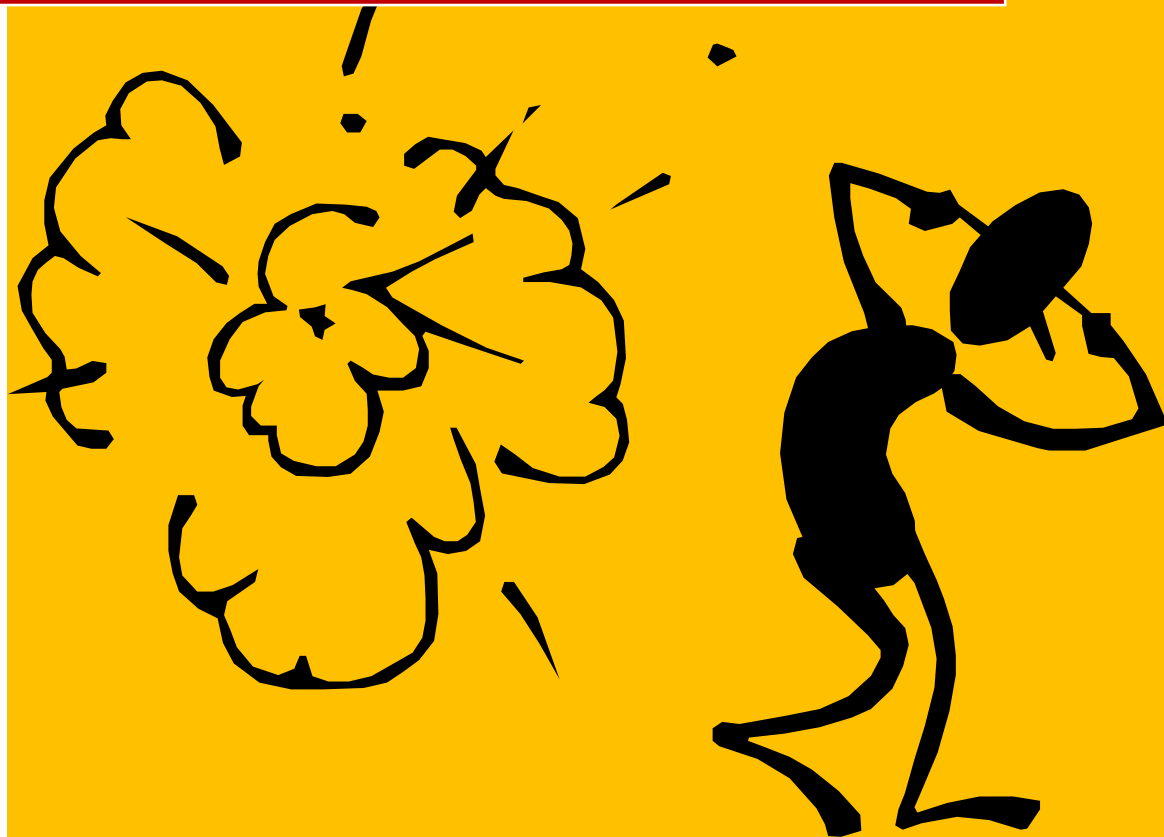


1ª Edición Diciembre
2015

Dinámica de las Explosiones Industriales



Material no apto para la venta.

Ing. Néstor Adolfo BOTTA



www.redproteger.com.ar

ISBN 978-987-27889-9-5



ISBN 978-987-27889-9-5

EL AUTOR



Néstor Adolfo BOTTA es Ingeniero Mecánico recibido en el año 1992 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata; Ingeniero Laboral recibido en el año 1995 en la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata.

Es el Titular de la empresa Red Proteger, dedicada a la Capacitación y Divulgación de conocimientos en materia de seguridad e higiene en el trabajo (www.redproteger.com.ar).

Desarrollo funciones como Responsable de Seguridad e Higiene en el Trabajo en empresas como SOIME SRL, TRADIGRAIN ARGENTINA SA, AMANCO ARGENTINA SA, MOLINOS RÍO DE LA PLATA SA y SEVEL ARGENTINA SA.

Asesoró a diversas empresas entre las que se destacan AKZO NOBEL SA, CERVECERÍA Y MALTERÍA QUILMES SAICAYG y APACHE ENERGÍA ARGENTINA SRL.

Actualmente se desempeña como Coordinador Pcial. de Salud y Seguridad en el Trabajo en la Dirección Pcial. de Salud y Seguridad en el Trabajo de la Pcia. de Santa Fe.

Su extensa actividad docente lo ubica como:

- Profesor en la UCA Sede Rosario para la Carrera de Posgrado de Higiene y Seguridad en el Trabajo en la asignatura de Riesgo y Protección de Incendios y Explosiones.
- Profesor Titular en la Universidad Nacional del Litoral para la Carrera de Técnico en Seguridad Contra Incendios en la asignatura de Seguridad Contra Incendios III. Sistema de educación a distancia.
- Profesor en la Universidad Nacional del Litoral Sede Rosario, para la Carrera de Lic. en Seguridad y Salud Ocupacional en la asignatura Práctica Profesional.
- Profesor Titular en el Instituto Superior Federico Grote (Rosario – Santa Fe) para la Carrera de “Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo” para las asignaturas de Higiene y Seguridad en el Trabajo I, Seminario Profesional, Prevención y Control de Incendios II, y Prevención y Control de Incendios I”.
- Profesor Interino Cátedra “Elementos de Mecánica”. Carrera “Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo”. ISFD Nro. 12 La Plata – 1.996
- Ayudante Alumno Cátedra “Termodinámica”. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ingeniería.
- Ayudante Alumno Cátedra “Análisis Matemático”. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencia Económicas.

Datos de Contacto

e-mail: nestor.botta@redproteger.com.ar

Botta, Néstor Adolfo
Dinámica de las explosiones industriales / Néstor Adolfo Botta. - 1a ed. - Rosario :
Red Proteger, 2015.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-987-27889-9-5

1. Seguridad Industrial. I. Título.
CDD 363.11

®Todos los derechos reservados.

El derecho de propiedad de esta obra comprende para su autor la facultad exclusiva de disponer de ella, publicarla, traducirla, adaptarla o autorizar su traducción y reproducirla en cualquier forma, total o parcial, por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo fotocopia, copia xerográfica, grabación magnetofónica y cualquier sistema de almacenamiento de información. Por consiguiente, ninguna persona física o jurídica está facultada para ejercitar los derechos precitados sin permiso escrito del Autor.

Editorial Red Proteger®
Rosario – Argentina
Tel.: (54 341) 4451251
Fax: (54 341) 4400861
info@redproteger.com.ar
www.redproteger.com.ar

INDICE

- 1) QUE ES UNA EXPLOSIÓN
 - 2) QUE PASA CUANDO ALGO EXPLOTA
 - 3) AGENTE DE DAÑO
 - 4) CAUSAS
 - 4.1) Generación Súbita
 - 4.2) Rotura del Recipiente
 - 5) EXPLOSIONES FÍSICAS
 - 5.1) Explosión por Liberación de un Gas Comprimido
 - 5.2) Explosión por Liberación de Gas Licuado (Las BLEVE'S)
 - 5.3) Incendios y Explosiones Secundarios
 - 6) REACCIONES QUÍMICAS QUE DAN LUGAR A EXPLOSIONES
 - 6.1) Reacciones Uniformes
 - 6.2) Reacciones de Propagación
 - 7) EXPLOSIONES TÉRMICAS
 - 8) EXPLOSIONES POR DEFLAGRACIÓN
 - 8.1) Deflagración de Gases y Vapores
 - 8.2) Deflagración de Polvos en Suspensión
 - 8.3) Deflagración de Líquidos Nebulizados
 - 8.4) Deflagración de Mezclas Híbridas de Polvo y Gas
 - 8.5) Deflagración en Fases Condensadas
 - 9) EXPLOSIONES POR DETONACIÓN
 - 9.1) Detonaciones de Gases y Vapores
 - 9.2) Detonaciones de Polvos y Líquidos nebulizados
- ANEXO I: Valoración de una BLEVE
- ANEXO II: Violencia de una Deflagración
- ANEXO III: LA ONDA DE PRESIÓN

En su acepción más difundida el término explosión se refiere a un estallido asociado con un estrepitoso y agudo ruido y un frente expansivo de presión, que varía desde una onda de choque supersónica a una ráfaga de viento relativamente suave.

1) QUE ES UNA EXPLOSIÓN

Una explosión es una “**súbita liberación de gas a alta presión en el ambiente**”.



La definición básica es independiente del origen o mecanismo por el que se genera el gas a alta presión.

Los elementos comunes a los distintos fenómenos que se consideran explosiones son los siguientes:

- La sustancia liberada ha de encontrarse en fase gaseosa. Puede tratarse de un gas, un vapor, una mezcla de gases o una mezcla de vapores. No importa el estado en que se encuentra la sustancia, sino que lo que se escape a alta presión sea un gas o vapor.
- La liberación ha de ser súbita, en el sentido de muy rápida, es decir, que ha de ser lo suficientemente rápida como para que la energía contenida en el gas se disipe en el ambiente mediante una onda de presión destructiva u onda de choque. No se trata de un escape de gas suave y paulatino, sino brusco y violento.
- La presión del gas en el momento de la liberación ha de ser alta, es decir, que su energía potencial ha de ser suficiente para iniciar y mantener una expansión destructiva.
- La liberación ha de producirse en el ambiente, es decir, fuera de un recipiente. Ambiente significa tanto el aire como un recinto. Recipiente significa un depósito, un conducto o un reactor de proceso.

La sustancia involucrada en la explosión puede ser combustible o incombustible. Esto puede determinar tanto el origen de la explosión (físico o químico) como su desarrollo.

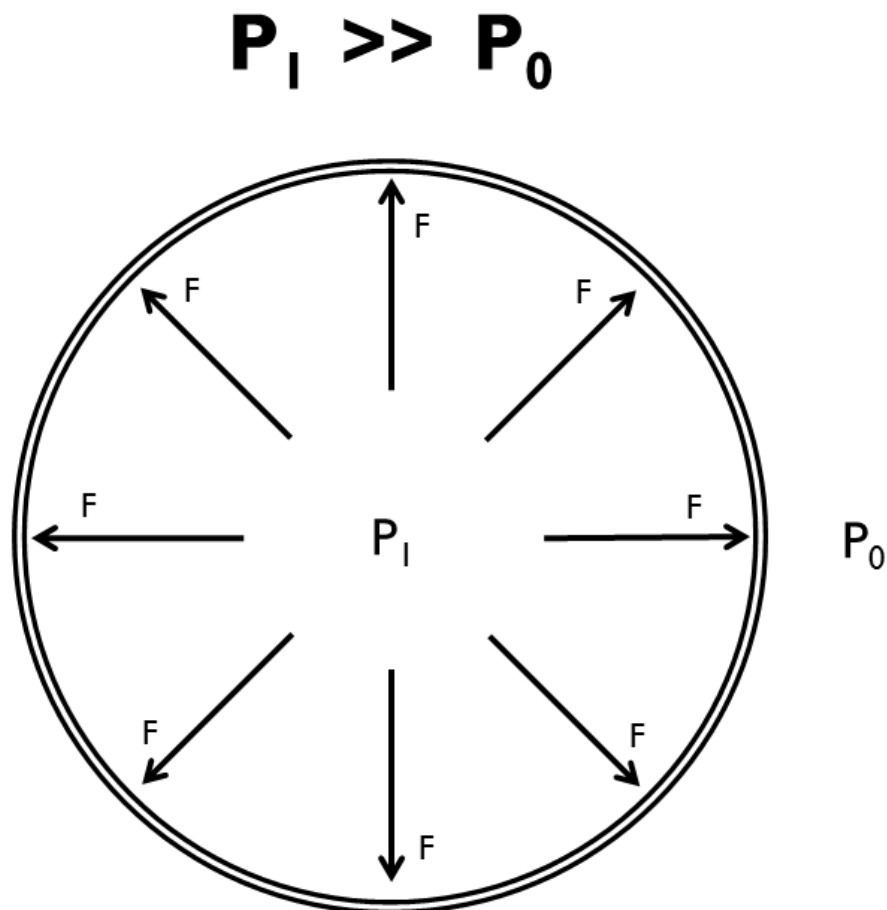
La sustancia involucrada puede tratarse de un sólido, un líquido, un gas, un vapor, un polvo en suspensión, un líquido nebulizado o una mezcla de éstos.

La sustancia involucrada puede encontrarse libre o estar confinada en un recipiente o en un recinto. Si está confinada puede encontrarse a la presión atmosférica o a una presión distinta, generalmente superior a la atmosférica.

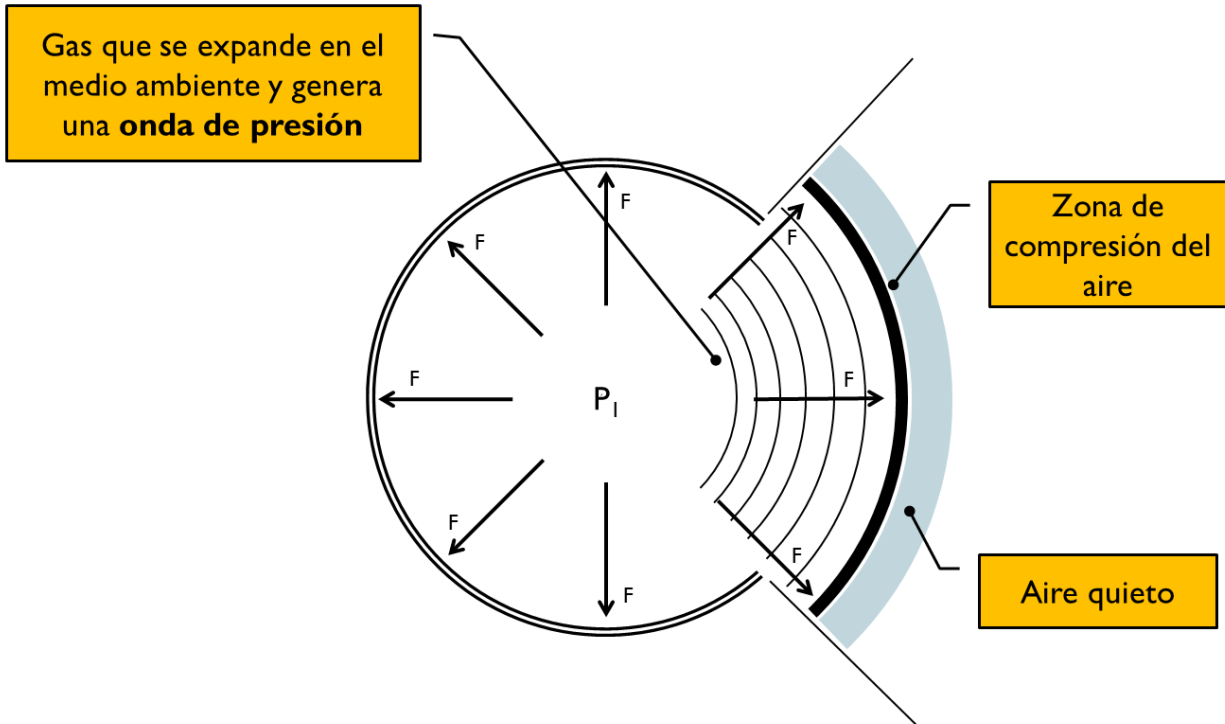
En todos los casos se produce una expansión de gases que lleva asociada una onda de presión destructiva. La súbita liberación de un gas a alta presión y la disipación de su energía en forma de onda de choque constituyen el concepto fundamental de una explosión.

2) QUE PASA CUANDO ALGO EXPLOTA

Partamos de un recipiente sano en cuyo interior se encuentra un gas a mayor presión que la atmosférica.



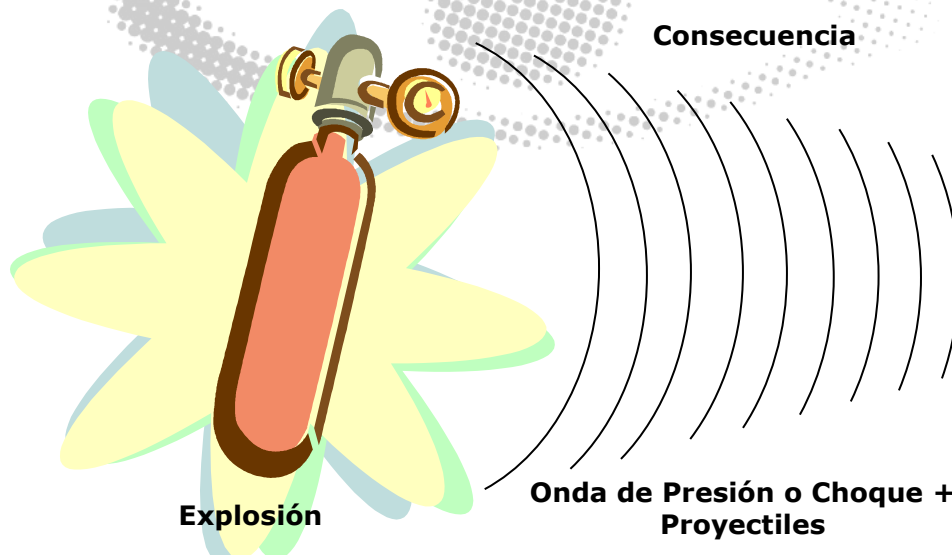
Cuando el recipiente se rompe el gas se escapa y expande a muy alta velocidad en el medio ambiente circundante produciendo que el aire quieto que se encuentra delante se comprima y mueva también a muy alta velocidad, produciendo una onda de presión destructiva.



3) AGENTE DE DAÑO

En un incendio el agente de daño, es decir, aquellos elementos que producen daño, son el calor, el humo, los gases y las llamas, entre otros.

El agente de daño lo podemos clasificar en aquellos que dependen de la propia explosión y aquellos que dependen del entorno en donde se produce la explosión.



Los agentes de daño que son propios de la explosión con independencia donde ésta ocurre son:

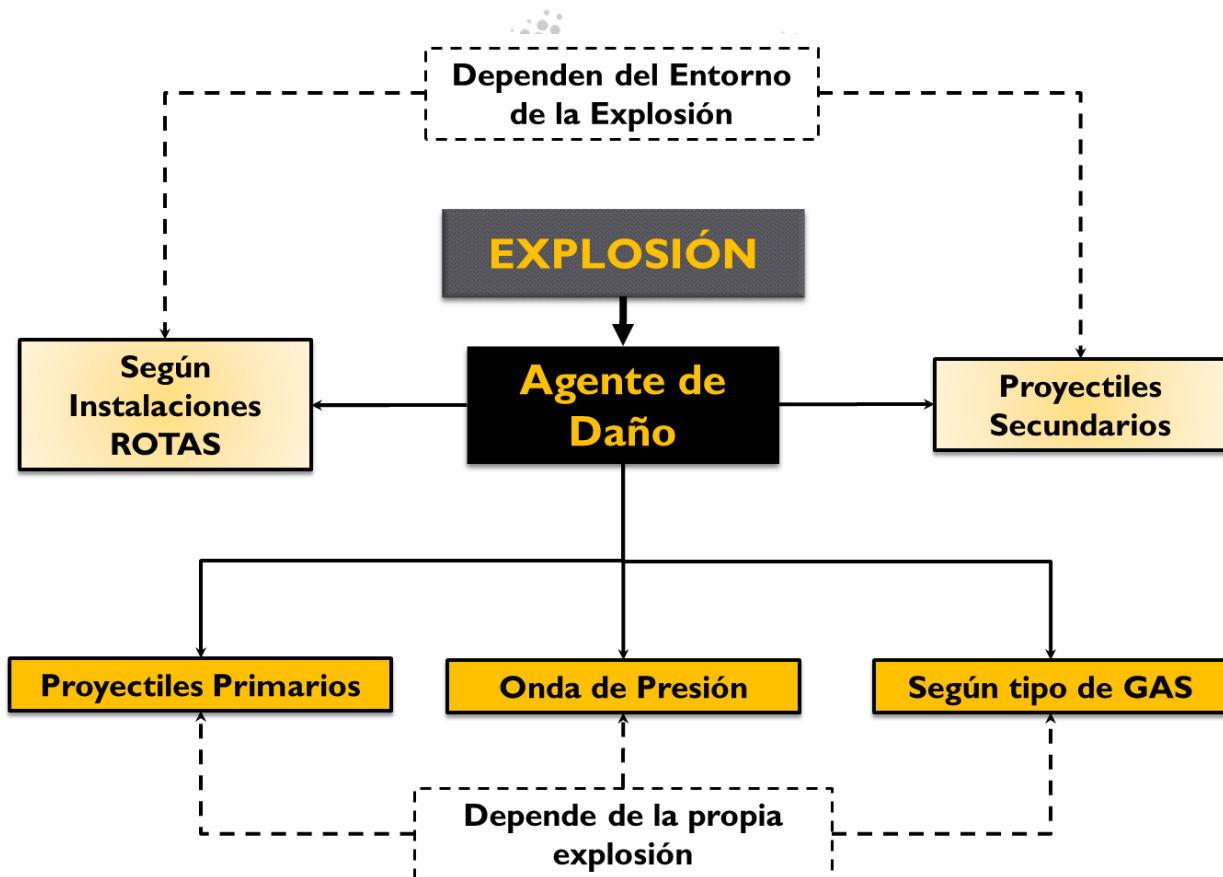
- Onda de presión destructiva o de choque.

- **Proyectiles primarios:** aquellos que son parte del contenedor, recipiente o ambiente confinado donde se produjo la explosión, es decir, por ejemplo, partes del tanque.
- Efectos del gas que se escapa, que en algunos casos puede ser inocuo u en otros inflamable, corrosivo, tóxico, etc.

Aquellos que dependen del entorno donde se produce la explosión son:

- **Proyectiles secundarios:** son elementos o cosas que la onda de presión o los proyectiles primarios desplazan en su movimiento.
- Efectos de las instalaciones que se rompen, lo que puede generar escapes de gases, incendios, derrumbes, etc., u otras explosiones derivadas o secundarias.

De acuerdo al tipo de explosión que se produzca, la capacidad de dañar de los distintos agentes de daño puede ir cambiando, transformándose los efectos secundarios de la explosión en más destructivos que la propia onda de presión.



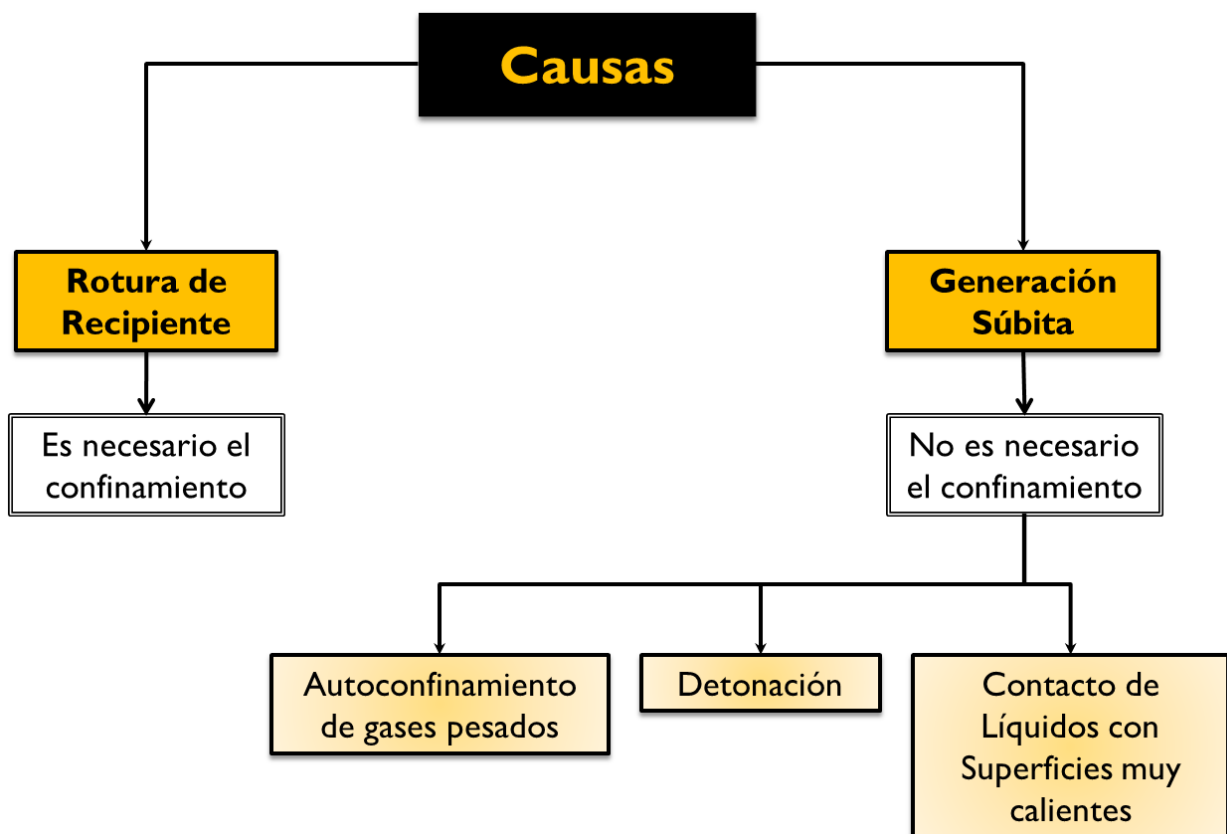
4) CAUSAS

Las causas básicas de las explosiones las podemos dividir en dos grandes tipos:

- **Rotura de Recipiente:** Descarga súbita de un gas a alta presión en el ambiente producto de la rotura de un recipiente. Es necesario el confinamiento para que se produzca una explosión. Esta rotura se puede dar por:
 - Lo que sucede dentro del recipiente.

- Lo que le sucede al propio recipiente.
- Lo que sucede fuera del recipiente.
- **Generación súbita** en el ambiente de un gas a alta presión, que puede ser debida a fenómenos físicos como por ejemplo, la evaporación instantánea de un líquido que entra en contacto con una superficie caliente, fenómeno químico como por ejemplo, la detonación de un explosivo de alta potencia, o por el autoconfinamiento de gases pesados.

La diferencia entre estos dos tipos básicos de explosiones se debe fundamentalmente al confinamiento.



El confinamiento puede ser un tanque de combustible líquido o gaseoso, un tanque para gases no combustibles como aire, oxígeno, etc., es decir, el almacenamiento permanente de gases comprimidos o licuados; o ambientes que circunstancialmente o accidentalmente pueden ser sometidos a mayor presión que la atmosférica por algunos de las formas que analizaremos, como ser: una casa, un silo, una celda, un depósito de productos químicos, etc.

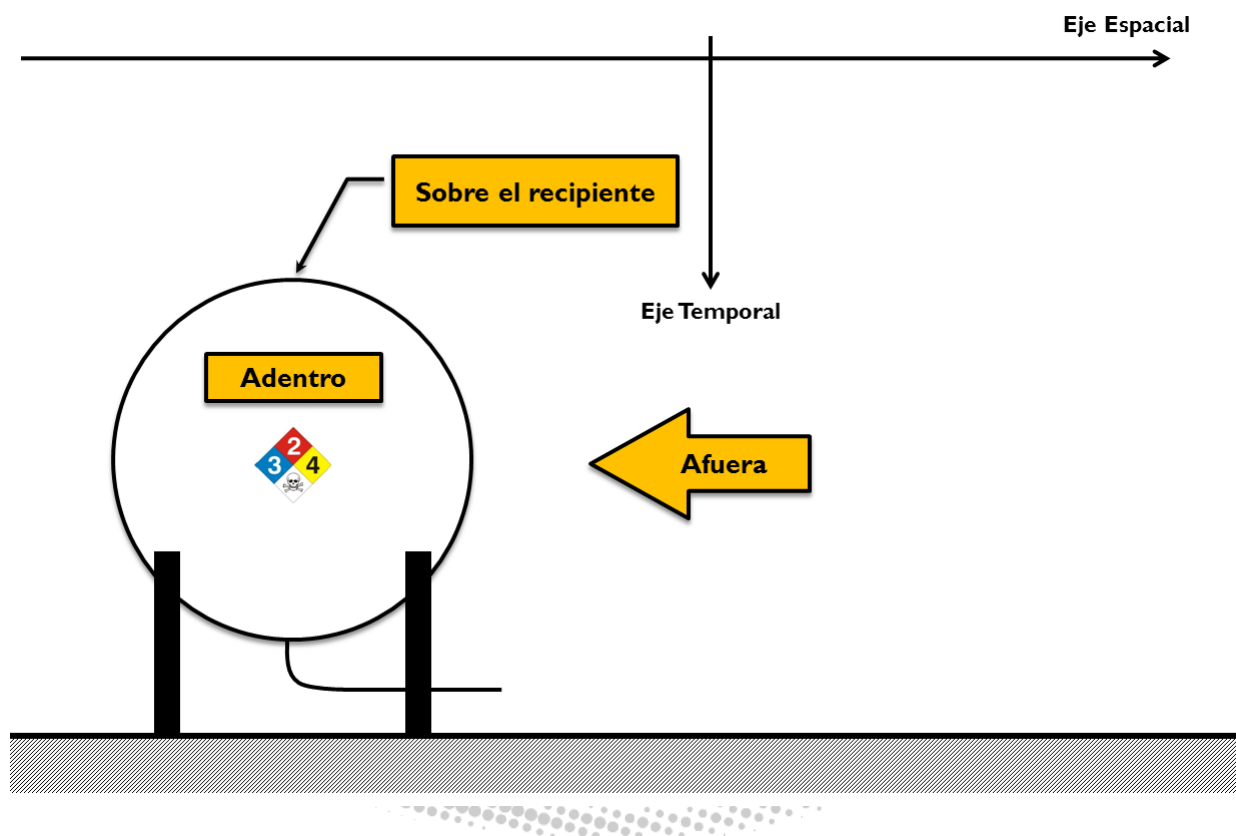
4.1) Generación Súbita

Cuando un líquido (rara vez un sólido) entra en contacto con una sustancia u objeto a una temperatura muy superior a su punto de ebullición, se produce una súbita evaporación del líquido y la consiguiente expansión del vapor generado. Es el caso de los derrames a temperatura ambiente de líquidos refrigerantes o de gases criogénicos licuados y de la entrada en contacto de líquidos con metales o minerales muy calientes. En dichos casos, el líquido recibe calor de la superficie más caliente a una velocidad tal, que instantáneamente se genera un gas a alta presión. Si el área de contacto entre el líquido y la superficie

caliente es grande, la vaporización puede producirse lo suficientemente rápida para causar una onda de presión, propagándose en todas las direcciones. La velocidad de evaporación es generalmente baja, pero la rápida generación del gas, produce con frecuencia presiones lo suficientemente elevadas para destruir edificios o contenedores. La súbita introducción de agua a los tubos de calderas, intercambiadores de calor o tanques de fluidos de transferencia de calor, a alta temperatura, pueden provocar violentas explosiones.

4.2) Rotura del Recipiente

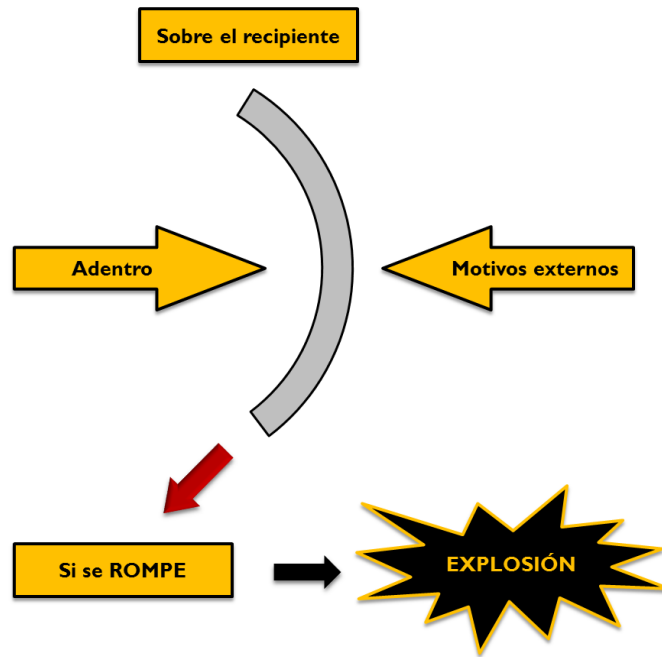
El análisis de las explosiones por rotura del recipiente lo podemos hacer siguiendo dos dimensiones: la espacial y la temporal.



La rotura del recipiente resulta en la proyección de metralla o también llamados proyectiles, de tamaños variados y provoca un violento empuje de la estructura del contenedor en la dirección opuesta a la descarga del gas. No obstante, en estas circunstancias la liberación de gas es extremadamente rápida y se genera una violenta onda de choque.

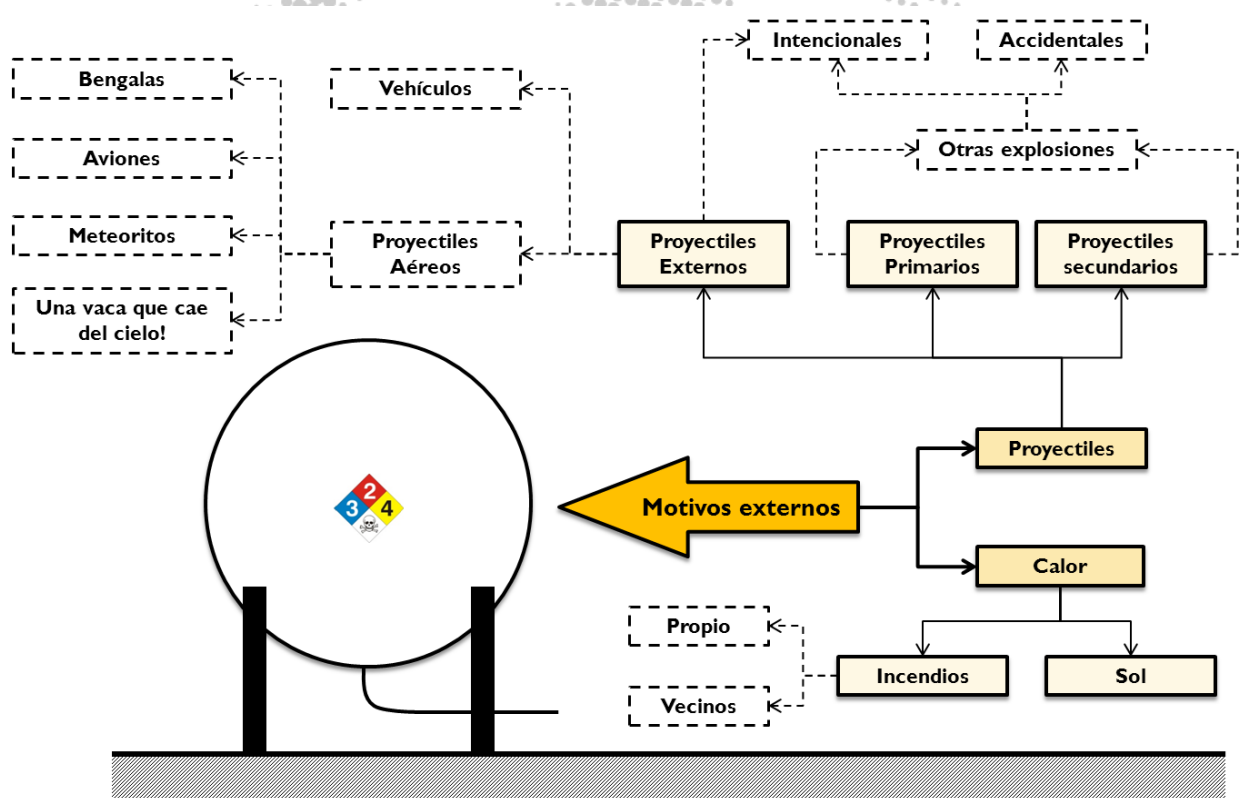
La onda de presión provocada por la rotura del contenedor es muy direccional, desplazándose fundamentalmente en la dirección de la descarga y causando efectos de presión a distancia mucho mayor en dicha dirección. No obstante, se generan, prácticamente en todas direcciones, significativos efectos de presión.

Este tipo de explosión es un proceso relativo donde no importa porque y de donde, pero si se rompe el recipiente, y se produce una súbita liberación de gas a alta presión en el ambiente, entonces estamos frente a una explosión.



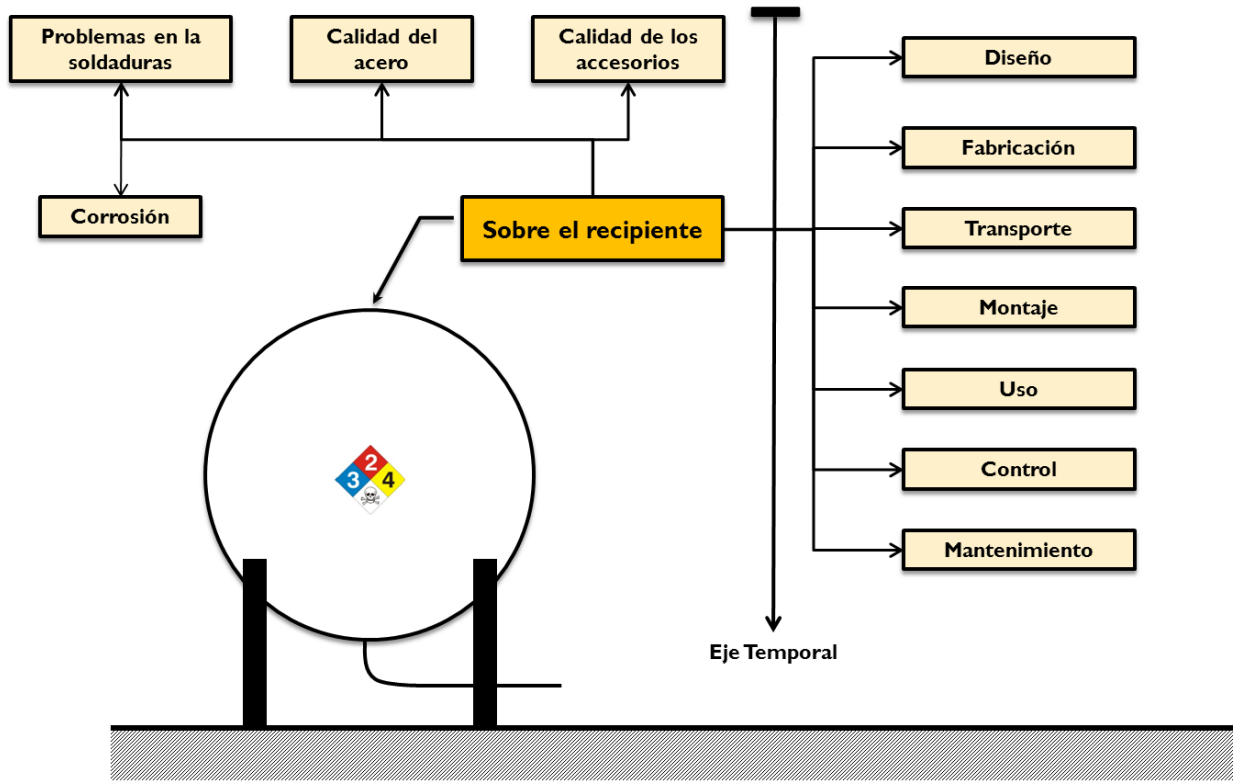
4.2.1) Lo que Sucede Fuera del Recipiente

Este análisis teórico se hace bajo la hipótesis de que la rotura del recipiente sucede por causas externas ajenas al producto involucrado, y que el recipiente se encuentra en óptimas condiciones. El fallo estructural del recipiente se puede producir por un calentamiento localizado o generalizado externo (por ejemplo un incendio en la zona de almacenamiento) produciendo una disminución en la resistencia mecánica del recipiente, por un proyectil externo (por ejemplo otra explosión) o por un impacto mayor como puede ser el choque de un vehículo.

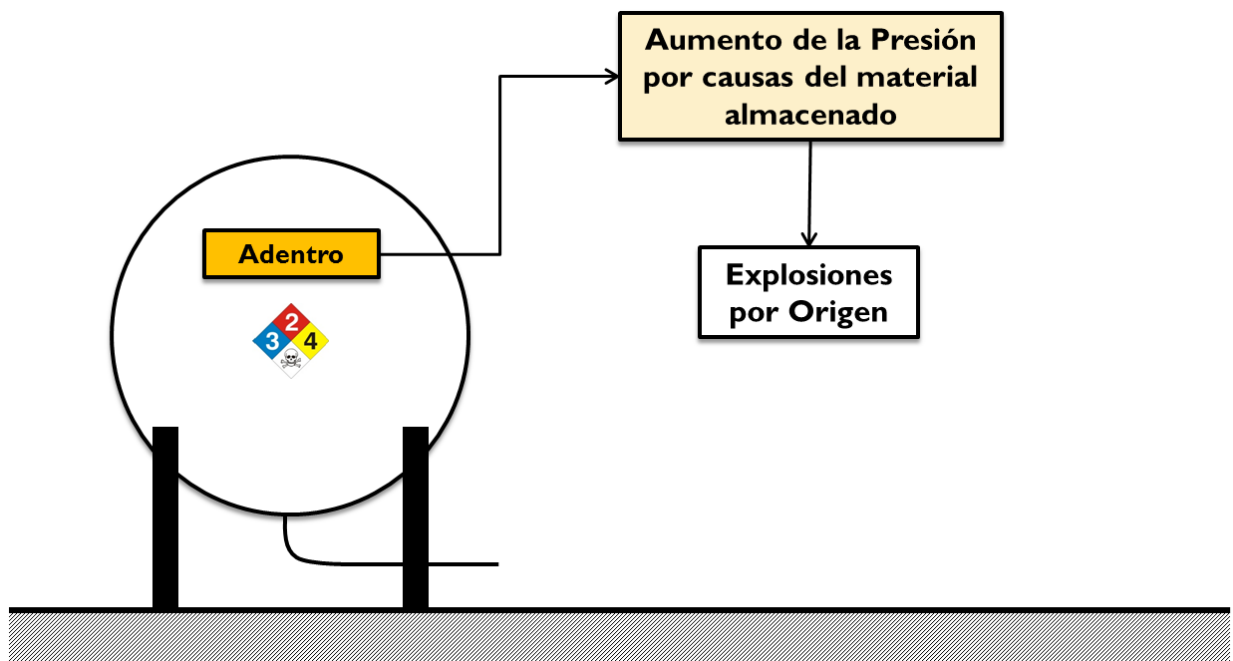


4.2.2) Lo que le Sucede al Recipiente

Este análisis teórico se hace bajo la hipótesis de que el contenido del recipiente no está sufriendo ningún cambio fisicoquímico. El fallo de las paredes del contenedor se puede deber a corrosión interna o externa, espesor no adecuado de las paredes, fallos del material, fallos en las soldaduras, es decir, un debilitamiento del recipiente por fenómenos de diseño o construcción.



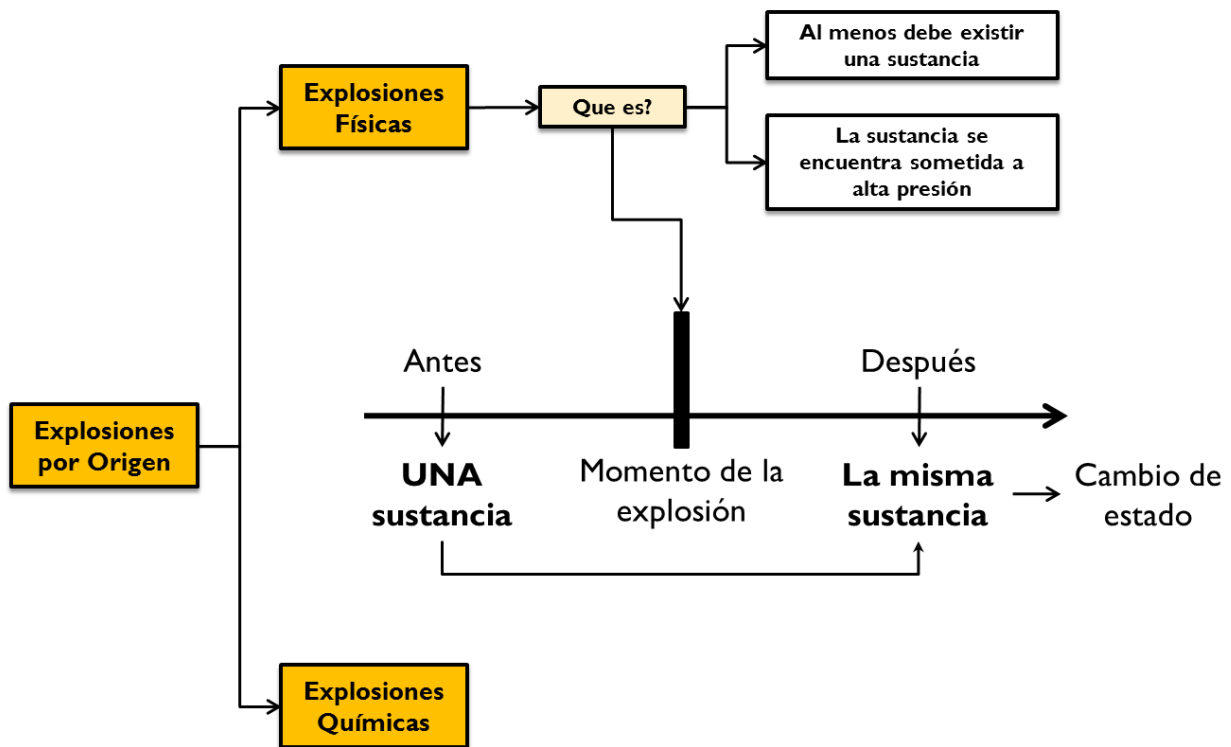
4.2.3) Lo que Sucede Dentro del Recipiente



Este análisis teórico se hace bajo la hipótesis de que el recipiente se encuentra en óptimas condiciones, siendo el contenido del recipiente el que está sufriendo cambios físicos y/o químicos; es decir, el producto contenido dentro del recipiente está sufriendo un aumento en su presión.

La diferencia fundamental entre las explosiones "por origen" se debe a como se produce el aumento de presión interna, y éste proceso puede tener origen físico o químico.

Explosiones Físicas: todo el gas a alta presión se genera por medios mecánicos o por fenómenos sin presencia de un cambio en la sustancia involucrada, antes y después del momento de la explosión la sustancia es la misma, como mucho se puede producir un cambio de estado de la misma. El gas puede alcanzar alta presión mecánicamente; o bien un líquido sobrecalentado puede liberarse súbitamente por medios mecánicos y generar alta presión por evaporación repentina. Ninguno de estos fenómenos significa cambio en la naturaleza química de las sustancias involucradas; todo el proceso de generación de alta presión, descarga y efectos de la explosión puede entenderse de acuerdo con las leyes fundamentales de la física.

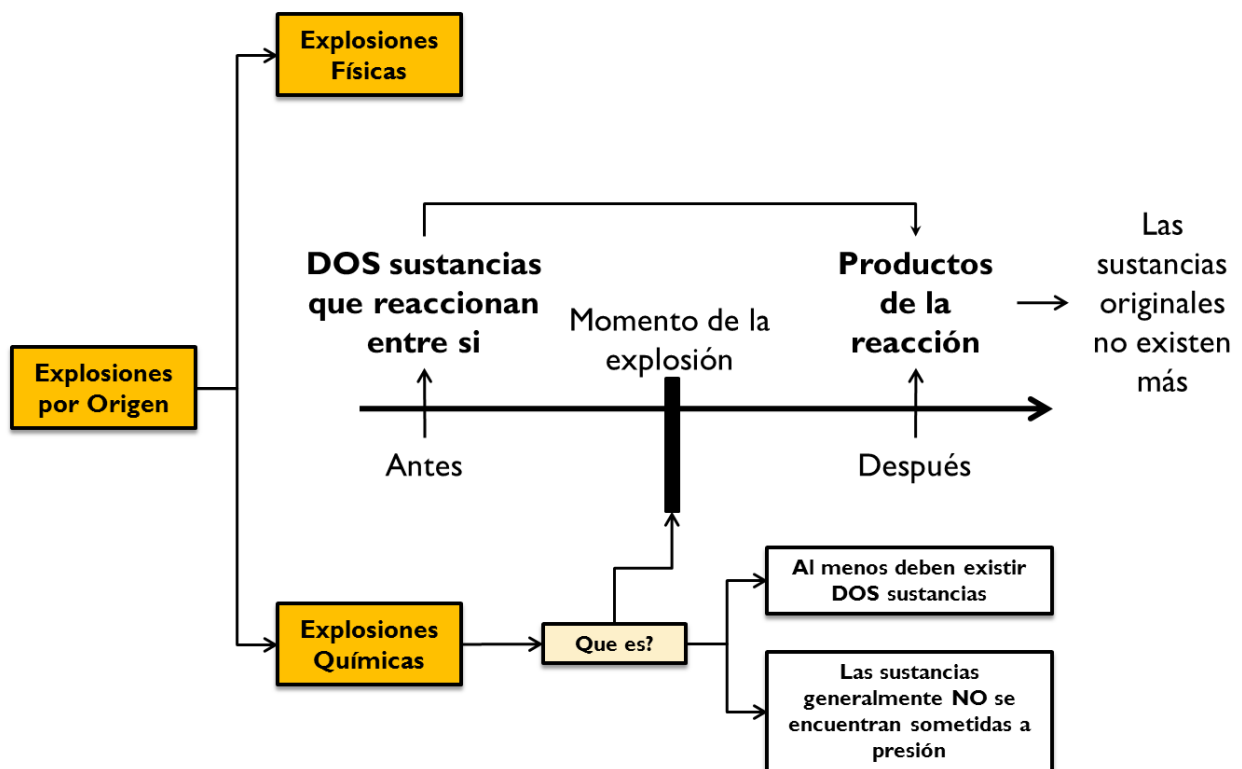


Explosión Química: La generación del gas a alta presión es el resultado de reacciones químicas donde la naturaleza del producto difiere sustancialmente de la inicial (reactivo). La reacción química más común presente en las explosiones es la combustión, en el cual un combustible (por ejemplo el metano) se mezcla con el aire, se inflama y arde generando anhídrido carbónico, vapor de agua y otros subproductos. Hay otras muchas reacciones químicas que generan gases a alta presión. Las explosiones resultan de la descomposición de sustancias puras, detonaciones, combustión, hidratación, corrosión y distintas interacciones de dos o más sustancias químicas en mayor o menor grado de mezcla. Cualquier reacción química puede provocar una explosión si se emiten productos gaseosos, si se vaporizan sustancias ajenas por el calor liberado en la reacción o si se eleva la temperatura de gases presentes, por la energía liberada.

Termodinámicamente, las reacciones químicas se clasifican en exotérmicas (liberan calor) y endotérmicas (absorben calor). El que se libere o absorba calor depende de las condiciones en que las sustancias reaccionan. No obstante, puesto que una reacción química se

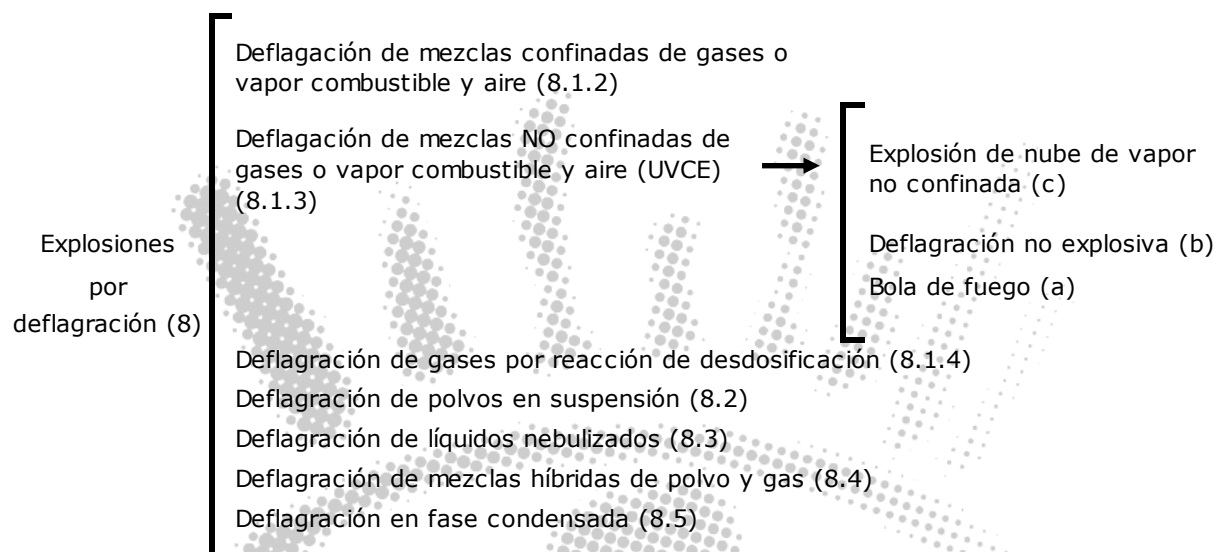
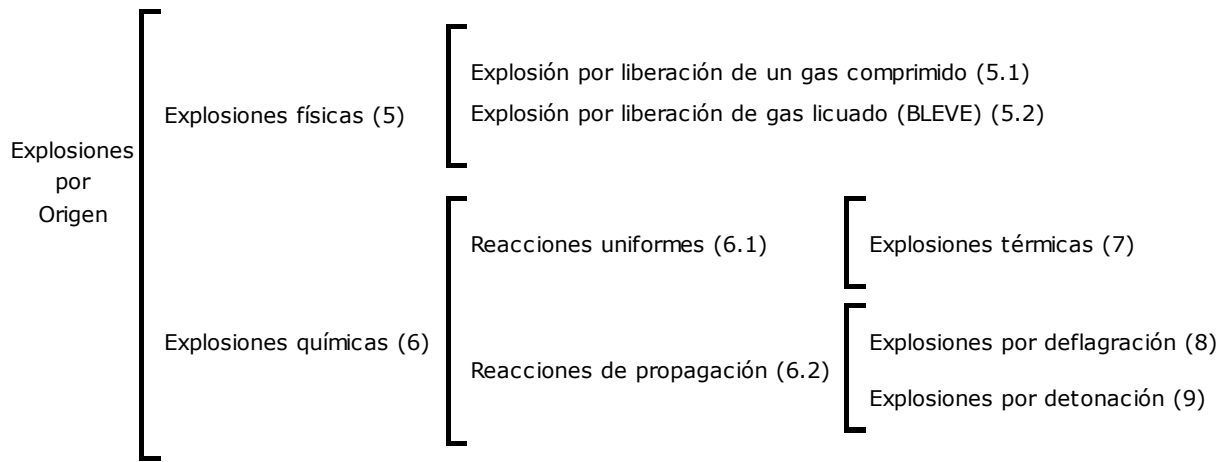
desarrolla con mayor rapidez al aumentar la temperatura, si la reacción es endotérmica se enfriará y autoextinguirá si no se le suministra calor continuamente. Por lo tanto, las reacciones endotérmicas sólo provocan explosiones en circunstancias especiales, donde el reactivo se ve sometido a una aportación sustancial de calor externo y la propia reacción emite productos gaseosos. Como ejemplos de dichas reacciones pueden citarse pirólisis, descarboxilaciones y otras descomposiciones forzadas.

Por el contrario, las reacciones exotérmicas producen un incremento de temperatura acelerando la reacción. Si se genera más calor del que se disipa, la reacción se autoalimenta y autoacelera. Estas reacciones pueden ser incontrolables incluso en condiciones donde se hayan extremado los mecanismos de control. Puesto que libera calor, el gas a elevada presión puede generarse por reactivos que se vaporizan o por calentamiento de gases presentes no producidos por la reacción. De aquí que prácticamente todas las explosiones químicas se deban a reacciones exotérmicas.



Las explosiones entonces pueden tener por origen un fenómeno físico, un fenómeno químico o una combinación de fenómenos físicos-químicos.

De acuerdo con esto, se puede establecer la siguiente clasificación básica de las explosiones industriales:



5) EXPLOSIONES FÍSICAS

Las explosiones físicas constituyen descargas de gas a alta presión sin presencia de reacción química, aunque en la mayoría de los casos se produce vaporización. Una explosión física tiene por origen un fenómeno físico.

Hay dos tipos fundamentales de explosiones físicas:

- Explosión por liberación de un gas comprimido.
- Explosión por liberación de gas licuado (BLEVE).

5.1) Explosión por Liberación de un Gas Comprimido

La sustancia involucrada es un gas contenido en un recipiente a una presión superior a la atmosférica. En todas ellas está involucrado un contenedor, tan como una caldera, un cilindro de gas, etc.

En el contenedor se genera alta presión por compresión mecánica del gas, o introducción de un gas a elevada presión desde otro contenedor, es decir, un trasvase por lo general sin regulador. Cuando la presión alcanza el límite de resistencia de la parte más débil del contenedor, se produce el fallo. En algunos casos, componentes relativamente pequeños en

la instalación, constituyen el punto más débil y se proyecta como metralla. A veces son las paredes las que fallan y el contenedor revienta con extrema violencia.

Los daños generados dependen básicamente del modo de fallo. Si fallan pequeños elementos pero el contenedor permanece prácticamente intacto, la metralla proyectada resulta tan peligrosa como las balas; sin embargo, la descarga de gas es altamente direccional y controlada por el diámetro del agujero que resulta al proyectarse los pequeños elementos. En estas condiciones, los daños causados pueden limitarse a penetraciones de metralla, quemaduras y otros efectos dañinos por gases calientes y/o menores desplazamientos estructurales débiles. Si hay desequilibrio entre la expulsión de pequeños elementos y la liberación de gas, el contenedor sufre un empuje en la dirección opuesta al escape de gas, y puede resultar volcado, derribado o bien desplazado. En este caso, pueden producirse daños por impactos del contenedor en su trayectoria y colapsar el edificio u otras estructuras si se destruyen elementos de sustentación.

5.2) Explosión por Liberación de Gas Licuado (Las BLEVE'S)

BLEVE es una palabra formada por las cinco primeras letras de la frase, en inglés, "Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion", o sea, "Explosión de los vapores que se expanden al hervir un líquido".

Hay dos formas para que se produzca una BLEVE:

- a) Por escape masivo de gas licuado.
- b) Por nucleación espontánea.

5.2.1) BLEVE por Escape Masivo de Gas Licuado

Esta es la llamada Teoría Tradicional sobre la explicación de este fenómeno. La BLEVE comienza con la liberación de una sustancia contenida en un recipiente en estado líquido y que, en condiciones ambientales normales de presión y temperatura, sería un gas o vapor.

Si se rompe el recipiente, este gas o vapor que está licuado se despresuriza y se expande, se expande dentro y fuera del recipiente, el líquido entra bruscamente en ebullición y una gran cantidad de él se evapora muy rápidamente, en forma casi instantánea. El cambio de estado líquido-vapor supone un gran aumento de volumen. El vapor se expande casi instantáneamente. La expansión del vapor produce una onda de presión destructiva, que es en definitiva la que produce la explosión.

Para que se produzca una BLEVE son necesarias dos condiciones:

- 1- Que el recipiente contenga un líquido que, en condiciones ambientales normales de presión y de temperatura, sería un gas.
- 2- Que el líquido sufra una despresurización intensa y súbita, para que se produzca su ebullición instantánea.
- 3- Que se produzca un escape en masa entre 1/3 y 1/2 de la cantidad total del líquido.

Lo que produce la onda de presión es la masa de líquido que hierve y se expande rápidamente fuera del recipiente. Para que esta onda de presión produzca una explosión destructiva, la cantidad de masa que se tiene que escapar debe ser significativa. Esto prácticamente sólo se produce cuando en un recipiente se produce una gran rotura.

El funcionamiento de una válvula de seguridad o la aparición de una pequeña fisura en el recipiente provoca una despresurización insuficiente (escape de masa insignificante), que sólo da lugar a la ebullición de una pequeña parte del líquido.

La mayor parte de las BLEVE se producen por un fallo del recipiente debido a la acción del fuego. Sin embargo, el recipiente puede fallar también debido a un impacto que ocasione su rotura, perforación o debilitamiento estructural.

Las categorías de sustancias que en principio pueden producir BLEVES son:

1) Gases Licuados: sustancia que, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas. Para licuarlo, se somete, dentro de su recipiente, a una presión muy superior a la presión ambiental normal.

Su temperatura es, generalmente, la temperatura ambiental. Esa temperatura es superior a su punto de ebullición en condiciones normales.

Con la presurización del gas no se consigue su licuefacción total, sino que se obtiene una zona de gas licuado (fase líquida) en la parte inferior del recipiente y una zona de gas comprimido (fase gaseosa) en su parte superior. Las presiones de ambas fases están en equilibrio.

2) Gases Criogénicos: sustancia que, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas. Los gases criogénicos se almacenan a una temperatura muy inferior a la temperatura ambiental normal (generalmente a -90°C) y a una presión igual o ligeramente superior a la atmosférica, que en muchos casos es suficiente para el gas se licue.

Si la temperatura del gas es superior a su punto de ebullición a la presión de almacenamiento, el gas criogénico está comprimido.

Si la temperatura del gas es inferior a su punto de ebullición a la presión de almacenamiento, el gas criogénico está licuado.

3) Líquidos Sobrecalentados: sustancia que, en condiciones normales de presión y temperatura, es un líquido. El líquido sobrecalentado, es un LÍQUIDO, que está dentro del recipiente a una temperatura superior a la temperatura ambiente normal y superior a su punto de ebullición, a esa temperatura y a la presión atmosférica, sería un gas; ejemplo, la olla a presión.

5.2.2) Curva de Saturación

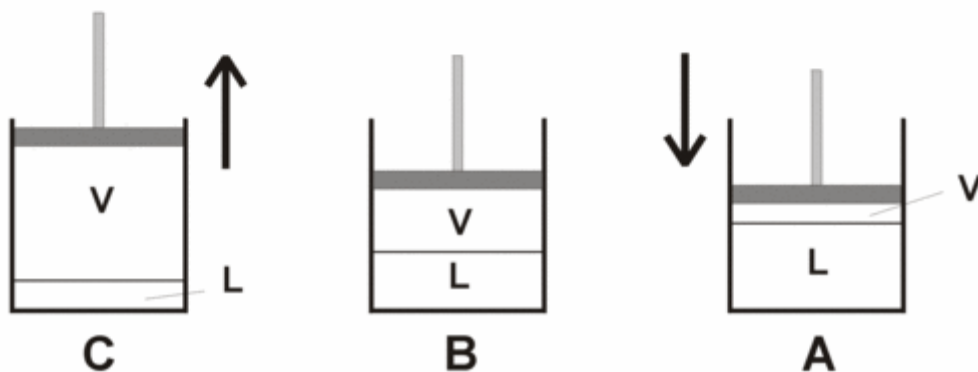
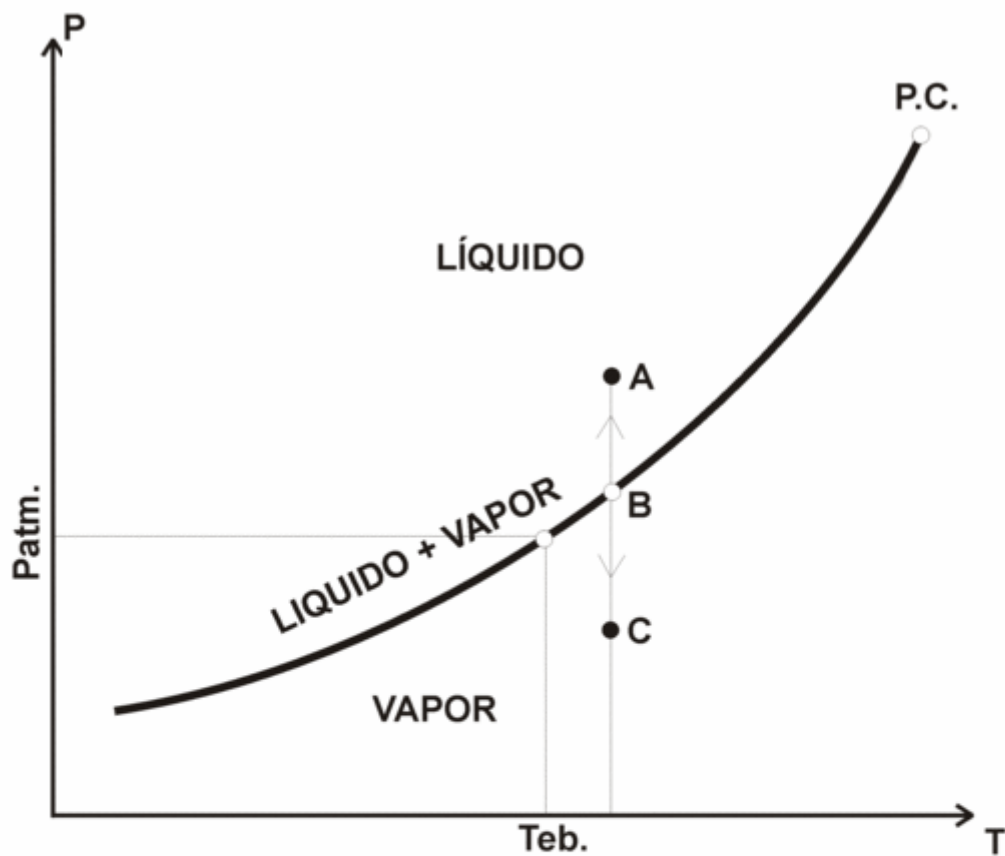
Cualquier líquido o gas licuado almacenado en el interior de un recipiente cerrado se encuentra en dos fases, líquido y vapor en situación de equilibrio, según la curva de saturación presión - temperatura, o sea que a cada temperatura del líquido le corresponde una determinada presión de vapor, que es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

Si el recipiente por factores externos se calienta o enfría lentamente, como por ejemplo, por efecto ambiental, el punto de equilibrio se mueve según la curva hacia valores más altos o bajos de presión. En condiciones normales, siempre dentro del recipiente las fases se encuentran en equilibrio.

Si se iguala la presión a la atmosférica, por ejemplo, por rotura del recipiente, dentro del recipiente, por un instante la masa tiene más líquido que la que le corresponde por equilibrio, y está a una temperatura más alta. Si observamos la curva de equilibrio del propano a presión atmosférica la temperatura de equilibrio es -40°C , es decir, tiene $+60^{\circ}\text{C}$ que la temperatura de almacenamiento. Si esta despresurización a la presión atmosférica fue brusca, en el interior del recipiente se encuentra una masa a 20°C , cuando debería estar a -40°C , y por consiguiente esta masa no tuvo el tiempo suficiente para enfriarse gradualmente evaporando o pasando a estado de vapor parte de su contenido líquido, por consiguiente la hace en forma brusca, en estas condiciones el líquido queda en desequilibrio almacenando más calor del que le corresponde. Este calor almacenado en el líquido provoca una rápida evaporación de parte del mismo, que será directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el líquido en el instante de la rotura y su punto normal de

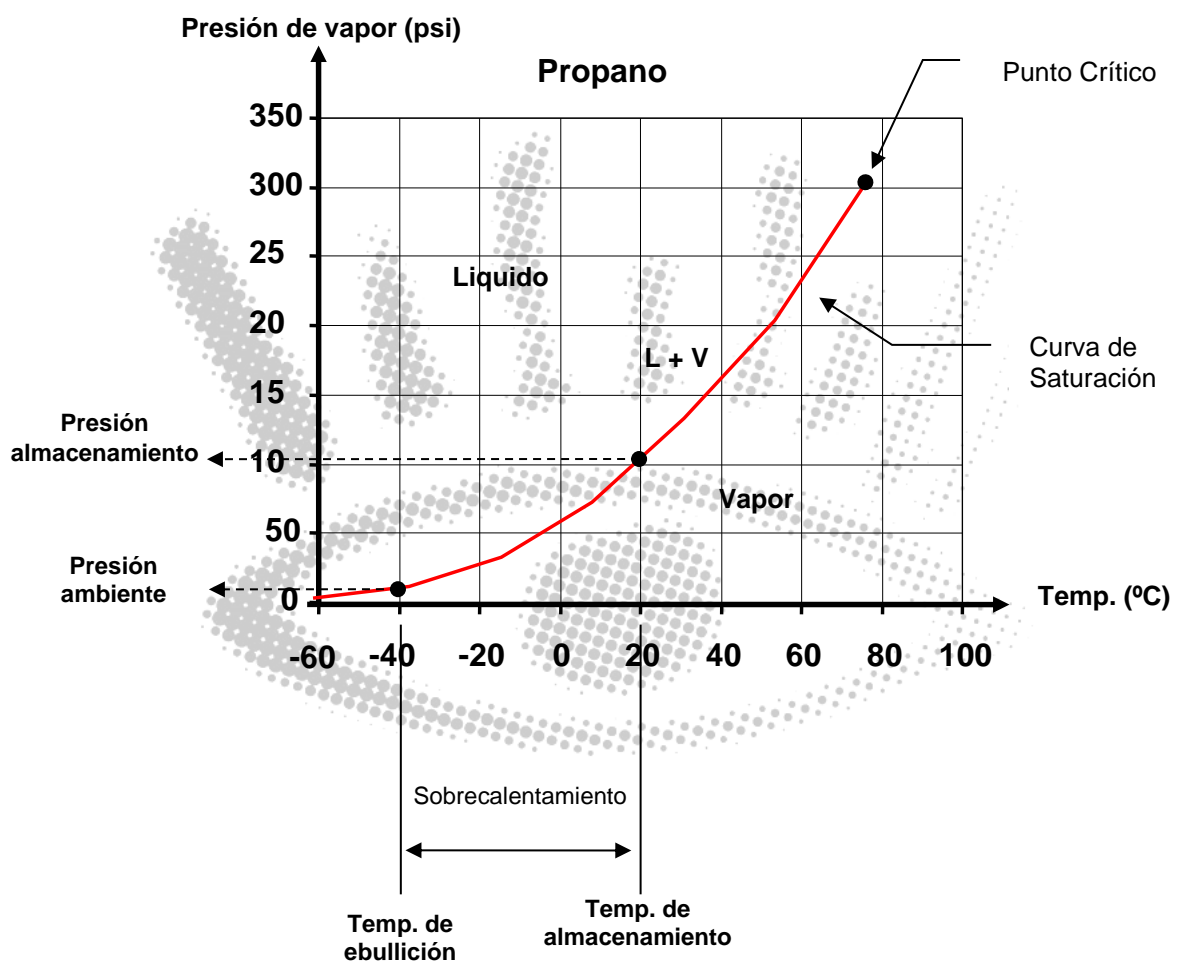
ebullición. En muchos gases licuados inflamables, dicha diferencia, a temperatura ambiente, puede producir la vaporización de 1/3 del líquido.

Esta vaporización se acompaña de una gran expansión por el paso del líquido a vapor. Es este proceso de expansión el que proporciona la energía que agrieta la estructura del recipiente, proyecta los fragmentos y ocasiona la rápida mezcla con el aire (que da por resultados la característica bola de fuego cuando se produce la ignición al entrar en contacto con el fuego que origino inicialmente la BLEVE), así como la pulverización del resto del líquido frío. Gran parte de las pequeñas gotas de la pulverización arden al salir proyectadas en el aire; sin embargo, no es raro que el líquido frío salga despedido desde la zona de incendio a demasiada velocidad para que pueda tener lugar su ignición y caiga al suelo todavía en forma líquida. En una ocasión se encontraron trozos de pavimento de asfalto disueltos por el gas en estado líquido a distancias de 800 metros del lugar donde ocurrió una BLEVE de gas licuado de petróleo. En otros casos, bomberos que estaban intentando sofocar una BLEVE sintieron frescor al pasar cerca de ellos el líquido frío.



La reducción de la presión interna hasta el nivel de la presión atmosférica es un recipiente es el resultado de un fallo estructural del mismo, que se debe muy frecuentemente al debilitamiento del metal del recipiente por su contacto con el fuego; sin embargo, puede suceder igual si se perfora o se agrieta por alguna otra razón.

El funcionamiento totalmente satisfactorio de una válvula de seguridad de resorte, dentro de los parámetros de diseño, no puede impedir que suceda una BLEVE. Por su propia naturaleza, este tipo de válvula no puede reducir la presión a nivel atmosférico, sino solamente hasta un punto algo por debajo de la presión necesaria para comenzar la descarga. Por lo tanto, el líquido siempre permanecerá a una temperatura por encima de su punto de ebullición normal; siempre habrá presión en el interior del recipiente y la estructura de éste estará sometida a esfuerzos de tracción.

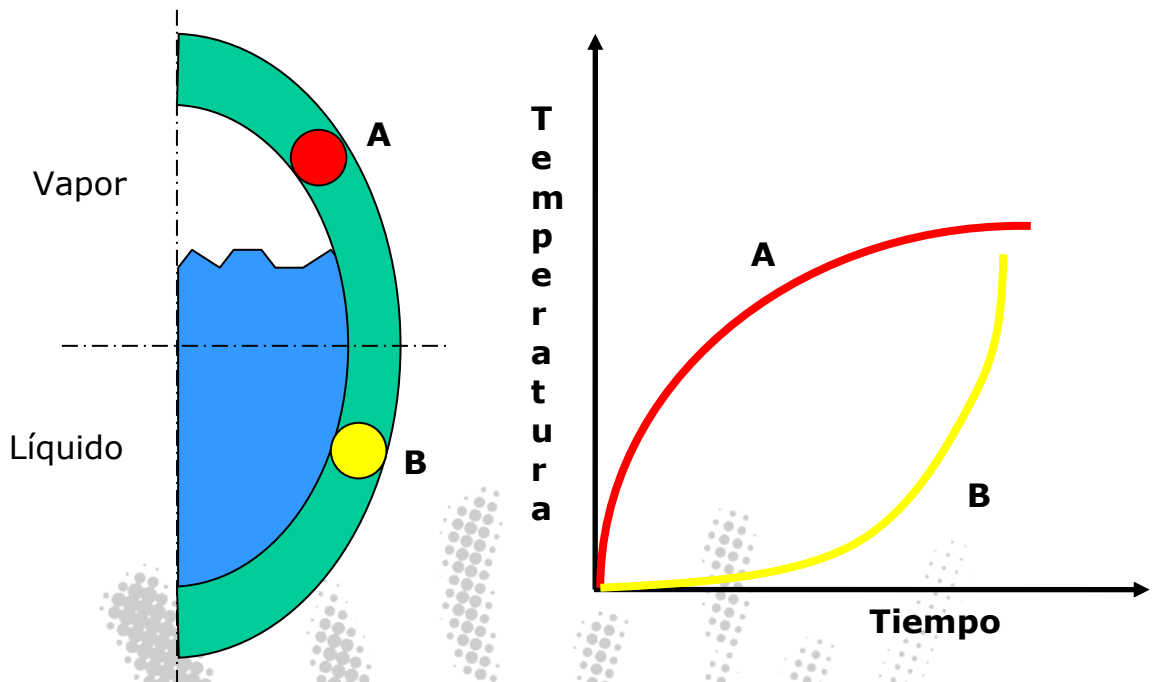


5.2.3) Efecto del Calor en el Recipiente

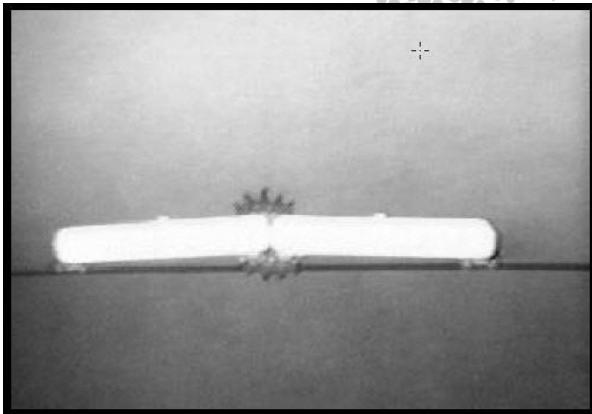
Es muy difícil calentar el recipiente metálico en forma apreciable en la zona que se encuentra en contacto con el líquido, porque éste disipa el calor del metal actuando como regulador térmico.

En la mayoría de las BLEVE en las que el fallo se debe a sobrecalentamiento del metal, éste se origina en la zona de vapor y se caracteriza por el alargamiento y reducción de espesor y por la aparición de una grieta longitudinal que se alarga hasta alcanzar una magnitud

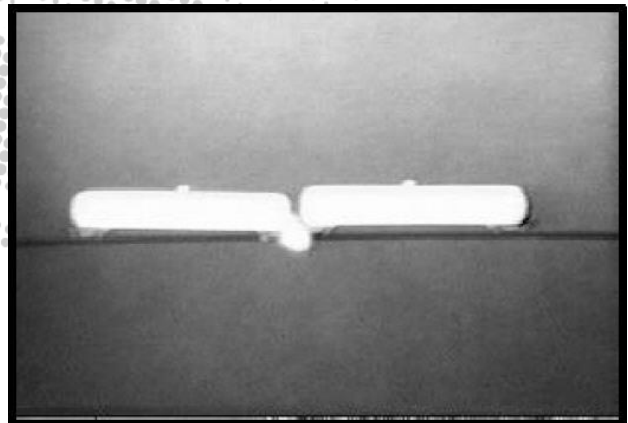
crítica. En este punto, se fragiliza la estructura y se propaga la grieta a la velocidad del sonido. Por último, el contenedor se rompe en pedazos.



5.2.4) Ejemplo de cómo se puede producir una BLEVE¹

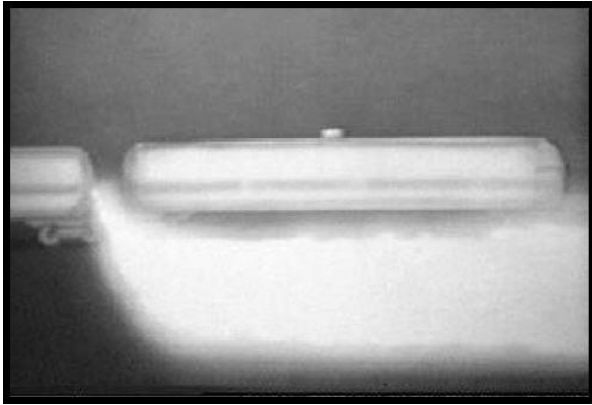


1.- Dos vagones chocan.

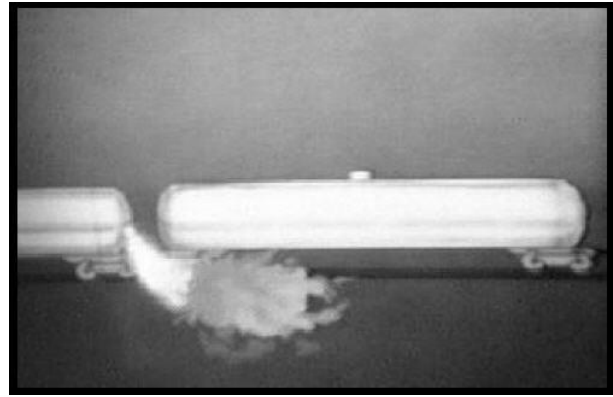


2.- Se produce una fuga de GLP.

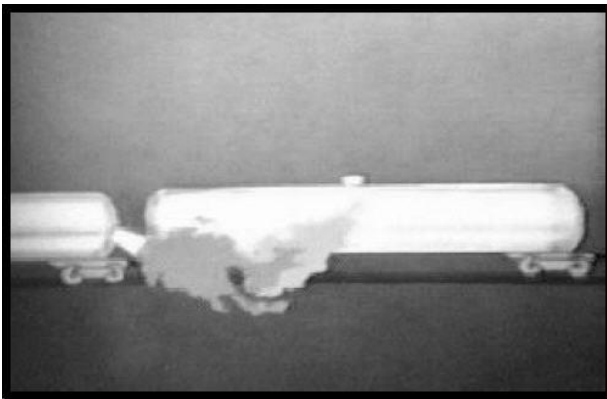
¹ Secuencia extraída del material del Curso Normalizado de Seguridad Contra Incendios y Emergencias con Gases Inflamables – Cuarto Módulo “Incendio en Gases Inflamables” por César Duque & Asociados.



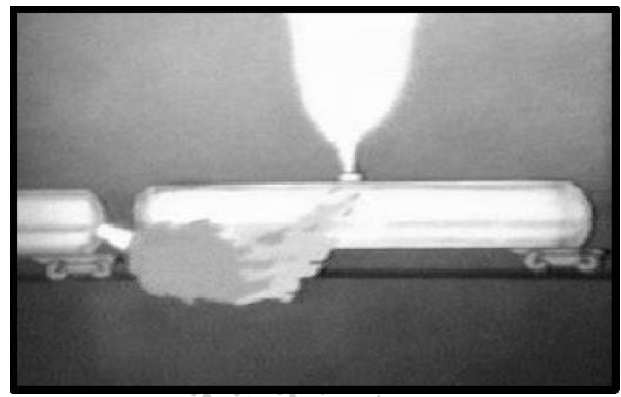
3.- El gas se extiende rápidamente.



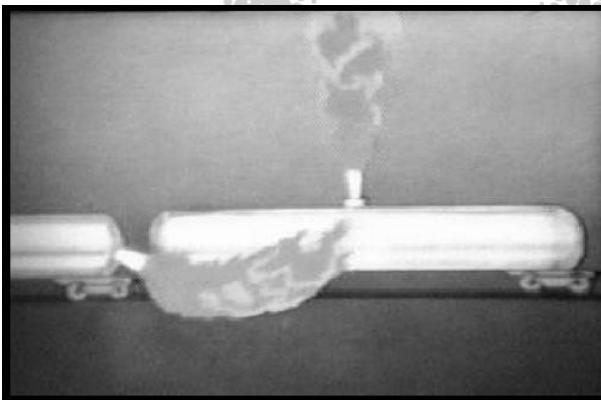
4.- Encuentra una fuente de calor y se incendia.



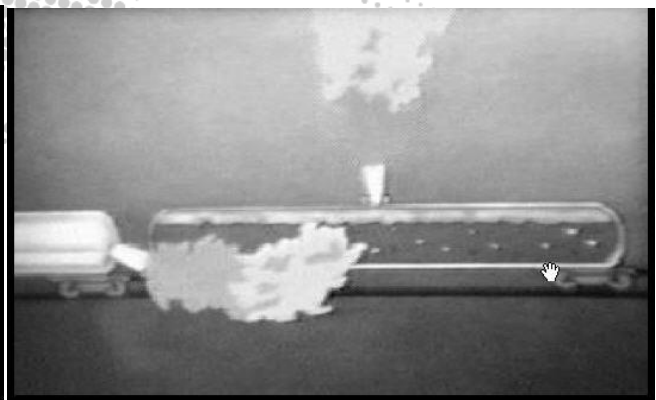
5.- La llama actúa sobre el tanque expuesto.



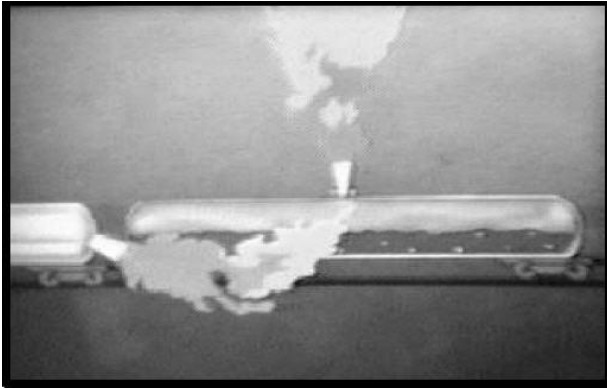
6.- Las llamas calientan el tanque y el contenido, produciendo evaporación y aumento del volumen de GLP, esto actúa abriendo la válvula de seguridad.



7.- El vapor liberado por la válvula de seguridad se incendia.



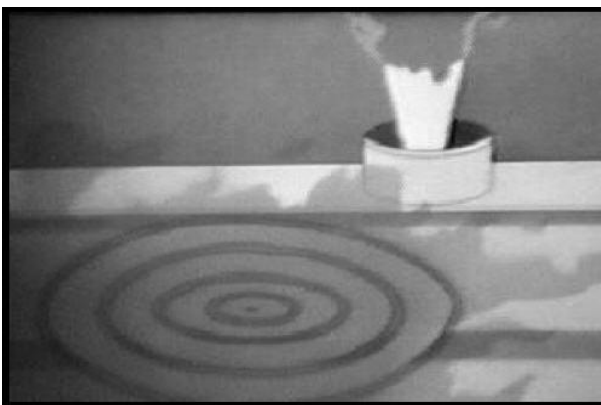
8.- El calor actúa sobre la parte del tanque en contacto con el líquido. Este se calienta y vaporiza más rápidamente.



9.- Disminuye el contenido en el tanque debido a la vaporización y liberación por la válvula.



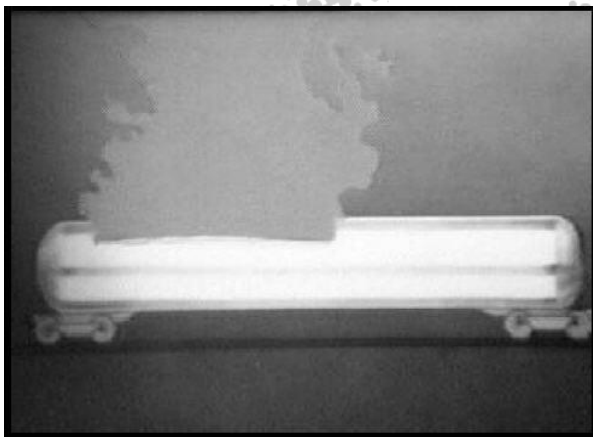
10.- Se calienta la parte del tanque que esta en contacto con la fase vapor.



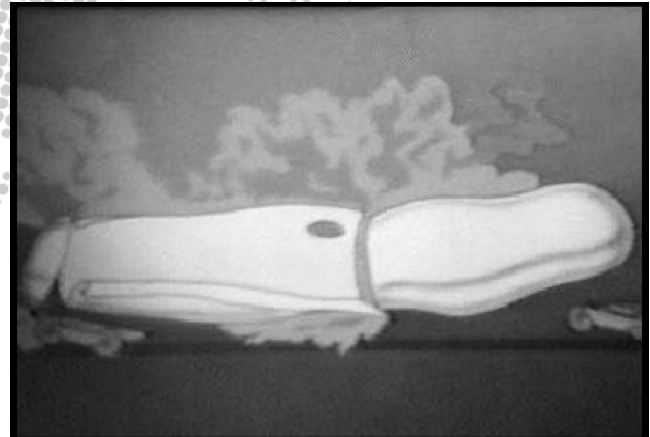
11.- El tanque se debilita y la presión aumenta.



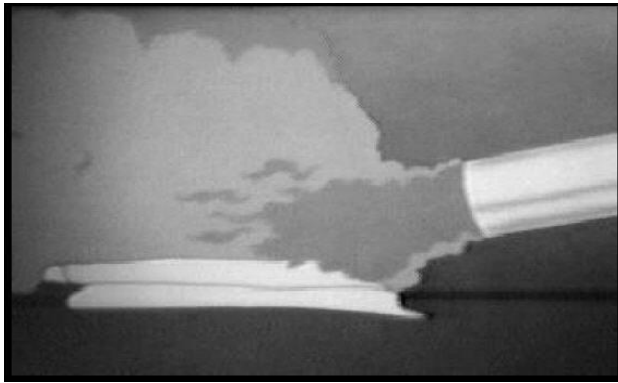
12.- El tanque falla debido al calor y la presión.



13.- La falla en el tanque se incrementa rápidamente.



14.- El tanque se rompe en múltiples pedazos.



15.- Los pedazos del tanque vuelan en varias direcciones y parte del contenido del tanque se vaporiza y se incendia.



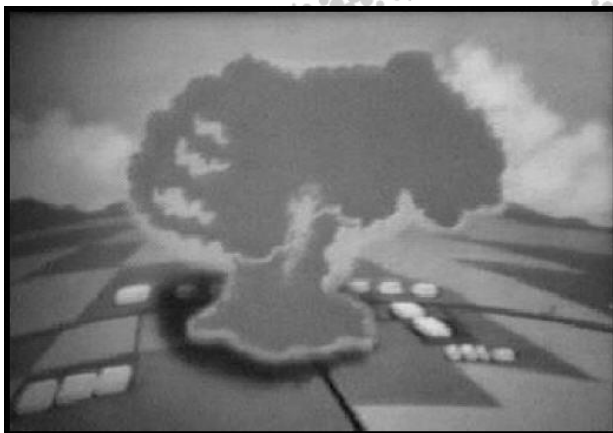
16.- Fragmentos del tanque pueden viajar hasta 700 o más metros, generando destrucción.



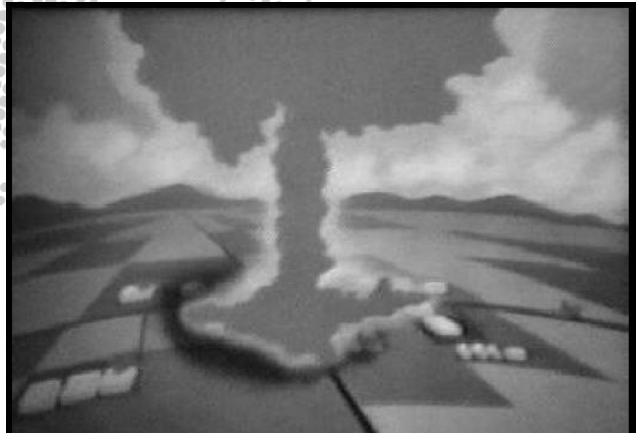
17.- La nube de gas y la bola de fuego crecen a medida que el líquido se expande.



18.- Se produce una onda explosiva de gran capacidad destructiva.



19.- Se genera y se libera gran cantidad de calor en muy corto tiempo.



20.- Se genera una onda térmica de gran magnitud debido al calor liberado.



21.- Destrucción total alrededor de 300 o 400 metros alrededor del tanque afectado.

5.2.5) BLEVE por "Nucleación Espontánea"²

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 (fig. 1).

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 $A \rightarrow A'$, la diferencia de temperaturas es $T_A - T_B$.

² Tema desarrollado sobre la base del libro "46 Productos Peligrosos: condiciones básicas para su explosión por BLEVE", autores: Dr. José Luis Mañas Lahoz, Ing. Guillermo Planas Coreo e Ing. José Luis Sanchez Ramos, Editorial CEPREVEN.

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.

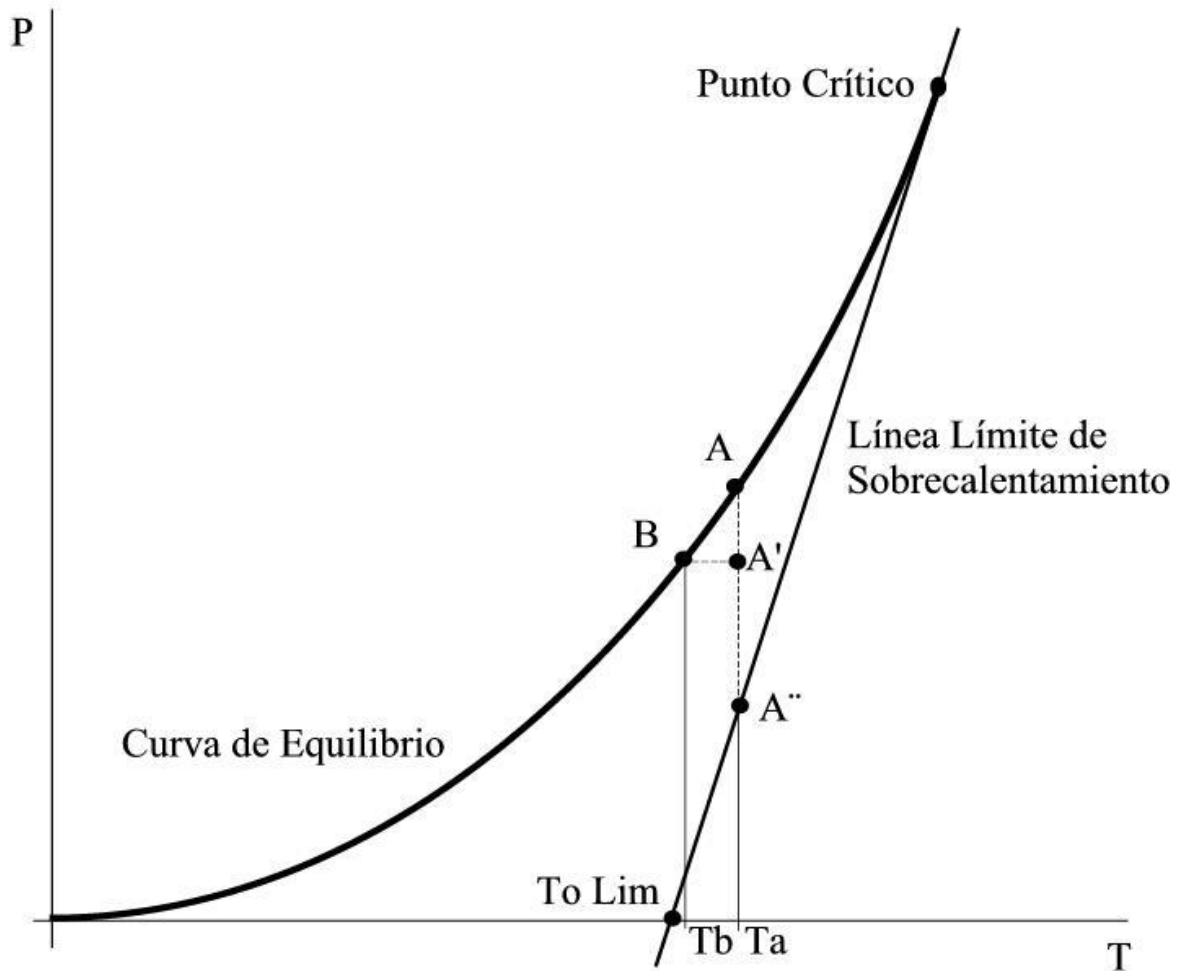
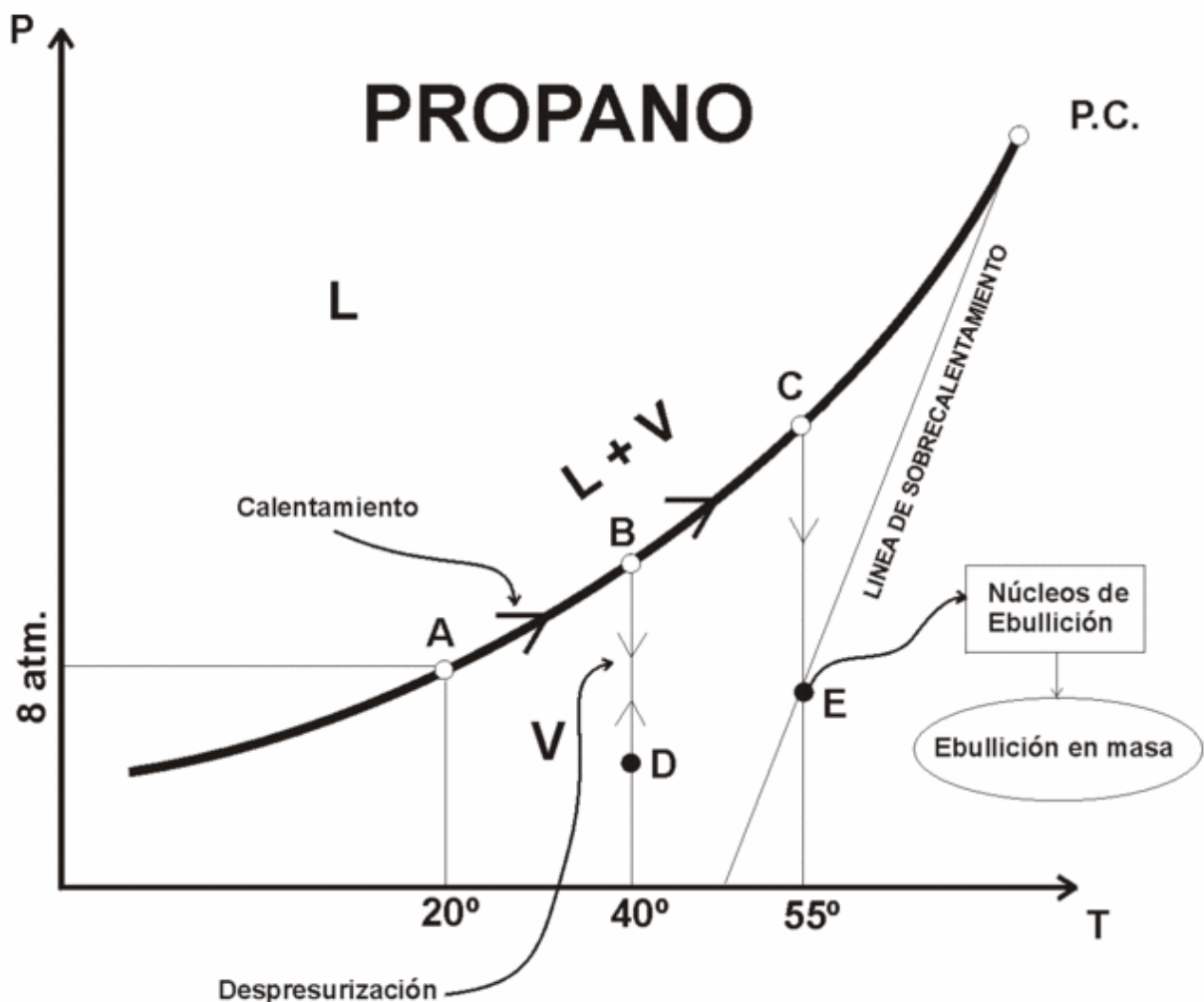


Fig. 1 - Sobrecalentamiento de Gases Licuados

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

- Que se trate de un gas licuado o de un líquido muy caliente y a presión (líquido sobrecalentado).
- 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

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

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

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.

En el caso de los líquidos, para que se pueda dar una BLEVE, ha de existir la posibilidad de que el recipiente esté a presión (cuando accidentalmente se caliente).

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.).

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.

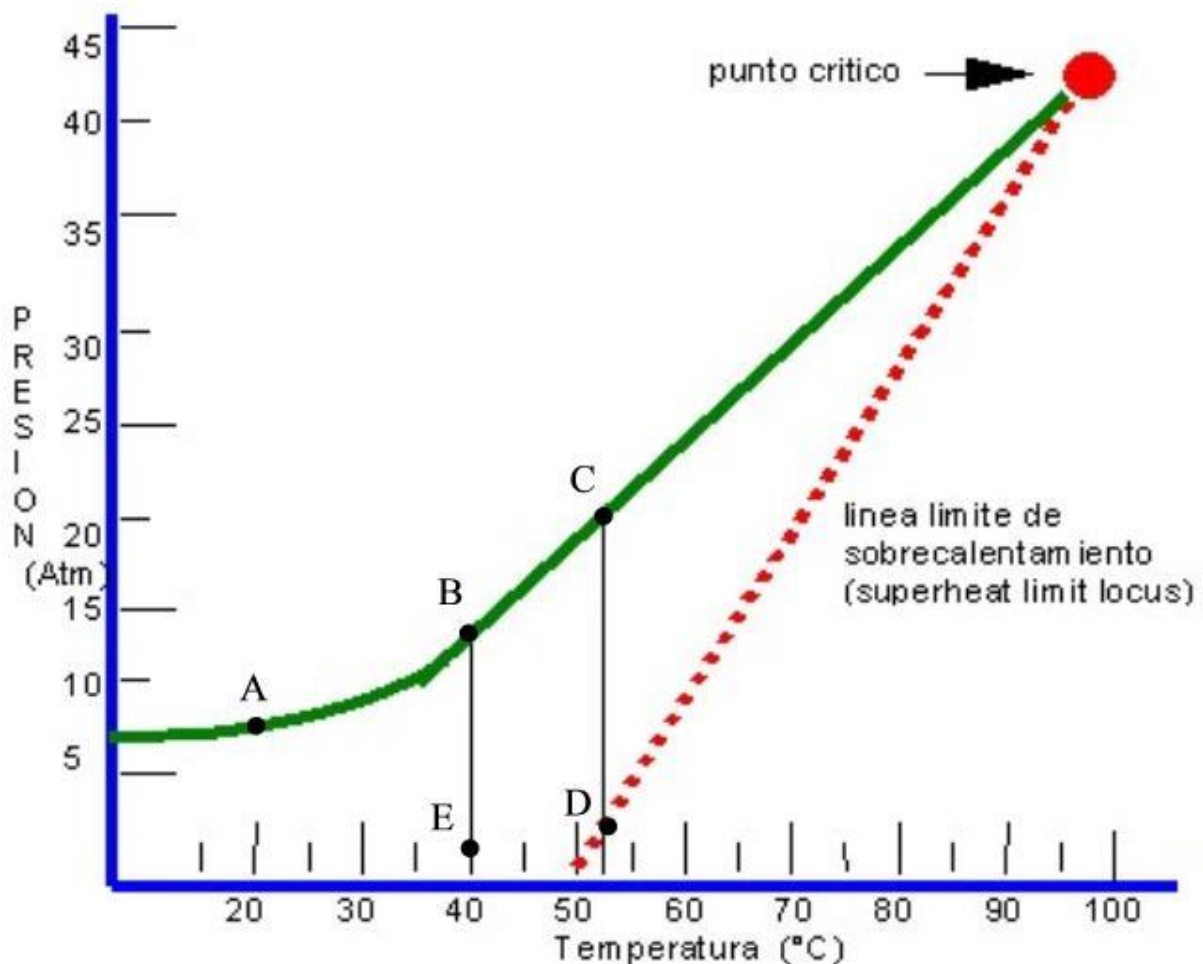
Comportamiento de las Válvulas de Seguridad en las BLEVES

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.



Línea límite de sobrecalentamiento y curva de presión de vapor para el propano (REID 1979)

Fig. 3

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", o sea, 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 desearíamos. 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.

c) 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 $T \cong -42^{\circ}\text{C}$ 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 rajar 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 fig. 3 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

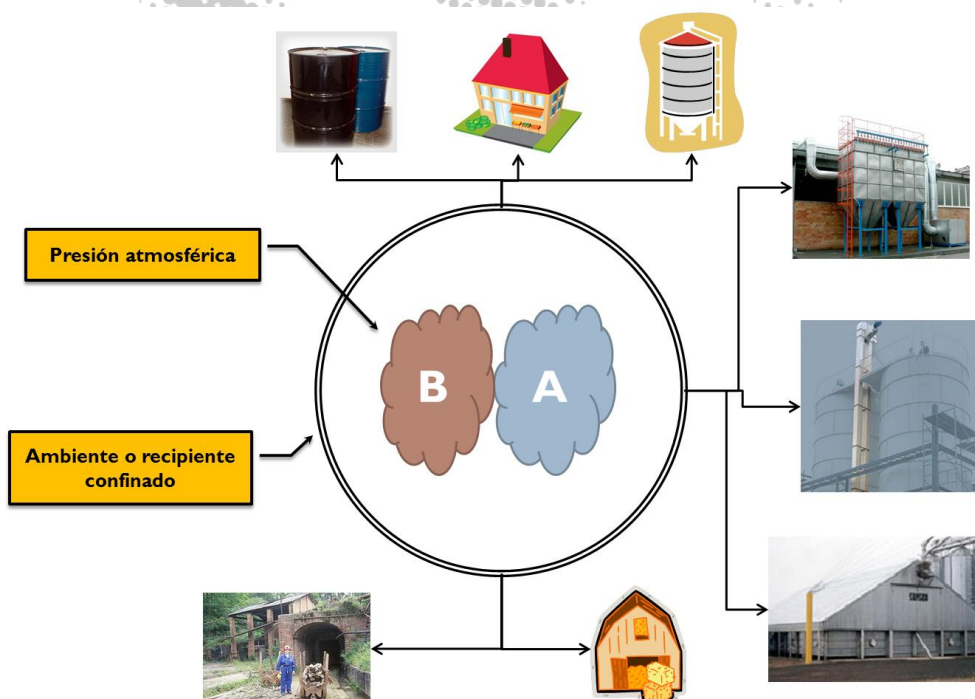
núcleos iniciadores de la ebullición con lo que se producirá, por tanto, el referido "desequilibrio", no habrá BLEVE por nucleación espontánea, ya que el líquido no está en la zona donde se puede producir la nucleación espontánea. Pasado unos instantes y debido a dicho desequilibrio ocurrirá una ebullición 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 rajar 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 es 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.

6) REACCIONES QUÍMICAS QUE DAN LUGAR A EXPLOSIONES

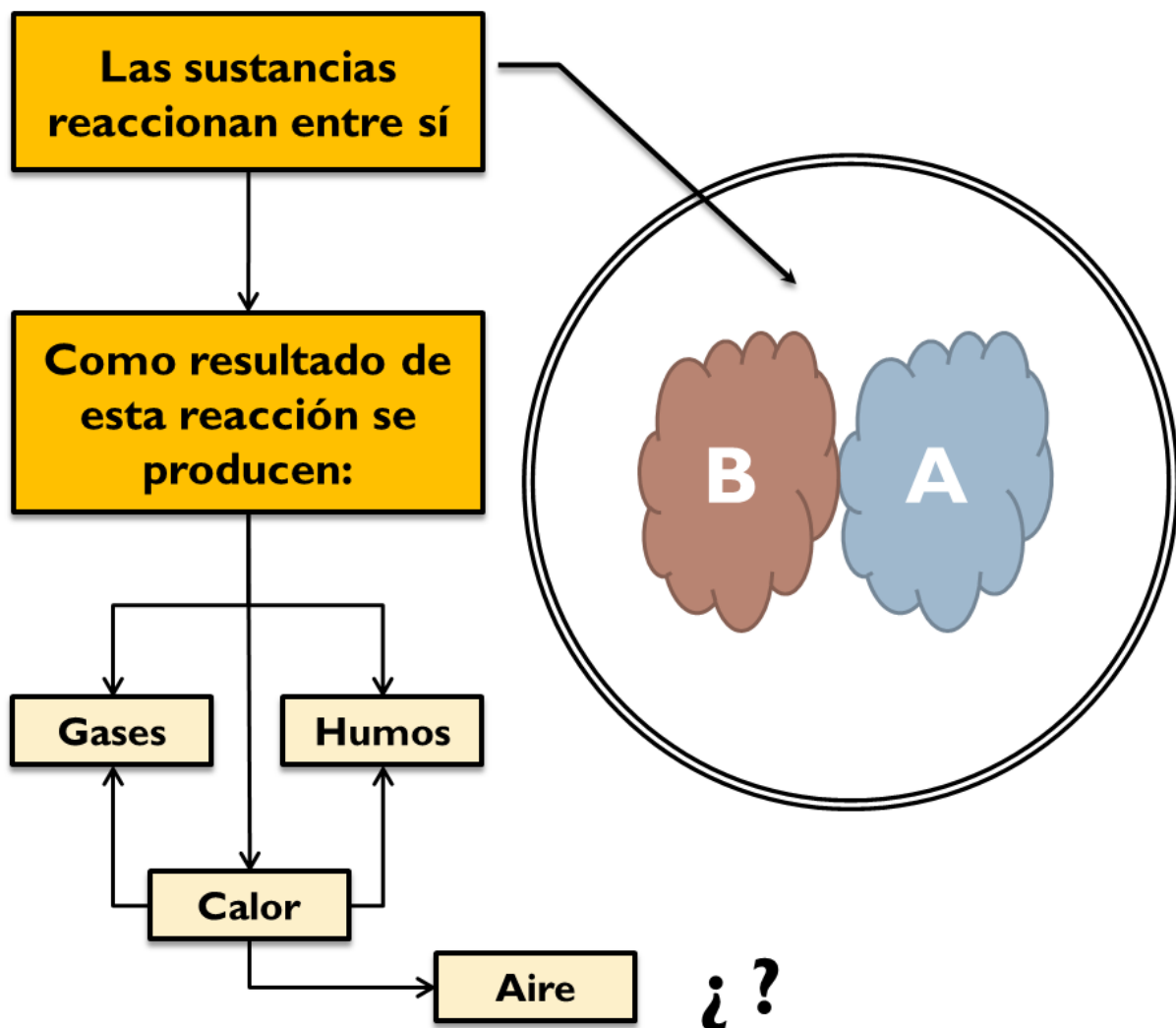


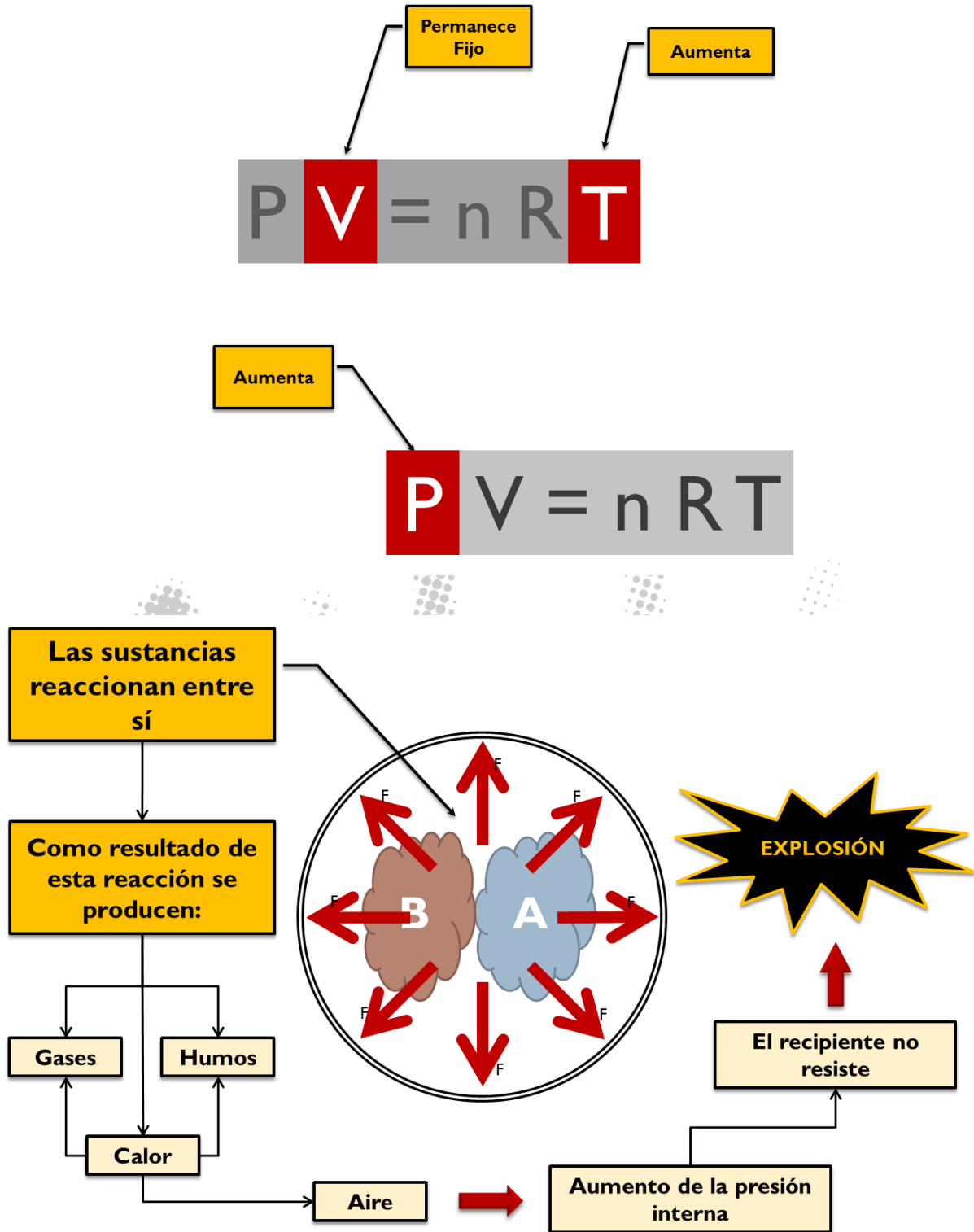
Una reacción química supone al menos a dos productos que reaccionan entre sí. Si como resultado de esta reacción se generan gases y calor que se almacenan en el recipiente en donde se está produciendo dicha reacción, la presión aumenta, el recipiente se debilita, se rompe por su punto más débil y se 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 reacción química y las sustancias involucradas en el proceso, pero en el fondo son todas iguales.

Todo el estudio de las explosiones químicas tiene que ver fundamentalmente en cómo sucede este proceso de generación de gases y calor.

El recipiente produce el confinamiento de los gases, y pueden ser de una gran variedad, desde los más complejos equipos industriales a una habitación doméstica.





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.

6.1) 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.

6.1.1) 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.

6.1.2) 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.

6.1.3) 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.

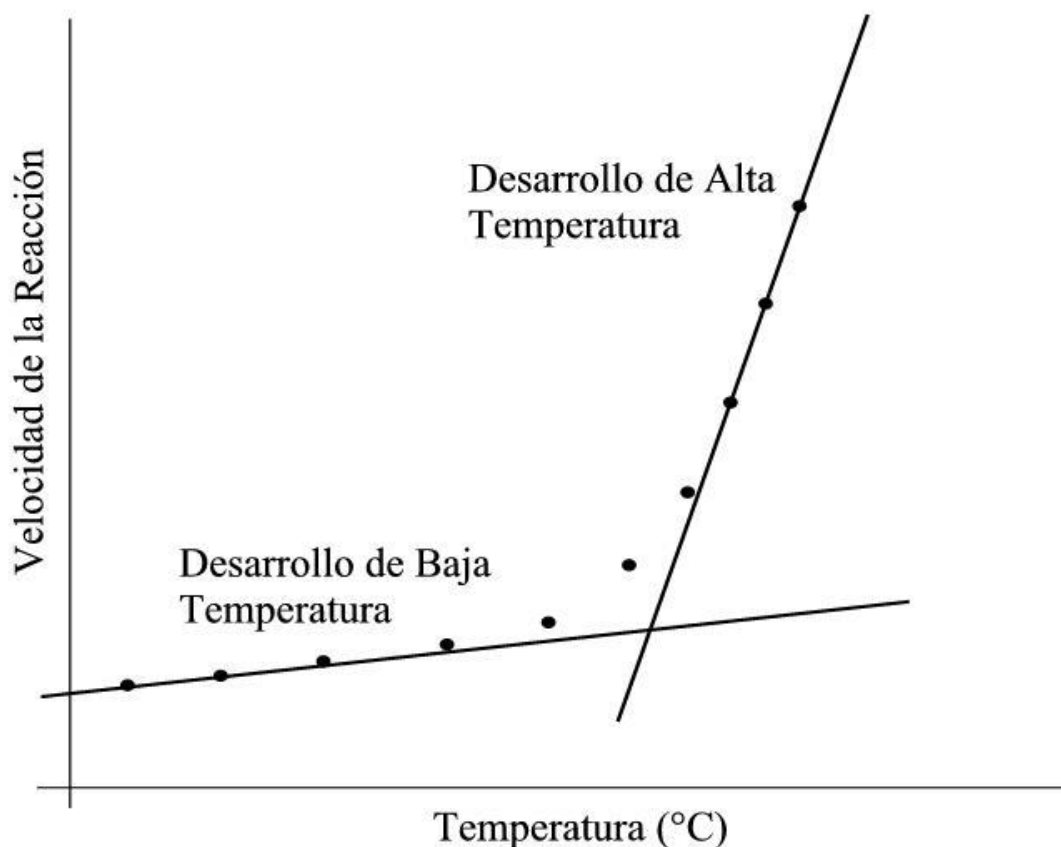


Fig. 4 - Velocidad de una reacción Uniforme en función de la temperatura de la masa reactiva

6.1.4) 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.

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.

6.1.5) 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.

6.1.6) 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).

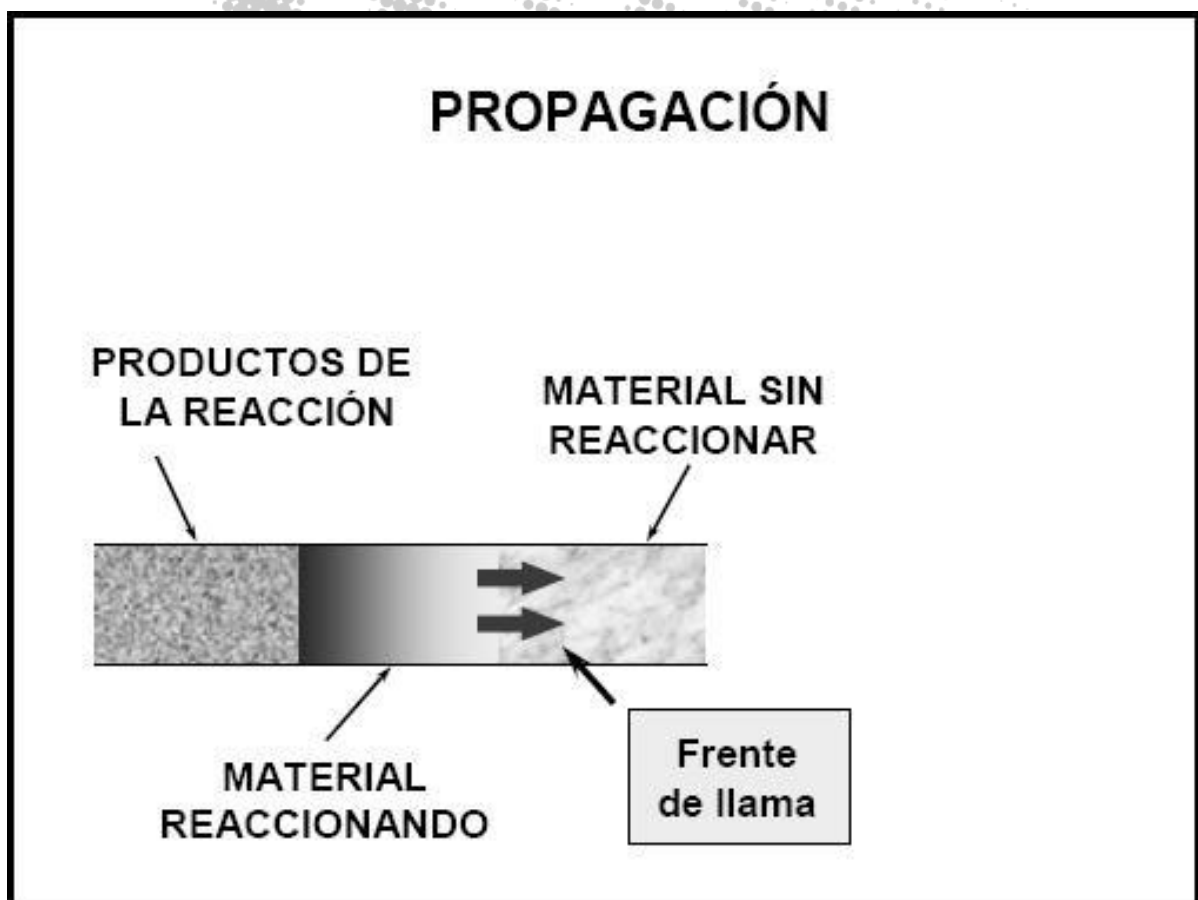
Las reacciones uniformes incontroladas siguen, normalmente, un desarrollo de alta temperatura y el efecto del núcleo es muy acentuado. En estas condiciones, la reacción puede terminar de tres maneras:

- La reacción se extingue por una rápida consunción³ 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.

6.2) Reacciones de Propagación

En una reacción de propagación pueden diferenciarse tres zonas distintas:

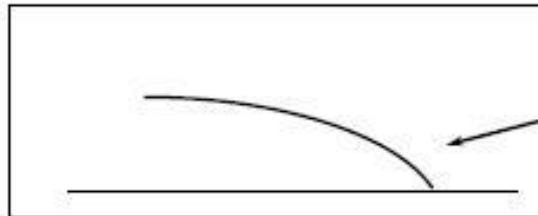
- Zona de reacción (llama)
- Zona de productos (detrás de la llama)
- Zona sin reacción (frente de llama)



³ Acción y efecto de consumir o consumirse.

PROPAGACIÓN

Deflagración



Variación continua de:

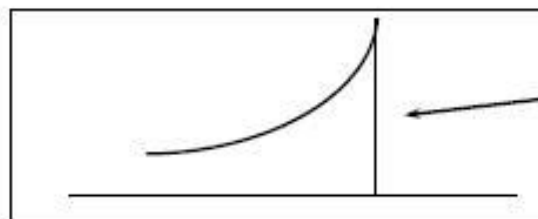
- Densidad
- Presión
- Temperatura



Frente de llama

PROPAGACIÓN

Detonación



Variación brusca de:

- Densidad
- Presión
- Temperatura



Frente de llama y
onda de choque

	DEFLAGRACIÓN	DETONACIÓN
Presión desarrollada	Baja (1 a 10 bar)	Alta (más de 10 ⁵ bar)
Velocidad de propagación	Baja (0,001 a 100 m/s)	Alta (más de 1.000 m/s)
Frente de llama respecto de la onda de presión	Atrasado	Acoplado

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.

6.2.1) 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.

6.2.2) 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.

6.2.3) 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.

7) EXPLOSIONES TÉRMICAS

Si una reacción uniforme genera gases a alta presión, puede producirse una explosión. Este tipo de explosión se llama explosión térmica, porque se debe al calor acumulado, que eleva la temperatura de la masa reactiva y la velocidad de la reacción.

Las reacciones uniformes controladas siguen, generalmente, un desarrollo de baja temperatura y emiten gases con lentitud, por lo que no llegan a producir altas presiones.

Las reacciones uniformes incontroladas entran, generalmente, en un desarrollo de alta temperatura. En estas condiciones, se generan gases con rapidez, pero si la reacción no está confinada, la presión de los gases se disipa en el ambiente.

Por tanto, para que una reacción uniforme genere gases a alta presión han de darse dos condiciones:

- Que la reacción se haya acelerado hasta entrar en un desarrollo de alta temperatura. De este modo, la velocidad de la reacción es alta y se generan gases rápidamente.
- Que la reacción esté confinada, de forma que la presión de los gases generados no se disipe en el ambiente. El efecto de confinamiento lo produce, generalmente, un recipiente que contiene los reactivos. Pero también puede producirlo la inercia de una masa reactiva densa sobre sí misma.

Una reacción uniforme puede generar gases a alta presión por medio de tres mecanismos:

- Por generación de productos gaseosos de la reacción.
- Por evaporación de los reactivos o de otras sustancias presentes.
- Por calentamiento de gases ya presentes en el contenedor.

Si la presión alcanza el valor suficiente como para romper el recipiente (o, en su caso, para expandir la masa reactiva), se produce la liberación e inmediata expansión de los gases, es decir, una explosión térmica.

Las reacciones uniformes incontroladas cuya masa reactiva está en fase condensada (líquida o sólida) generan más calor que aquella cuya masa reactiva está en fase gaseosa. A veces, debido a la temperatura alcanzada y a la presión de los gases generados, el recipiente contiene, antes de su rotura, productos en forma de líquido sobrecalentado. En estos casos, a la explosión térmica se añade una BLEVE.

8) EXPLOSIONES POR DEFLAGRACIÓN

Una deflagración es una reacción de propagación cuyo frente avanza a velocidad subsónica.

La masa que deflagra puede encontrarse en estado sólido, líquido, gas, vapor, polvo en suspensión, líquido nebulizado o mezclas de éstos.

Esta masa puede encontrarse libre o confinada. El confinamiento suele tener lugar en un recipiente, pero también puede ser producido por un recinto e incluso por el efecto de inercia de una gran masa sobre sí misma.

Si el grado de confinamiento es suficiente, se acumulan los productos gaseosos de la deflagración y se eleva la presión. Si se alcanza una presión suficiente para romper súbitamente el confinamiento, se libera el gas a alta presión y se produce, por tanto, una explosión.

Las deflagraciones las podemos distinguir según sean los productos que se están deflagrando, las más frecuentes son las de gases, vapores, polvos en suspensión y líquidos nebulizados, confinados en un recipiente o en un recinto.

8.1) Deflagración de Gases y Vapores

La mayor parte de las deflagraciones de gases y vapores tienen lugar a partir de la combustión de mezclas preformadas de gases o vapores combustibles y aire. La combustión también puede tener lugar en atmósfera de oxígeno y de otros gases oxidantes, como el cloro y el flúor.

Otro tipo de reacción que puede dar lugar a una deflagración es la desdosificación (descomposición con propagación de llama, denominada en inglés disproportionation) de determinados gases, como el acetileno, etileno, el óxido de etileno, el butadieno y el óxido nitroso.

Trataremos tres tipos de deflagraciones:

- Deflagración de mezclas confinadas de gas o vapor combustible y aire (8.1.2).
- Deflagración de mezclas NO confinadas de gas o vapor combustible y aire (8.1.3).
- Deflagración de gases por reacciones de desdosificación (8.1.4).

8.1.1) Deflagración de Mezclas Confinadas de Gas o Vapor Combustibles y Aire

Los aspectos relativos a la combustión ya fueron analizados anteriormente; introduciremos ahora otros conceptos para profundizar el estudio de este tipo tan particular de explosiones.

La Reacción Química más conocida que produce gases a alta presión por medio de otros gases o vapores, es la combustión de gases en el aire. Sin embargo, otros gases oxidantes (oxígeno, cloro, flúor, etc.), pueden ser sustituidos por aire, produciendo con frecuencia procesos de combustión más intensos.

Si la reacción química acumula los productos gaseosos de la deflagración y se eleva la presión, y esta alcanza una presión suficiente para romper súbitamente el confinamiento, se libera el gas a alta presión y se produce, por tanto, una explosión.

Es en términos simples una combustión de materiales que deflagran que se produce en un ambiente cerrado o confinado.

8.1.2) Deflagración de Mezclas NO Confinadas de Gas o Vapor Combustible y Aire

La combustión de una mezcla libre puede dar lugar a tres fenómenos distintos:

- Bola de fuego.
- Deflagración no explosiva.
- Explosión de nube de vapor no confinada.

a) Bola de Fuego

La bola de fuego se produce por la ignición inmediata de un escape instantáneo de gas combustible, debido, por ejemplo, a la rotura de un contenedor.

Dado que la ignición es inmediata, la nube de gas combustible no tiene tiempo para mezclarse con el aire. Se produce una combustión de aportación, en la que no existe una mezcla preformada de combustible y comburente, sino que ambos se van incorporando, por difusión, al frente de llama. Aunque la combustión es muy rápida, no se acumulan los gases generados y no se producen sobrepresiones apreciables. La energía se disipa en forma térmica, no mecánica. La bola de fuego se trata, pues, de un incendio de gas, que puede ser muy destructivo, pero no constituye una explosión.

b) Deflagración NO Explosiva

Si se produce un escape de gas combustible y no tiene lugar su ignición inmediata, la nube de gas tiene tiempo para mezclarse con el aire. La ignición diferida de esta nube inicia una combustión de propagación que tiene lugar a velocidad subsónica y se trata, por lo tanto, de una deflagración. Normalmente la energía de los gases generados por una deflagración al aire libre se disipa en el ambiente sin producir sobrepresiones apreciables. Por tanto, la deflagración no da lugar a una explosión.

Generalmente, los gases de combustión se expanden hasta alcanzar un volumen de aproximadamente diez veces el volumen inicial de la mezcla combustible-aire.

c) Explosión de Nube de Vapor NO Confinada

Si se produce una nube de gas combustible de muy grandes dimensiones y su densidad es superior a la del aire, la propia masa de gas puede ejercer sobre sí misma un efecto de

confinamiento similar al de un recipiente. La ignición diferida de esta nube da lugar a una deflagración. El confinamiento provoca la acumulación de gases a alta presión, que da lugar a una explosión denominada explosión de nube de vapor no confinada (UVCE: Unconfined Vapor Cloud Explosión).

8.1.3) Deflagración de Gases por Reacciones de Desdosificación

Determinados gases, como el acetileno, el etileno, el óxido de etileno, el butadieno y óxido nitroso pueden experimentar reacciones de desdosificación, es decir, reacciones de descomposición con propagación de llama.

Normalmente estos gases no están presentes en estado puro, sino mezclados con otros gases en concentraciones bajas. Para que tenga lugar la propagación de la llama es necesaria una concentración mínima, equivalente al límite inferior de inflamabilidad de las mezclas de gas combustible-aire. La desdosificación puede producirse desde el límite inferior, correspondiente a la mezcla pobre, hasta el 100% de concentración.

Las características de la reacción (velocidad, generación de presión, volumen de gas generado, etc.) son específicas de cada tipo de gas y responden a principios distintos de los aplicados a las mezclas de gas combustible y gas oxidante.

8.2) Deflagración de Polvos en Suspensión

Las nubes de polvo combustibles (partículas sólidas en suspensión en el aire) se comportan de manera similar a las mezclas de gas o vapor combustible y aire.

Si la mezcla está confinada y el grado de confinamiento es suficiente, se acumulan los productos gaseosos de la deflagración y se eleva la presión. Si se alcanza una presión suficiente para romper súbitamente el confinamiento (por rotura del recipiente o por rotura de las paredes del recinto), se libera el gas a alta presión y se produce, por tanto, una explosión.

El análisis de este tipo de explosiones lo estudiaremos en el módulo "Combustión de Sólidos Disgregados".

8.3) Deflagración de Líquidos Nebulizados

Los líquidos combustibles nebulizados (partículas líquidas en suspensión en el aire) arden y deflagran de manera similar a las nubes de polvo, con las siguientes diferencias:

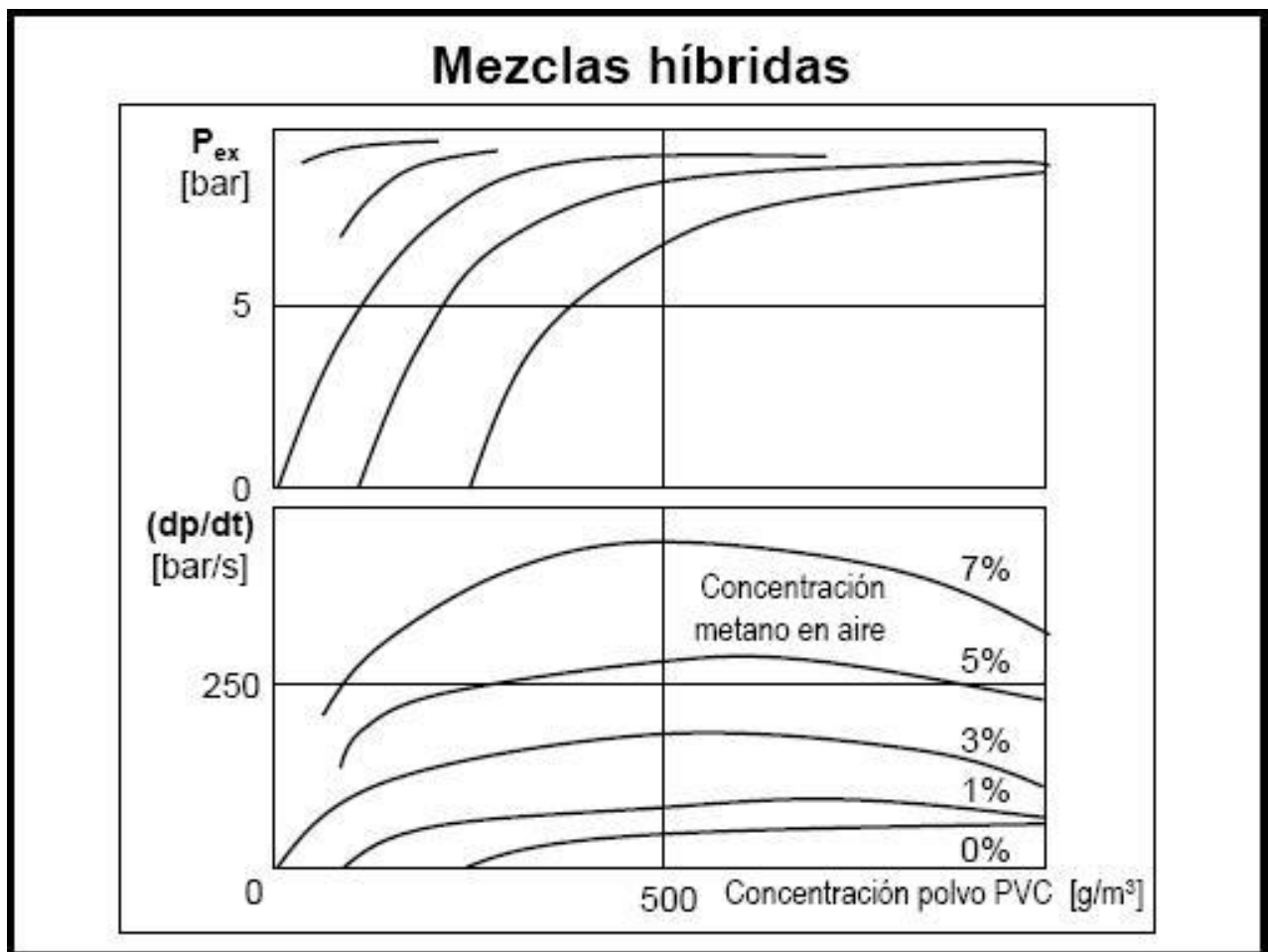
- a) La combustión puede iniciarse a cualquier temperatura, aunque sea inferior al punto de inflamación del líquido combustible. Como caso extremo, una nube de gotas congeladas puede deflagrar de la misma forma que una nube de polvo.
- b) El límite inferior de inflamabilidad se expresa en masa de líquido por unidad de volumen (mgr/l) y disminuye a medida que aumenta el diámetro de las gotas.
- c) Por ejemplo, en el caso de los hidrocarburos líquidos nebulizados, el límite inferior de inflamabilidad disminuye desde 50 mg/l hasta 10 mg/l, a medida que el diámetro medio de las gotas aumenta desde 10 hasta 100 micrones (50 mg/l es una concentración muy similar al límite inferior de inflamabilidad de las mezclas de hidrocarburos gaseosos y aire, a la temperatura ambiente).
- d) La energía mínima de ignición varía de forma directamente proporcional al cubo del diámetro de las gotas.

La deflagración de líquidos nebulizados, como la de polvos en suspensión, genera productos en fase de condensada, que producen daños por calor y, con frecuencia, incendios secundarios.

8.4) Deflagración de Mezclas Híbridas de Polvo y Gas

La presencia de gases o vapores inflamables en una nube de polvo combustible puede tener un efecto sinérgico en la combustibilidad de ambos componentes de la mezcla.

Este efecto puede ser considerable y puede tener lugar, aunque la concentración de polvo esté por debajo del límite inferior de inflamabilidad y la concentración del gas esté por debajo del límite inferior de inflamabilidad.



Las consecuencias pueden ser las siguientes:

- La presencia de gas inflamable puede reducir el límite de inflamabilidad del polvo, especialmente si su K_{st} es bajo.
- Una pequeña cantidad de gas inflamable puede reducir la energía mínima de ignición de una nube de polvo.
- La velocidad máxima de elevación de presión puede aumentar considerablemente.
- La presión máxima de la deflagración también puede aumentar.

El comportamiento de estas mezclas no es predecible. Por tanto, la aplicación de cualquier técnica de protección requiere una evaluación muy cuidadosa de las características de combustión y deflagración de cada mezcla concreta. Es recomendable la realización de ensayos específicos.

8.5) Deflagración en Fases Condensadas

Teóricamente, una reacción exotérmica puede ser la causa de una deflagración o detonación, siempre que el calor de la reacción se transmita en cantidad suficiente al material sin reaccionar. Por tanto, aquellos factores que promuevan dicha transmisión favorecen la propagación de la reacción.

Las reacciones ceden energía a los materiales sin reaccionar o al ambiente. La cantidad de energía cedida, viene determinada por la capacidad de transmisión y la distancia al elemento reactivo más próximo. Supongamos un cilindro de material (por ejemplo una tubería forzada) en uno de cuyos extremos se ha iniciado la reacción. La zona de reacción puede representarse por un elemento de sección transversal, siendo el radio la distancia que la energía ha de recorrer para alcanzar el medio circundante. Cuando la energía alcanza el borde exterior de la zona de reacción, su disipación al ambiente viene determinada por las características de confinamiento del contenedor (resistencia, capacidad calorífica, etc.).

Por tanto, la propagación se ve favorecida con la presencia de cargas de mayor diámetro y contenedores más resistentes. Hay un diámetro mínimo por debajo del cual la reacción no se propaga. Este parámetro (diámetro crítico) es específico para cada sistema químico y para las características de confinamiento. Para materiales en estado libre (sólidos, coloides, etc.) se aplica el mismo principio del diámetro crítico, aunque éste generalmente es mayor.

Las reacciones de propagación que se inician en fases condensadas, están normalmente asociadas con equipos de trasiego (bombas, válvulas de actuación rápida, etc.), aunque también comienzan por descomposición térmica en zonas localizadas. Altas temperaturas puntuales debidas a cavitación, fricción, compresión adiabática, autocalentamiento o fuentes externas, tales como soldaduras, fenómenos eléctricos, impacto mecánico, fuego, etc., pueden provocar una reacción de propagación si el sistema químico y su entorno la favorecen. Los efectos de la reacción dependen de la velocidad de propagación.

La deflagración de fases condensadas genera mayores presiones que la de gases, nebulizaciones o polvos en el aire, al liberarse más energía por unidad de volumen. La propagación se desarrolla por transferencia de masa (movimiento de calor y agentes activadores hasta los materiales sin reaccionar) a velocidades que oscilan desde milímetros por hora hasta cientos de metros por segundos. La zona de reacción está muy caliente y compuesta de materia gasificada, gran parte de la cual disipa calor a los contenedores y tuberías de contención. En sistemas de alta energía y baja velocidad, el medio de confinamiento frecuentemente se debilita, debido a excesivo calentamiento, y provoca fallos localizados. Las deflagraciones son extremadamente sensibles a la presión, puesto que la pérdida de su confinamiento permite que se vaporicen los productos y los reactivos, de forma que la energía de la zona de reacción se disipa como calor de vaporización. Según lo anterior, muchas deflagraciones pueden extinguirse descargando la presión mediante mecanismos de ventilación o fallo del contenedor.

9) EXPLOSIONES POR DETONACIÓN

Una detonación es una reacción de propagación cuyo frente avanza a velocidad sónica o supersónica y lleva asociada, por tanto, una onda de choque.

Mientras que el mecanismo de propagación de la deflagración es la transición térmica (conducción, convección y radiación) el mecanismo de la propagación de la detonación es la compresión de la onda de choque.

La masa que detona puede encontrarse en estado sólido, líquido, gas o vapor. Esta masa puede encontrarse libre o confinada. Bajo ciertas condiciones de confinamiento pueden producirse también detonaciones de polvo en suspensión.

Debido a la velocidad de reacción, las detonaciones siempre generan gases a alta presión, independientemente del estado y grado de confinamiento de la mezcla detonante. La consecuencia es que toda detonación da lugar a una explosión. La presión generada es mayor que en el caso de las deflagraciones.

En las explosiones por detonación hay que distinguir dos frentes de expansión de los gases a alta presión, cada uno de los cuales lleva asociada una onda de choque:

- El frente de la detonación, que avanza en la mezcla sin reaccionar. La onda de choque se debe a la expansión, en la mezcla, de los gases a alta presión que va generando la detonación.
- El frente de la explosión, que avanza en el ambiente. La onda de choque se debe a la expansión, en el ambiente, de los gases a alta presión ya generados por la detonación.

En las detonaciones de mezclas confinadas, el frente de la detonación avanza en la mezcla hasta que la onda de choque rompe las paredes del recipiente o recinto, lugar desde el que parte y avanza en el ambiente el frente de la expansión.

9.1) Detonaciones de Gases y Vapores

Algunas mezclas de gas inflamable y oxidante pueden detonar bajo determinadas condiciones.

Los límites de detonabilidad dependen de la potencia de la fuente de ignición y de las condiciones ambientales de presión y temperatura. Generalmente coinciden con los límites de inflamabilidad de la mezcla, pero en algunos casos son diferentes y el intervalo de detonabilidad es más estrecho que el de inflamabilidad.

Por ejemplo, la mezcla de hidrógeno-aire tiene un intervalo de inflamabilidad comprendido entre el 4 y el 75% y un intervalo de detonabilidad comprendido entre el 18 y el 59%.

Aunque las presiones desarrolladas por las detonaciones de gases son mucho más bajas que las de las detonaciones de líquidos o sólidos, pueden ser, sin embargo, muy destructivas.

La presión incidente desarrollada por una detonación es aproximadamente el doble que en una deflagración, es decir, alrededor de veinte veces la presión inicial de las mezclas gas combustible-aire y cuarenta veces la presión inicial en el caso de las mezclas de gas combustible-oxígeno.

La presión reflejada, como en el caso de las deflagraciones, puede llegar a ser de ocho veces la presión incidente.

9.2) Detonaciones de Polvos y Líquidos nebulizados

Las mezclas de polvos en suspensión en aire y de líquidos nebulizados en aire no suelen detonar. No se conocen casos de detonaciones de mezclas normales en las condiciones de proceso habituales en la industria.

Sin embargo, se han producido detonaciones de nubes de polvo de carbón bajo condiciones de alto grado de confinamiento, en minas con túneles de gran longitud.

Referencias Bibliográficas Generales

- Manual NFPA de Protección Contra Incendios – Editorial MAPFRE NFPA - Cuarta Edición en castellano – 1993.
- “Explosiones” del Ing. Eduardo D. Álvarez, SFPE - Director Región Cono Sur - International Fire Safety Consulting del Cono Sur S.A. - EDAR Ingeniería [edaringe@edaringe.com.ar].
- 46 Productos Peligrosos: Condiciones básicas para su explosión por BELEVE – Editorial CEPREVEN. Edición 1994.



ANEXO I: Valoración de una BLEVE

1) Magnitud de una BLEVE

Aunque la mayoría de los fenómenos BLEVE por rotura de contenedor se deben a la exposición al fuego, en algunos casos se han originado por corrosión o por impacto externo. Las roturas por impacto son particularmente frecuentes en accidentes de tráfico en los que se ven envueltos vagones de ferrocarril o vehículos de carga. En esos casos, la BLEVE se produce simultáneamente al impacto. Sin embargo, en una ocasión un vagón cisterna que contenía 114 m³ de gas licuado de petróleo (GLP) se debilitó seriamente en un descarrilamiento y la explosión se produjo 40 horas después. El vagón se levantó y cambió de sitio sin incidente alguno. Cuando se produjo la rotura la presión interna aumentaba como consecuencia de la elevación de la temperatura ambiente.

La magnitud de la BLEVE depende fundamentalmente del peso de los trozos en que se rompe el contenedor y la cantidad de líquido que se evapora cuando el contenedor falla. La mayoría de las BLEVE de gas licuado ocurren cuando los recipientes se encuentran llenos de líquido entre algo menos de la mitad y tres cuartos de su capacidad. La relación entre la energía liberada y el peso de los trozos del contenedor es de tal magnitud que éstos salen despedidos a distancias de hasta 800 metros. Son frecuentes las bolas de fuego de varios cientos de metros de diámetro y se han producido víctimas mortales por quemaduras a distancias de hasta 76 metros en el caso de recipientes de gran tamaño.

El 19 de noviembre de 1984, cerca de la ciudad de México, se produjo un tremendo desastre debido a múltiples BLEVE de gas licuado de petróleo. El accidente se produjo alrededor de las 05:00 hs. en la mañana de un lunes, mientras una estación Terminal se llenaba de combustible procedente de una refinería situada en otra zona del país, mediante un gasoducto. Un fallo de un componente de la tubería de 254 mm de diámetro, degeneró en una rotura en la línea de suministro, liberándose una enorme nube de GLP, que se incendió 20 minutos más tarde al alcanzar una llamarada al nivel del suelo. La explosión e incendio resultantes provocó 500 muertos. La llama procedente de la tubería rota alcanzó uno de los cuatro depósitos esféricos de 1.590 m³ de capacidad, desencadenándose un BLEVE diez minutos después. Procedentes de los cuatro depósitos esféricos y 48 tanques cilíndricos se detectaron 15 BLEVE en un sismógrafo. Los dos depósitos esféricos de 2.384 m³ permanecieron en sus cimientos, pero resultaron severamente dañados. Los cuatro depósitos de 1.590 m³ quedaron destrozados. Los 48 tanques cilíndricos resultaron dañados en distinto grado, apareciendo pedazos a 1,1 km.

2) Intervalos de Tiempo en BLEVE Causadas por Fuegos

El tiempo transcurrido entre el comienzo del contacto con la llama y una BLEVE depende de factores tan variables como las dimensiones y la naturaleza del fuego y las características del recipiente mismo. Los recipientes no aislados situados en superficies pueden explotar en cuestión de pocos minutos si son pequeños, mientras que si son grandes pueden tardar varias horas, siempre y cuando no se enfríen con chorros de agua. En un estudio sobre depósitos y recipientes de almacenamiento de gases licuados de petróleo que oscilaban en capacidad entre 3.800 a 114.000 litros se obtuvo un intervalo de tiempo entre 8 y 30 minutos, ocurriendo el 58% en quince minutos o menos. Los datos relativos a recipientes provistos de aislamiento son escasos, puesto que sólo se suelen proteger de esta forma los envases de gases criogénicos y algunos de gases reactivos. Pero no existe ninguna duda en que el aislamiento proyectado para la protección contra la exposición al fuego puede alargar de manera importante los plazos para que suceda una BLEVE.

En el caso de un vagón cisterna de ferrocarril cargado de un gas licuado de petróleo y protegido con aislamiento, la BLEVE ocurrió después de 20,5 horas de exposición al fuego, lo que es, sin duda, un ejemplo extremo. En los ensayos comparativos realizados con vagones cisterna de ferrocarril para transportar gases licuados de petróleo protegido, se

produjo la BLEVE en 93 minutos en el caso del vagón protegido y en 25 minutos en el desprovisto de aislamiento.

3) Valorización de las consecuencias de las BLEVE

3.1) ⁴Método 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.

Las ecuaciones indicadas son:

Diámetro (D) de la bola de fuego

$$D = 5,25 M^{0,314} \quad (1)$$

donde:

M = kilos
D = metros

Tiempo de duración (T)

$$T = 1,1449 M^{0,362} \quad (2)$$

donde:

T = segundos

Calor de la radiación térmica

$$Q_{\text{máx}} = (828 M^{0,771})/R^2 \quad (3)$$

donde:

$Q_{\text{máx}}$ = kW/m²
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)**:

$$H = 12,73 V^{1/3} \quad (4)$$

donde:

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

Ejemplo: un almacenamiento de propano de 200.000 Kg, en caso de producirse una BLEVE, se originaría una bola de fuego cuyo diámetro, según la ecuación (1) podría estimarse en 242,64 metros, a su vez, la duración de la bola de fuego sería de ecuación (2) unos noventa y cinco segundos.

Por su parte, a 500 m del lugar donde se produjo la BLEVE se estará sometido a una radiación térmica de 40,47 kW/m², habiendo sido la altura de la bola de fuego de

⁴ Fórmulas extraídas del artículo “Fenómenos de combustión. BLEVE, una particularidad”, autor A. Aznar. Fuente www.energuia.com.

605,85 m (teniendo en cuenta que a temperatura ambiente de 15,66°C, 1 Kg de propano ocupa 0,539 m³).

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:

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

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.

3.2) ⁵Método 2

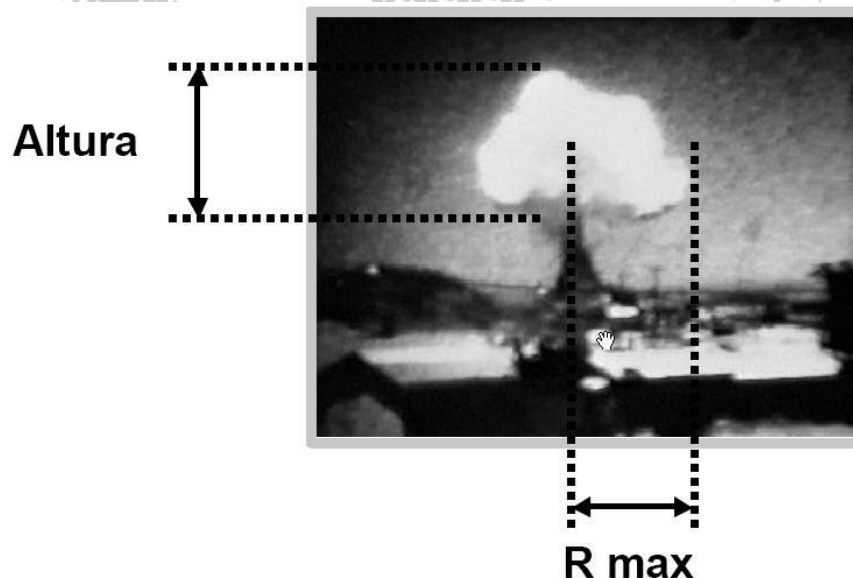
$$\text{Radio}_{\max} = 29 M^{1/3}$$

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

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

donde :

M = kilos. Masa vaporizada del producto. Puede ser entre el 32 y 65%.
T = segundos
R y Altura = metros



⁵ 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.

3.3) Método 3

Diámetro de la bola de fuego

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

siendo:

D = diámetro máximo (m).

W = masa total del combustible (kg).

Altura de la bola de fuego

$$H = 0,75 D$$

siendo:

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

D = diámetro máximo (m).

Duración de la bola de fuego

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

siendo:

t = tiempo de duración (s).

W = masa total del combustible (kg).

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

Radiación térmica recibida

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

$$I = d F E$$

siendo:

I = irradiación recibida (kW/M²).

d = coeficiente de transmisión atmosférica.

F = Factor geométrico de visión.

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

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

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

siendo:

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

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

El **factor geométrico F** es un coeficiente que depende de la forma del foco emisor y receptor, y de la distancia. En el caso de BLEVES, al asimilarse la bola de fuego a una esfera y el cuerpo receptor a una superficie normal a la radiación directa en la línea procedente del centro de la esfera, se demuestra que el factor geométrico tiene el valor:

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

siendo:

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

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

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

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

Siendo

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

W = masa total del combustible (kg).

H_c = calor de combustión (kJ/kg).

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

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

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

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

Siendo :

t = tiempo de exposición (s).

I = irradiación recibida (W/m^2).

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

Para una valoración más precisa de daños a la población expuesta en función de la dosis de radiación térmica sería recomendable la aplicación del Método Probit sobre vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores.

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

MATERIAL	RADIACIÓN MÁXIMA TOLERABLE I (W/m ²)
Cemento	60.000
Hormigón armado	200.000
Acero	40.000
Madera	10.000
Vidrio	30.000 – 300.000
Pared de Ladrillo	400.000

Ejemplo: Calcular las consecuencias de radiación térmica de la BLEVE de una esfera que contiene 200 m³ de butano almacenados a 20°C, a una distancia de 200 m. La humedad relativa atmosférica es 50%.

Datos:

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

El calor de combustión es 45.800 kJ/kg.

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

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

Solución:

Diámetro de la bola de fuego

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

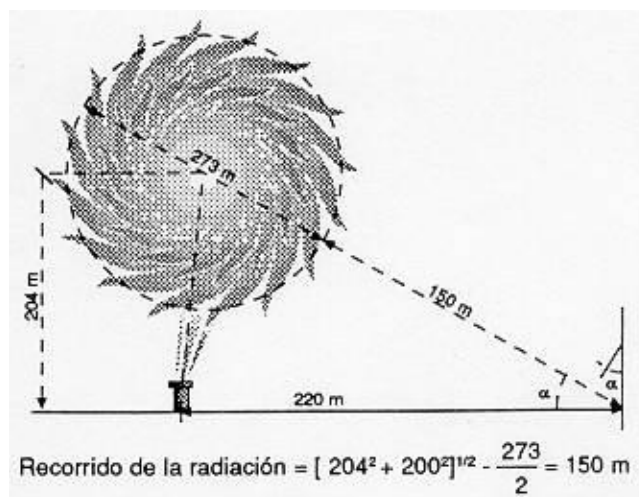
Altura de la bola de fuego

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

Duración de la bola de fuego

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

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



Cálculo de la distancia x

Coeficiente de transmisión atmosférica

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

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

siendo:

P_v = Presión absoluta del vapor de agua saturado.

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

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

Factor geométrico de visión

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

Intensidad media de radiación

Se adopta $f_r = 0,25$

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

Irradiación recibida

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

$$Tga = 204 / 200 = 1,02 \text{ a } \approx 45^\circ$$

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

$$I_{\text{real}} = 45 \cdot \cos 45^\circ = 45 \cdot 0,7 = 31,5 \text{ kW/m}^2 = 31.500 \text{ W/m}^2$$

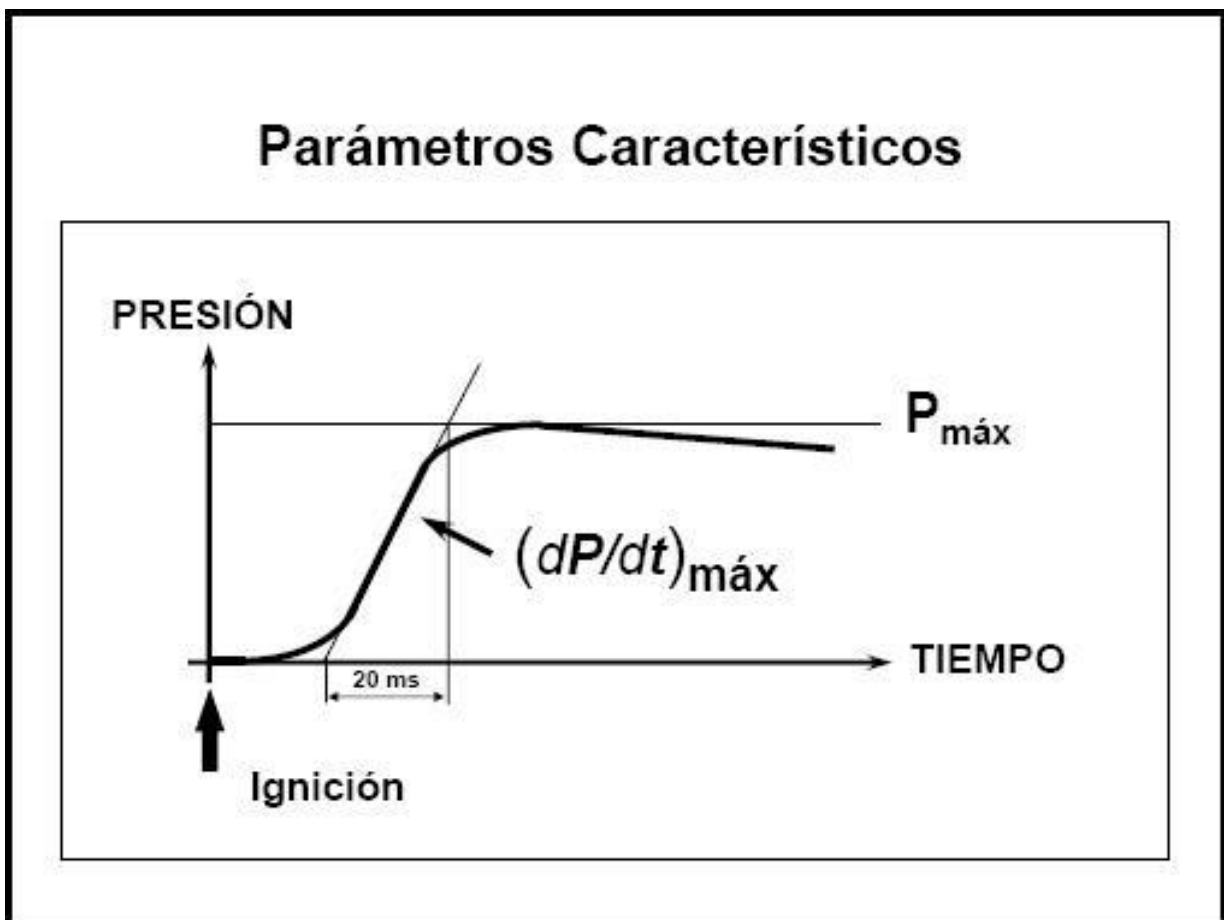
Dosis de irradiación

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

ANEXO II: Violencia de una Deflagración

Los parámetros que definen la **Violencia de una Deflagración** son tres:

- Presión máxima desarrollada.
- Velocidad de elevación de presión (dP/dt).
- Duración de la sobrepresión.



1) Presión Máxima

La Presión Máxima es el primer parámetro que define la violencia de una deflagración. La presión máxima potencial corresponde al valor máximo de la presión instantánea que ejercería la deflagración contra las paredes del recipiente o del recinto, en el caso de que éste no se rompiere.

La presión máxima depende de las condiciones de presión y temperatura iniciales de la mezcla y de la velocidad química de la combustión.

La presión máxima no depende, en principio, del volumen del recipiente, ya que, en el cambio de las condiciones PVT de los gases presentes, V permanece constante.

En la mayoría de las deflagraciones confinadas de mezclas gas inflamable-oxidante la presión pico generado es aproximadamente diez veces la presión inicial de la mezcla.

En el caso de las mezclas gas inflamable-oxígeno puede llegar a ser de veinte veces la presión inicial.

2) Velocidad de Elevación de Presión

La Velocidad de Elevación de Presión es el segundo parámetro que define la violencia de una deflagración.

La presión instantánea desarrollada por una deflagración en un recipiente o recinto depende de la masa de productos de combustión y de sus condiciones VT en el instante considerado.

Por tanto, la velocidad de elevación de presión depende de la velocidad (lineal y química) de combustión y de las características (volumen y forma) del recipiente.

3) Índice de Explosividad. Ley Cúbica

La velocidad de elevación de presión es directamente proporcional al cubo del tiempo transcurrido e inversamente proporcional a la raíz cúbica del volumen del recipiente. Pero esta ley cúbica sólo se cumple en recipientes esféricos o cuyas tres dimensiones son similares.

La velocidad de elevación de presión depende, pues, de cada caso concreto. Sin embargo, se han desarrollado ensayos para determinar el índice de velocidad máxima de elevación de presión de las deflagraciones. Este factor también se denomina índice de deflagración o de explosión (K), y se expresa mediante la ecuación:

$$K = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} \cdot \sqrt[3]{V}$$

donde:

V = volumen del recipiente (m³).

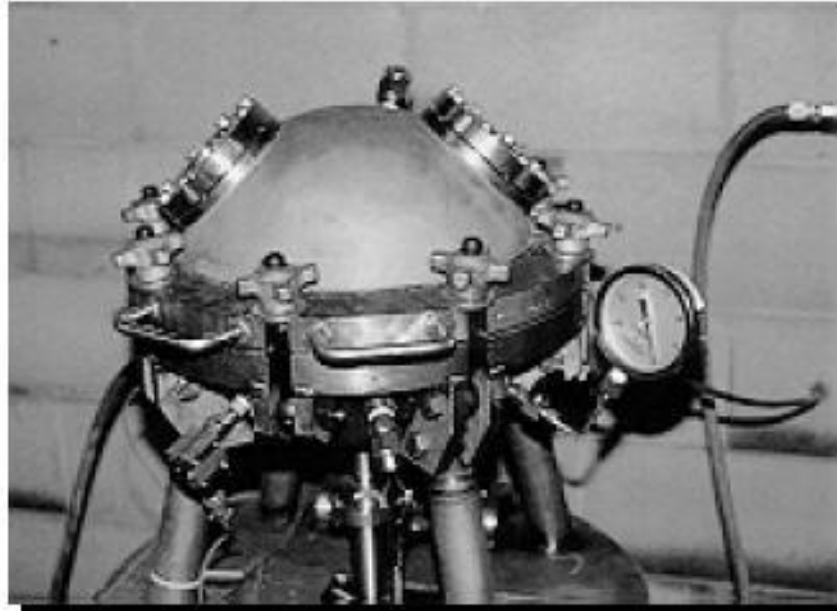
(dP/dT)_{max} = aumento de presión máxima (MPa/s).

K_G = Índice de Explosividad para gases (MPa.m/s).

K_{ST} = Índice de Explosividad para polvos (MPa.m/s).

Para determinar el valor de K se usa un recipiente como el de la figura:

Esfera de 20 litros



Valores de K_G (bar.m/s)

Gas Inflamable	K_G
Metano	55
Propano	75
Hidrógeno	550

Nota: sin turbulencia
 $P_{max} = 7,4$ bar

Clasificación de explosiones de polvos

CLASE	K_{ST}	CARACTERÍSTICA
St 0	0	Sin explosión
St 1	0 - 200	Explosión débil
St 2	200 - 300	Explosión fuerte
St 3	> 300	Explosión muy fuerte

Valores de K_{ST} (bar.m/s) y P_{MAX} (bar)

Tipo de polvo	P_{MAX}	K_{ST}
PVC	6,7 – 8,5	27 – 98
Leche en Polvo	8,1 – 9,7	58 – 130
Polietileno	7,4 – 8,8	54 – 131
Azúcar	8,2 – 9,4	59 – 165
Resina	7,8 – 8,9	108 – 174
Madera	7,7 – 10,5	83 – 211
Celulosa	8,0 – 9,8	56 – 229
Pigmentos	6,5 – 10,7	28 – 344
Aluminio	5,4 – 12,9	16 - 750

Los mayores valores de $(dP/dt)_{max}$ y de P_{max} para gases se obtienen con mezclas estequiométricas. Para los polvos los mayores valores de $(dP/dt)_{max}$ y de P_{max} se obtienen con mezclas dos a tres veces las estequiométricas.

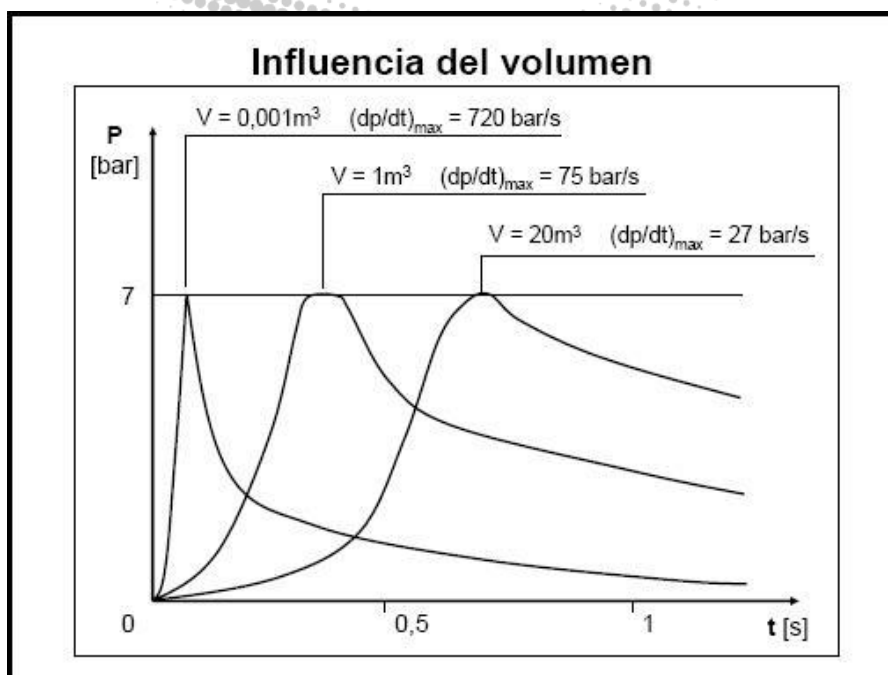
Tanto en gases como en polvos, con mayores temperaturas iniciales se incrementa la velocidad de la reacción y, por lo tanto, $(dP/dt)_{max}$. La P_{max} disminuye por ser menor la diferencia entre $t_{inicial}$ y t_{final} .

4) Duración (período) de la Sobrepresión

La Duración (período) de la Sobrepresión es el tercer parámetro que define la violencia de una deflagración.

Este parámetro corresponde al tiempo durante el cual las paredes del recipiente o recinto sufren una presión de trabajo.

5) Influencia del Volumen



6) Rango de Explosividad



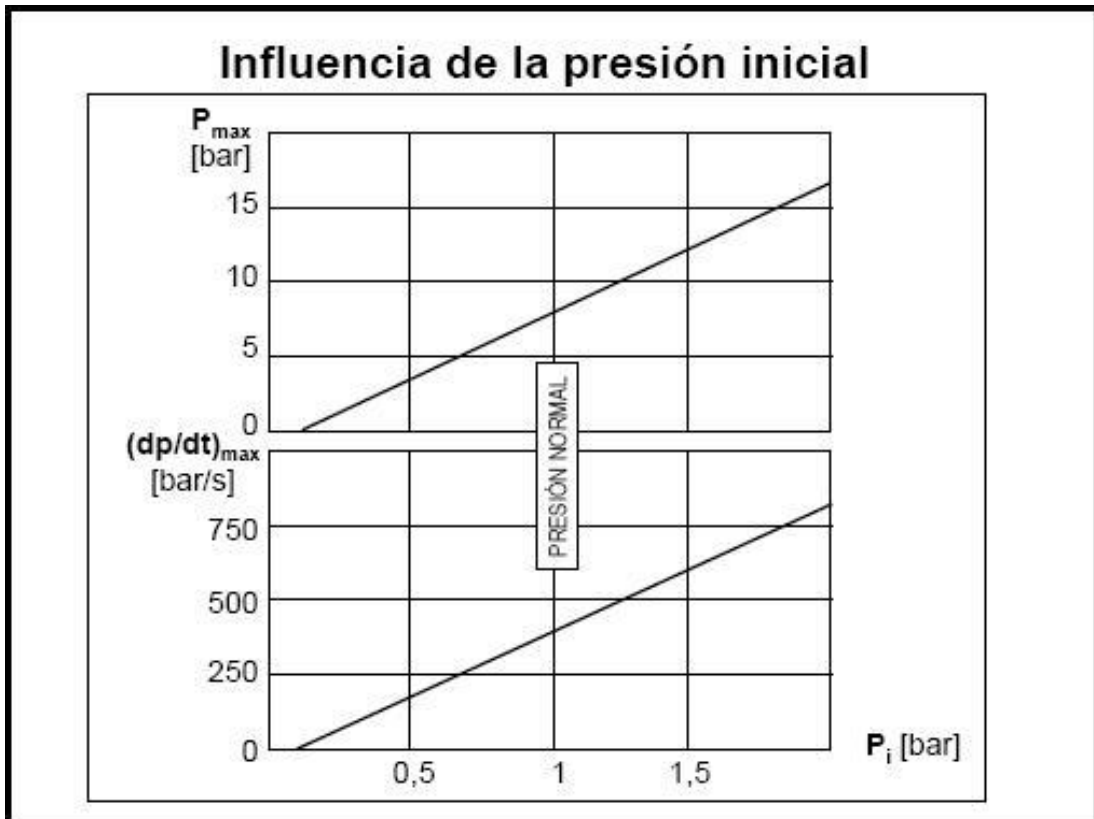
El rango de explosividad se amplía al incrementarse la presión inicial y la energía de ignición.

En los materiales pulverulentos el límite superior se produce debido a la dificultad del oxígeno para alcanzar la superficie de las partículas en suspensión.

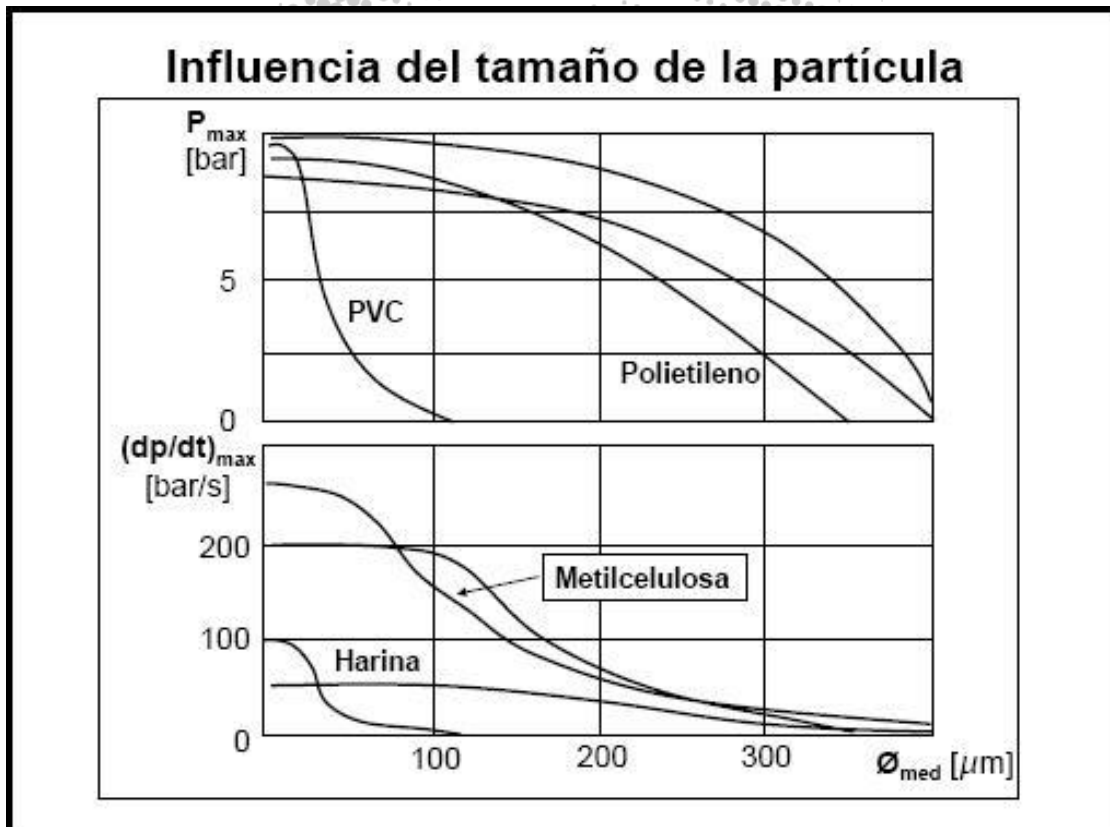
Para polvos combustibles resulta:

- LFL: 20 a 60 gr/m^3
- UFL: 2.000 a 6.000 gr/m^3
- Estequiométrica: 100 a 300 gr/m^3

7) Presión Inicial



8) Tamaño de la partícula de Polvo



Un polvo con granulometría gruesa que normalmente no puede hacer explosión, puede ser explosivo al agregársele un 5 a 10% de polvo con granulometría fina. En los materiales pulverulentos la reacción es superficial. Polvos más finos poseen mayor facilidad de hacer explosión y producen explosiones más violentas.

9) Turbulencia

Al aumentar la turbulencia de una mezcla pulverulenta, se incrementa la velocidad de la reacción y , por lo tanto, $(dP/dt)_{\max}$. La P_{\max} se mantiene pues no hay variación en el volumen de los productos de combustión que se generan.



ANEXO III: LA ONDA DE PRESIÓN

1) Características

La característica fundamental de una explosión es la onda de presión generada por la expansión del gas liberado.

Los factores que determinan la onda de presión son, considerados de una manera ordenada, los siguientes:

Energía Inicial:

Esta depende de las características del Gas Liberado, como ser:

- Tipo de gas.
- Masa de gas liberado.
- Condiciones iniciales de presión y temperatura del gas liberado.

Energía Liberada:

La energía inicial del gas y la relación entre sus condiciones PT iniciales y las condiciones PT ambientales determinan la energía liberada.

Velocidad de Liberación:

La velocidad de liberación determina la velocidad de expansión del gas.

Velocidad de Expansión:

La presión se propaga a la velocidad del sonido. Para que la energía del gas se disipe mediante una onda de choque, el frente de expansión ha de desplazarse a velocidad sónica o supersónica. En el aire, la velocidad del sonido es aproximadamente 340 m/s.

La velocidad de expansión depende de la velocidad de liberación del gas. Para que la velocidad de expansión sea sónica o supersónica y se forme la onda de choque es necesario que la liberación del gas sea muy rápida.

Con la distancia al origen disminuyen la energía residual del gas y su velocidad de expansión. A una determinada distancia, la velocidad pasa de sónica o subsónica y desaparece la onda de choque, aunque persiste la presión de viento debido al desplazamiento del aire y del gas en expansión.

Factores direccionales:

En casi todas las explosiones intervienen factores direccionales, que impiden que la onda de presión se propague uniformemente en todas las direcciones.

2) Onda de Presión

La expansión del gas genera una onda de presión, que se define con tres parámetros:

- Amplitud (intensidad).
- Período (duración).
- Energía total.

La onda de presión tiene dos componentes:

- La presión de la onda de choque.
- La presión de viento, es decir, la presión dinámica debida a la velocidad del aire desplazado por el gas y del propio gas en expansión.

La onda de choque se desplaza radialmente desde el origen de la expansión. En las proximidades del origen tiene una gran amplitud y un período muy corto (del orden de milisegundos o microsegundos). Con la distancia al origen la amplitud disminuye y aumenta el período, hasta que en la lejanía el impulso se transforma en una brisa suave.

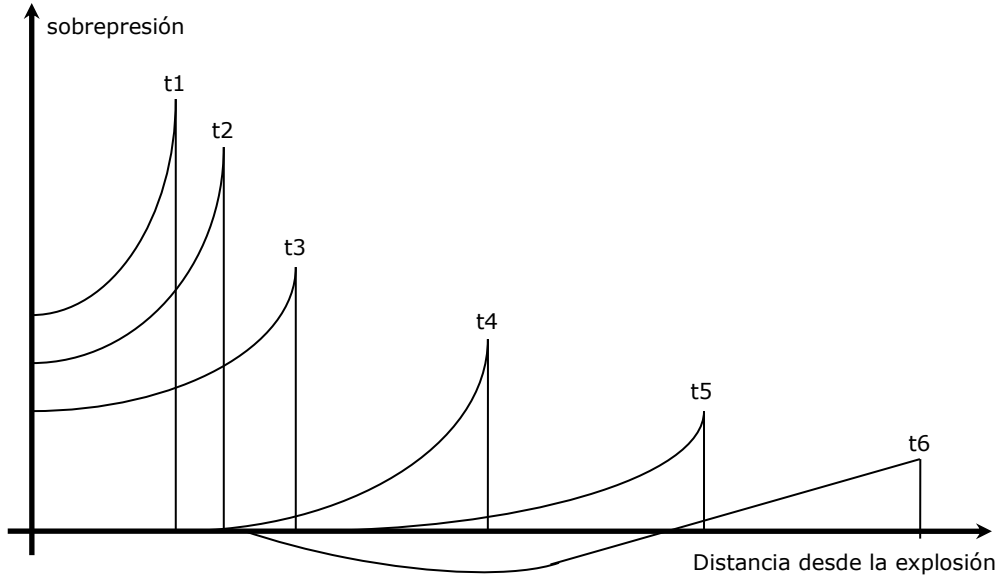
La amplitud inicial de la onda de presión corresponde a la presión del gas en el momento de su liberación. Tomemos como ejemplo la explosión de un recipiente de gas por sobrepresión. La presión pico de la onda de choque, en el origen de la explosión, debe ser, en principio, equivalente a la presión de rotura del recipiente. Sin embargo, para que el recipiente se rompa, la presión de rotura ha de mantenerse durante cierto tiempo, y durante este tiempo, la presión interna puede mantenerse constante o continuar aumentando, según cuál sea la causa de la sobrepresión. Si la presión interna sigue aumentando a una velocidad mayor que la expansión de las paredes del recipiente, la presión del gas en el momento de la liberación es mucho mayor (entre dos y diez veces, según se ha registrado en casos reales) que la presión de rotura de recipiente.

La energía de la onda corresponde a la energía liberada y ésta depende del volumen de gas liberado, de su presión y temperaturas iniciales. Si durante la explosión se sigue generando gas a alta presión después de la liberación inicial, aumenta la energía total liberada. Este aumento de energía no provoca el aumento de la amplitud de la onda de presión, sino el alargamiento de su período.

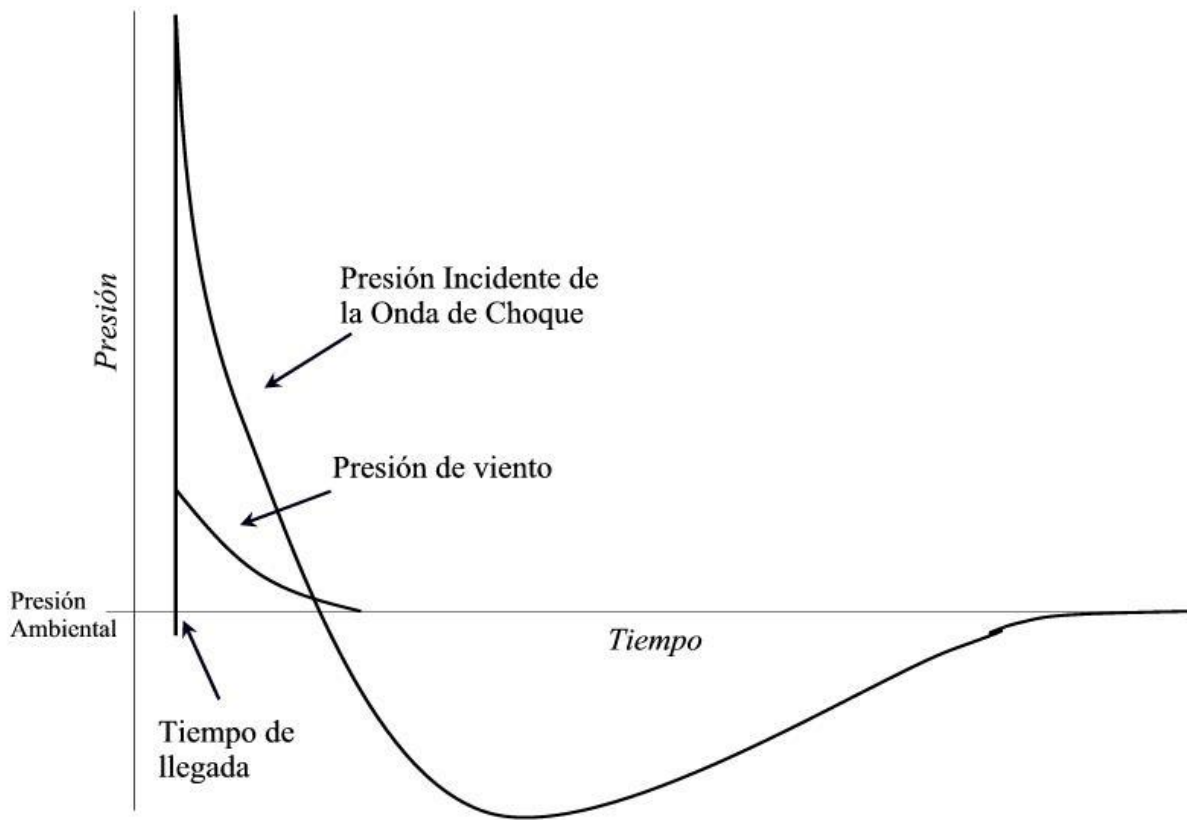
El impacto de la onda de presión sobre un objeto tiene los efectos siguientes:

- La onda de choque ejerce una presión incidente que se eleva casi instantáneamente hasta un pico de máxima amplitud. Después, la presión decrece bruscamente y pasa por una fase negativa, cuya amplitud es muy inferior a la del pico de presión positiva.
- El viento ejerce una presión que también se eleva casi instantáneamente hasta un pico de máxima amplitud y después decrece bruscamente. El pico de presión de viento depende del pico de presión de la onda de choque.

La presión incidente es la ejercida sobre las superficies perpendiculares a la dirección de la propagación de la onda.



Amortiguación de la onda de choque con la distancia (forma de la onda en distintos momentos)



Presión Incidente de la Onda de Choque y Presión de Viento

Onda de Choque Ideal
Presión pico de la onda de choque, velocidad del viento y presión pico de viento al nivel del mar

Presión pico de la onda de choque kPa	Velocidad del Viento m/s	Presión pico de viento kPa
175	275	90
125	210	50
75	145	20
25	50	2
15	30	0,7

3) Factores Direccionales

Si la expansión se produce de una manera uniforme en todas las direcciones, la onda de presión se propaga en forma de esfera. Pero recordamos que la velocidad de la expansión ha de ser sónica o supersónica y sólo ciertos fenómenos pueden producir una expansión uniforme a esa velocidad.

La mayor parte de las explosiones se producen por la descarga de un gas confinado a alta presión. Cuando la presión del gas supera la que puede soportar el recipiente, éste falla por su punto más débil y la onda de choque se propaga en la dirección del fallo. Por tanto, las explosiones por rotura de contenedores generan una onda de presión que no es uniforme en todas las direcciones.

4) Efectos

4.1) Potencial Destructivo

El potencial destructivo de una explosión en su entorno depende, esencialmente, de la energía liberada y de las características de la onda de presión, es decir, de cuatro factores:

- La energía liberada, depende del volumen de gas liberado y de su presión y temperatura.
- La amplitud de la onda de presión, la amplitud inicial depende de la presión del gas en el momento de su liberación.
- El período de la onda de presión.
- Los parámetros direccionales de la expansión.

Además, hay otros dos factores que influyen en los efectos destructivos de una explosión:

- La Temperatura del gas: Si el gas está muy caliente a los efectos mecánicos de la onda de presión se añaden efectos térmicos, tales como el deterioro de superficies, la deformación de objetos, el fallo de elementos estructurales y la ignición de combustibles.
- La proyección de elementos en forma de metralla: el impacto de objetos despedidos por la explosión agrava los efectos mecánicos de la onda de presión, produciendo roturas, perforaciones y otros daños.

La magnitud utilizada para medir el potencial destructivo de una explosión es el primero de los seis factores descritos, la energía liberada. Pero la energía liberada puede expresarse de dos formas distintas:

- Directamente: en MJ.
- Indirectamente: mediante el peso de TNT (trinitrotolueno), cuya detonación liberaría una energía equivalente.

En el caso de un gas a alta presión y a temperatura ambiente, su peso equivalente de TNT se puede calcular mediante la relación entre la energía liberada y la energía específica del TNT, es decir, 4,52 MJ/kg.

4.2) Presión Incidente y Presión Reflejada

Se llama **presión incidente** (p_{so}) a la ejercida por la onda de choque, cuando se hace impacto en un objeto, sobre las superficies perpendiculares a la dirección de la propagación de la onda.

Si la onda de choque hace impacto sobre una superficie que forma un ángulo con la dirección de la propagación, se produce una **presión reflejada** (p_r), cuyo valor depende de la presión incidente y del ángulo de incidencia. En las ondas de choque de impacto ligero, la presión reflejada llega a ser dos veces superior a la presión incidente. En las ondas de choque de alto impacto, la presión reflejada puede llegar a ser ocho veces superior a la presión incidente, de acuerdo con la ecuación:

$$\frac{P_r}{p_{so}} = 2 \times \frac{7P_s + 4p_{so}}{7P_s + p_{so}}$$

donde:

- p_r : presión reflejada (relativa)
- p_{so} : presión incidente (relativa)
- P_s : presión ambiental (absoluta)
- P_{so} : presión incidente (absoluta)

La relación p_r/p_{so} se mantiene cercana a la determinada según la ecuación anterior hasta un ángulo de incidencia de 40°. A partir de este ángulo decrece, hasta que, al llegar a los 90°, se hace igual a 1.

4.3) Daños Materiales

Los daños materiales son producidos tanto por el pico de presión de la onda de choque, como por el pico de presión de viento, pero en algunos objetos uno u otro tipo de presión tiene efecto dominante. Por ejemplo, los daños en los elementos constructivos son producidos principalmente por la onda de choque.

La resistencia de los elementos constructivos a los efectos de la presión es bastante baja. Los siguientes datos orientativos se refieren a la presión pico incidente. Si no hay presión reflejada, los valores de presión pico pueden duplicarse.

Presión Pico (kPa)	Efecto
0,7	Rotura de cristales de grandes dimensiones. Puede producir la rotura del 50% de los cristales a los que afecte.
3 a 7	Rotura de todo tipo de cristales y destrucción total de las ventanas.
7 a 14	Derrumbamiento de elementos compartimentadores ligeros, hechos de madera o de planchas de fibrocemento, aluminio o chapa de acero.
14 a 21	Derrumbamiento de elementos compartimentadores de hormigón hueco no armado, tales como tabiques de bloques de hormigón, de entre 200 y 300 mm de espesor.
21 a 30	Derrumbamiento de elementos estructurales metálicos ligeros.
30 a 48	Derrumbamiento de elementos estructurales de hormigón ligeros.
48 a 55	Rotura, por cizalladura o flexión, de tabiques de ladrillos, de 200 a 300 mm de espesor.
70	Destrucción total de la mayor parte de los elementos constructivos.

En cuanto a los equipos, recipientes y conductos de proceso, la mayor parte de ellos sólo pueden resistir una presión comprendida entre 20 y 50 kPa sin romperse.

4.4) Daños en las Personas

Los daños físicos directos en las personas pueden ser producidos por la presión incidente, por la suma de la presión incidente y la del viento o por la presión reflejada. Las personas pueden soportar sin daño sobrepresiones bastantes altas y de corta duración. Los datos que siguen son sobrepresiones de duración comprendida entre 3 y 5 milisegundos a partir del pico.

Presión Pico (kPa)	Efecto
15	Puede derribar a una persona.
34	Es el umbral de la rotura de tímpanos (el 50% de las personas la sufre a 100 kPa).
100	Puede producir daños pulmonares.
240	Es el umbral de las víctimas mortales.
345	Supone el 50% de las víctimas mortales.
450	Supone el 99% de las víctimas mortales.

No obstante, hay que tener en cuenta también aquellos efectos indirectos de la explosión que pueden producir lesiones o la muerte, tales como la proyección de objetos y el

derrumbamiento de elementos constructivos que pueden hacer impacto o caer sobre las personas y la proyección de personas contra superficies u objetos duros.

