su vez provoquen nuevos fenómenos peligrosos.

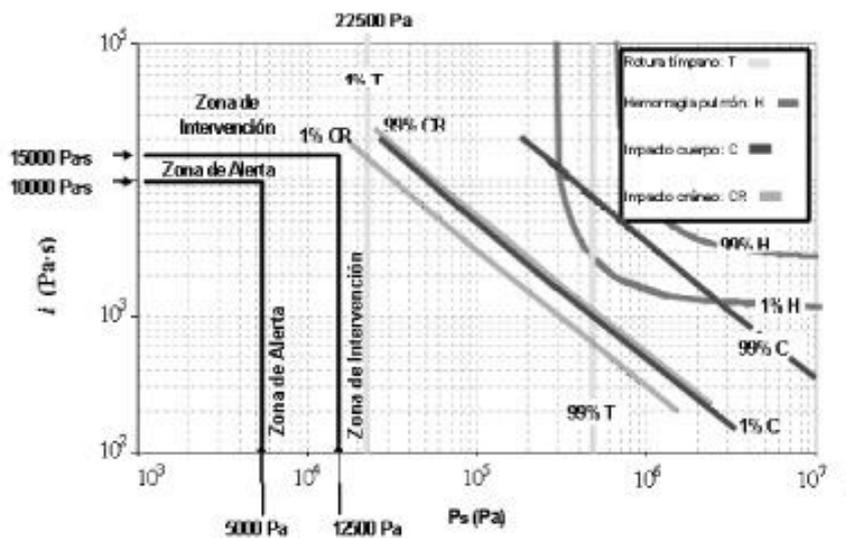
Los valores umbral en vigor para establecer las Zonas de Planificación ante el riesgo de explosiones accidentales en la industria están contenidos en la Directriz Básica habiéndose considerado las magnitudes o fenómenos peligrosos provocados por este tipo de accidente, esto es: la sobrepresión, el impulso mecánico y el alcance de fragmentos.

Valores umbral propuestos en la Directriz Básica de riesgo químico para las Zonas de Intervención y Alerta

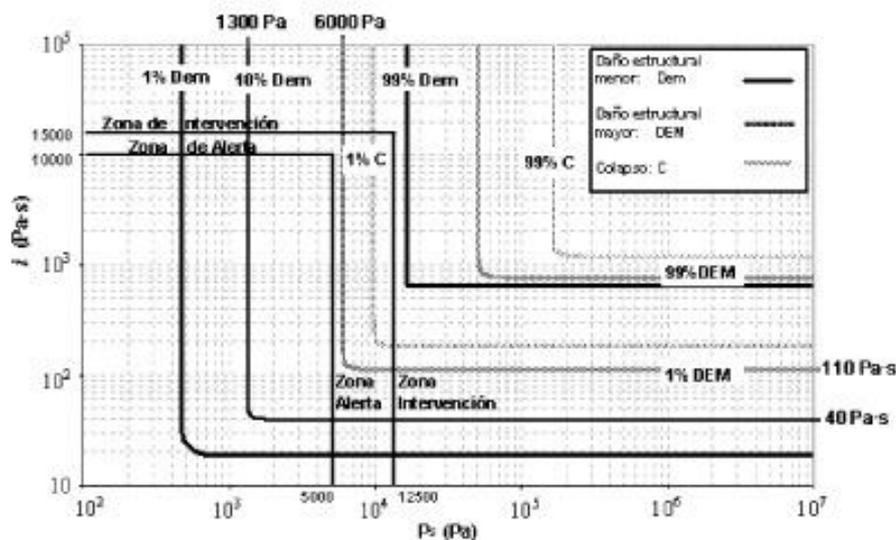
	ZONA DE INTERVENCIÓN	ZONA DE ALERTA	ZONA DE EFECTO DOMINÓ
SOBREPRESIÓN	Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 150 mbar.seg.	Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 mbar.seg.	
IMPULSO	Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 mbar.	Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 50 mbar.	Sobrepresión: 160 mbar.
ALCANCE DE LOS FRAGMENTOS	El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar.seg. en una cuantía del 95%. Producidos por explosión o estallido de continentes.	El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar.seg. en una cuantía del 99,9%. Producidos por explosión o estallido de continentes.	Alcance máximo de los proyectiles producidos por explosión o estallido de continentes (la distancia se calcula en función de las hipótesis accidentales consideradas).

4.3.1 Análisis de los valores límite de la sobrepresión y del impulso de las explosiones.

Los valores límite de la sobrepresión y del impulso de la Directriz Básica se han representado conjuntamente con algunas líneas de isorriesgo para seres humanos situados en ámbitos exteriores y las que definen los daños a edificios, que, a su vez, pueden afectar a sus moradores.



Representación conjunta de los valores de la sobrepresión y del impulso para delimitar las Zonas de Planificación establecidos en la Directriz Básica (2003) y de las líneas de isorriesgo más significativas para seres humanos



Representación de los valores límite de la sobrepresión y del impulso para delimitar las Zonas de Planificación, establecidos en la Directriz Básica (2003) y de las líneas de isorriesgo más significativas para edificaciones

4.4 Método Probit

El análisis de consecuencias derivadas de los fenómenos peligrosos asociados a los accidentes mayores se realiza mediante la aplicación de la "Metodología Probit".

Se basa en la cuantificación probabilística de la vulnerabilidad de personas e instalaciones ante efectos físicos de una magnitud determinada que se suponen conocidos.

La vulnerabilidad de personas se expresa como el número de individuos que, previsiblemente pueden resultar afectados con un cierto nivel de daño a causa de un accidente. Por otra parte, la vulnerabilidad de instalaciones se puede cuantificar

utilizando magnitudes económicas, aunque se va a reducir el análisis a las estimaciones de daños en estructuras y roturas de cristales.

En este método se parte de una manifestación física de un incidente (por ejemplo, la concentración tóxica y tiempo de exposición en una cierta área geográfica) y nos da como resultado una previsión de los daños a las personas expuestas al incidente (es decir, número de heridos, número de víctimas, etc.).

La fórmula empleada para este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$Pr = a + b \ln V$$

Donde:

Pr = «Probit» o función de probabilidad de daño sobre la población expuesta.

a = Constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición.

b = Constante dependiente del tipo de carga de exposición. V = Variable que representa la carga de exposición.

4.4.1 Descripción del método Probit

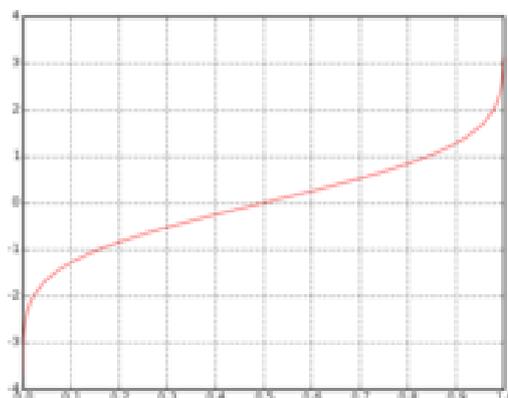
El método consiste en la aplicación de correlaciones estadísticas para estimar las consecuencias desfavorables sobre la población u otros elementos vulnerables a los fenómenos físicos peligrosos consecuencia de los accidentes.

En probabilidad y estadística se llama función probit a la inversa de la función de distribución o función cuantil asociada con la distribución normal estándar. La función tiene aplicaciones en gráficos estadísticos exploratorios y modelos probit.

Para la distribución normal estándar (a menudo denotada por $N(0,1)$) la función de distribución se denota comúnmente por Φ . Φ es una función sigmoide continua y creciente, cuyos dominio y recorrido son el intervalo (0, 1) y la recta real, respectivamente.

Por ejemplo, considérese el hecho de que la distribución $N(0, 1)$ tiene un 95% de probabilidad entre -1,96 y 1,96 y es simétrica en un entorno de cero. De ahí se deduce que $\Phi(-1,96) = 0,025 = 1 - \Phi(1,96)$.

La función probit proporciona el cálculo inverso, generando un valor de una variable aleatoria $N(0, 1)$ asociado a una probabilidad acumulada bajo su curva. Formalmente, la función probit es la inversa de $\Phi(z)$, denotada $\Phi^{-1}(p)$.



Gráfica de la función probit

Siguiendo con el ejemplo, $\text{probit}(0,025) = -1,96 = -\text{probit}(0,975)$.

En general, $\Phi(\text{probit}(p)) = p$ y $\text{probit}(\Phi(z)) = z$

El llamado modelo probit se justifica, en particular, si la variación de respuesta puede racionalizarse como una distribución lognormal de tolerancias entre los sujetos del test, donde la tolerancia de un sujeto particular es justo la dosis suficiente para la respuesta de interés.

La respuesta de una población ante un fenómeno físico peligroso se distribuye según una ley log-normal. El modelo es aplicable sólo para aquellos fenómenos de los que se dispone de "Ecuación Probit".

4.4.2 Porcentaje de población expuesta vs valor de Probit

El valor «probit» permite determinar el porcentaje de la población expuesta que se verá afectada a un determinado nivel de lesiones o por muerte a causa de una carga de exposición determinada expuesta en la siguiente tabla:

Equivalencia entre valores "probit" y porcentaje de la población afectada

Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%	Pr	%
0	0	3,72	10	4,16	20	4,48	30	4,75	40	5,00	50	5,25	60	5,52	70	5,84	80	6,28	90	7,33	99,0
2,67	1	3,77	11	4,19	21	4,50	31	4,77	41	5,03	51	5,28	61	5,55	71	5,88	81	6,34	91	7,37	99,1
2,95	2	3,82	12	4,23	22	4,53	32	4,80	42	5,05	52	5,31	62	5,58	72	5,92	82	6,41	92	7,41	99,2
3,12	3	3,87	13	4,26	23	4,56	33	4,82	43	5,08	53	5,33	63	5,61	73	5,96	83	6,48	93	7,46	99,3
3,25	4	3,92	14	4,29	24	4,59	34	4,85	44	5,10	54	5,36	64	5,64	74	5,99	84	6,55	94	7,51	99,4
3,36	5	3,96	15	4,33	25	4,61	35	4,87	45	5,13	55	5,39	65	5,67	75	6,04	85	6,64	95	7,58	99,5
3,45	6	4,01	16	4,36	26	4,64	36	4,90	46	5,15	56	5,41	66	5,71	76	6,08	86	6,75	96	7,65	99,6
3,52	7	4,05	17	4,39	27	4,67	37	4,92	47	5,18	57	5,44	67	5,74	77	6,13	87	6,88	97	7,75	99,7
3,59	8	4,08	18	4,42	28	4,69	38	4,95	48	5,20	58	5,47	68	5,77	78	6,18	88	7,05	98	7,88	99,8
3,66	9	4,12	19	4,45	29	4,72	39	4,97	49	5,23	59	5,50	69	5,81	79	6,23	89	7,33	99	8,09	99,9

La variable dependiente Pr se ha establecido como una variable aleatoria según una distribución estadística normal con un valor medio de 5 y una desviación tipo (desviación estándar) de 1, lo cual significa que a un porcentaje del 50% corresponde un valor del «probit» = 5.

Este método se puede emplear para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación, por radiación térmica y por sobrepresión.

4.4.3 Método «Probit» de vulnerabilidad a la inhalación de sustancias tóxicas

Para determinar el porcentaje de personas afectadas por intoxicación ocasionada por inhalación de una sustancia tóxica se utiliza la función sustituyendo el valor V por la expresión:

$$V=c^n t$$

Siendo:

c = Concentración (ppm = partes por millón).

T = Tiempo de exposición (minutos).

n = Exponente (sin dimensiones 0,6 - 3).

Con lo que:

$$Pr = a + b \ln (c^n t)$$

Si la concentración se diera en mg/m³ variarían los valores de las constantes de la expresión indicada y sería necesario disponer de ellas o transformaríamos esa concentración a ppm mediante la fórmula:

$$C_{ppm} = C(mg/m^3) \cdot (22,4 \cdot Ta) / (273 \cdot M)$$

Siendo:

Ta = Temperatura ambiente absoluta, K.

M = Peso molecular del contaminante.

22,4 = Volumen molar en litros de un gas a 0 °C y 1 atm (760 Torr).

Para las sustancias muy tóxicas y más comunes se dispone en la bibliografía especializada de los valores de a, b y n de la ecuación «Probit» relativas a intoxicaciones letales, reflejado en la siguiente tabla:

Constantes de toxicidad letal para la ecuación "probit"

SUSTANCIA	a (ppm)	b (ppm)	n (min)
ACRILONITRILO	-29,42	3,008	1,43
ACROLEINA	-9,931	2,049	1
AMONIACO	-35,9	1,85	2
BENCENO	-109,78	5,3	2
BROMO	-9,04	0,92	2
BROMURO DE METILO	-56,81	5,27	1,00
CIANURO DE HIDROGENO	-29,42	3,008	1,43
CLORO	-8,29	0,92	2
CLORURO DE HIDROGENO	-16,85	2,00	1,00
DIOXIDO DE AZUFRE	-15,67	2,10	1,00
DIOXIDO DE NITROGENO	-13,79	1,4	2
FLUORURO DE HIDROGENO	-35,87	3,354	1,00
FORMALDEHIDO	-12,24	1,3	2
FOSGENO	-19,27	3,686	1
ISOCIANATO DE METILO	-5,642	1,637	0,653
MONÓXIDO DE CARBONO	-37,98	3,7	1
OXIDO DE PROPILENO	-7,415	0,509	2,00
SULFURO DE HIDROGENO	-31,42	3,008	1,43
TETRACLORURO DE CARBONO	-6,29	0,408	2,50
TOLUENO	-6,794	0,408	2,50

La ecuación probit no es aplicable para concentraciones relativamente bajas y tiempos de exposición muy prolongados, cuyos métodos de valoración serían otros. Su uso está restringido al análisis de consecuencias agudas e inmediatas.

Debe tenerse en cuenta que, dada una cierta concentración tóxica en una zona poblada, la población que efectivamente está en riesgo es la ubicada en exteriores. Los individuos en lugares cerrados se pueden considerar al abrigo de los efectos letales excepto en el caso de una duración excepcional del impacto tóxico en la zona. Un ejemplo lo tenemos en la siguiente ecuación

«probit» propuesta por Withers y Lees (1985) para obtener el porcentaje de muertes en una población con nivel de actividad normal que está expuesta a cloro:

$$Pr = -8,29 + 0,92 \ln (c^nt)$$

4.4.4 Método «Probit» de vulnerabilidad a radiaciones térmicas

Se emplea para determinar el porcentaje de personas afectadas por los efectos de las radiaciones térmicas en función de la intensidad de irradiación recibida y del tiempo de exposición (dosis de radiación calorífica recibida).

En el caso de fugas de líquidos y gases inflamables y con una ignición inmediata, se podrá generar un charco ardiendo, una explosión BLEVE o un chorro con llamarada. Las lesiones ocasionadas serán causadas principalmente por radiaciones térmicas.

Si el gas no se enciende inmediatamente, se dispersará en la atmósfera. Si la nube de gas formada se encuentra con un foco de ignición en sus proximidades, se supone que cualquier persona presente dentro de la nube de gas ardiendo morirá a consecuencia de quemaduras y asfixia. En la zona externa a la nube de gas, aunque la duración de la radiación térmica generalmente será breve, los daños estarán en función de la distancia y habrán de ser evaluados en cada caso.

La institución holandesa TNO (Organización holandesa para la investigación científica) presenta las ecuaciones «probit» siguientes:

Quemaduras mortales (protegidos con ropas): $Pr = -37,23 + 2,56 \ln (t)$

- Quemaduras mortales (sin protección): $Pr = -36,38 + 2,56 \ln (t)$
- Quemaduras de 2º grado: $Pr = -43,14 + 3,0188 \ln (t)$
- Quemaduras de 1er. grado: $Pr = -39,83 + 3,0186 \ln (t)$

Donde:

t = Tiempo efectivo de exposición en segundos.

I = Intensidad de irradiación en W/m².

En las fórmulas anteriores se ha supuesto que las lesiones ocasionadas se reducen por el factor 7 si se va protegido con ropa. En otras palabras, un porcentaje del 1% en un determinado grado de lesión en personas que utilizan ropas equivale a un 7% en personas que no van protegidas con ropas.

Otra ecuación «Probit» desarrollada por Eisenberg et al. para evaluar el porcentaje de mortalidad por irradiación térmica es la siguiente:

$$Pr = -14 + 2.56 \ln((t \cdot I^{3/4}) / 10^4)$$

Donde:

t = Tiempo de exposición en segundos.

I = Intensidad de irradiación térmica en W/m^2 .

Estas ecuaciones son útiles para incendios de tipo fogonazo (flash fire) de corta duración, como en el incendio de la bola de fuego ocasionada por una BLEVE y que no da tiempo a escapar, y también para incendios de derrames que forman un charco en llamas en los cuales se intenta escapar y buscar protección detrás de obstáculos. En este último caso se determina el tiempo de exposición efectivo mediante la expresión propuesta por TNO:

$$t_{ef} = t_r + \frac{3}{5} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\mu}{x_0} \cdot t_v \right)^{-\frac{5}{3}} \right]$$

Donde:

t_{ef} = Tiempo de exposición efectivo (s).

t_r = Tiempo de reacción (5 segundos).

x_0 = Distancia al centro del incendio (m).

μ = Velocidad de escape de una persona (m/s).

t_v = Tiempo en llegar a la distancia en la que la intensidad de irradiación sea 1 kW/m^2 (S).

4.4.5 Método Probit de vulnerabilidad a explosiones

Los modelos de consecuencias de explosiones predicen el impacto de la sobrepresión originada por la explosión y la proyección de fragmentos volantes sobre las personas y objetos.

Al considerar las consecuencias sobre las personas se debe hacer distinción entre consecuencias directas e indirectas de una explosión. Entre las primeras están las lesiones de los pulmones y los tímpanos. Entre las segundas se encuentran las lesiones ocasionadas por proyección de fragmentos y por impacto del cuerpo contra obstáculos.

Las ecuaciones «probit» para estas consecuencias se han tomado de Eisenberg et al. (1975) y se desglosan a continuación:

Muerte por lesiones pulmonares

La ecuación «probit» para determinar el porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar es la siguiente:

$$Pr = -77,1 + 6,91 \ln P$$

P = sobrepresión máxima (N/m²)

Rotura de tímpano

El porcentaje de afectados por rotura de tímpano se determina por la ecuación:

$$Pr = -15,6 + 1,93 \ln P$$

P = sobrepresión máxima (N/m²)

Muerte por impacto del cuerpo

El porcentaje de muertes por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación:

$$Pr = -46,1 + 4,82 \ln J$$

Donde:

J = impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación (N. s/m²).

Lesiones por impacto del cuerpo

El porcentaje de lesionados por desplazamiento y colisión del cuerpo contra obstáculos se determina por la ecuación:

$$Pr = 39,1 + 4,45 \ln J$$

Donde:

J = impulso (N.s/m²).

A continuación se indican unos valores de referencia de consecuencias sobre edificios según la sobrepresión alcanzada:

- Daños importantes en edificios (casi completa destrucción): 0,35 bar.
- Daños reparables en edificios: 0,10 bar.
- Rotura de cristales en edificios: 0,05 bar.

Aunque existen modelos de vulnerabilidad para impacto de fragmentos metálicos de los recipientes, proyectados en una explosión, no se han considerado suficientemente representativos y fiables para incluirlos. Cabe destacar que los fragmentos de considerable tamaño pueden alcanzar distancias incluso superiores a 1 km.

TNO indica que los proyectiles con una energía cinética de 100 julios pueden ocasionar víctimas mortales.

