



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**



**LICENCIATURA EN HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO**  
**CICLO DE COMPLEMENTACIÓN CURRICULAR - AÑO 2010**  
**TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR DE CS. BÁSICAS**

**Titulo:**

**INGENIERIA EN CONTROL DE EMERGENCIAS**  
**EFFECTO B.L.E.V.E**

**Autores:**

**Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo, D'Éramo Juan Cruz.**

**Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo, Kisielewicz Marcelo.**

**Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo, Díaz Walter.**

**Tutores de Cátedra:**

**Prof. Juárez P. // Prof. Frangella K. // Prof. Gerardi M. // Prof. Valensisi**

**Fecha de presentación:**

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_



## **INTRODUCCIÓN:**

En la industria general y aún más específicamente en la Petroquímica, existen dos grandes preocupaciones inherentes a infortunios laborales: Los accidentes en el trabajo y las enfermedades profesionales.

Dichos infortunios constituyen millonarias pérdidas dinerarias año tras año y aun peor, son la causa de miles de muertes en todo el mundo.

Así, según propia recomendación de la O.I.T (Organización Internacional del Trabajo), fue preciso subdividir ó re categorizar algunos aspectos relacionados a los accidentes en el ámbito laboral, de acuerdo y en virtud a su riesgo potencial, envergadura de daños y peligro hacia la población general y medio ambiente, constituyendo entre ellas, lo que hoy conocemos como “Accidentes Industriales Mayores (A.I.M)”.

A modo ilustrativo, podemos citar una de las últimas secuelas catastróficas de mayor relevancia, ocurrida en el año 1984 en una de las plantas industriales propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX) en San Juan, Ixhuatepec. Debido a las consecuencias dejadas por dicho accidente, aproximadamente 600 personas perdieron la vida y un severo daño ambiental fue producto colateral del mismo.

El objetivo de este trabajo de investigación, recopilación y análisis, es comprender los fenómenos físicos, químicos y termodinámicos, disparadores en la producción del tipo de accidente industrial mayor, conocido comúnmente como “explosiones BLEVE” ó “boiling liquid expanding vapor explosion”, aportando los conocimientos de ingeniería, seguridad, medio ambiente y control de emergencias, necesarios para adoptar un comportamiento proactivo y erradicar todo tipo de perdidas, ya sean humanas como medio ambientales, como así también proteger de los daños a la población expuesta en áreas linderas ó circundantes a plantas industriales. Así mismo, se establecerán parámetros científicos desarrollados y utilizados mundialmente para la prevención y medidas de control de este tipo de emergencias.

Como parte de la metodología de investigación y desarrollo del presente trabajo, se recopiló información específica de la industria y se realizaron entrevistas con directivos



de la compañía “Total Austral” y del “Instituto Argentino del Petróleo y Gas”. Así mismo se generó un intercambio de conocimientos prácticos y bibliográficos con personal de emergencias de gran experiencia en la temática.

El efecto BLEVE, de acuerdo a la nota técnica preventiva NTP-293 del año 1991, emitida por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo de España, puede ser definido como: (cita textual del artículo)

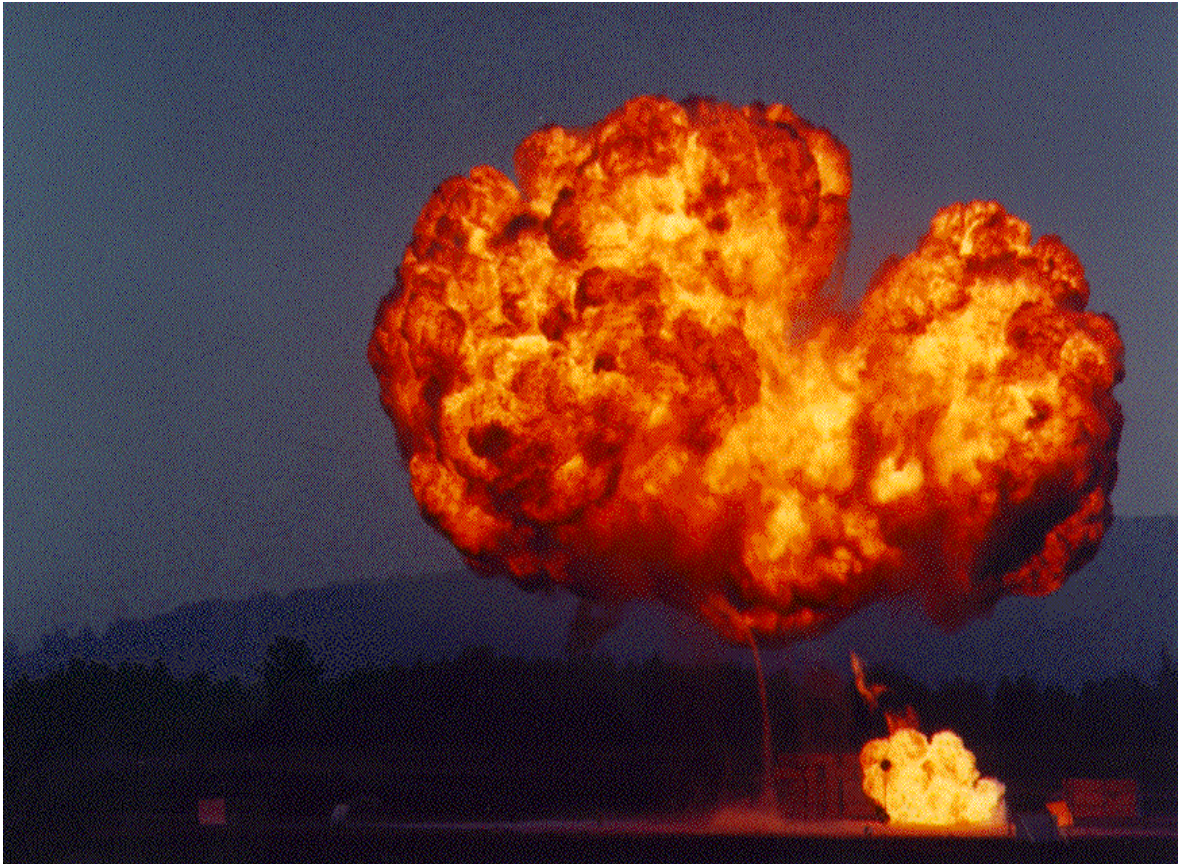
***“Una BLEVE es un tipo de explosión mecánica cuyo nombre procede de sus iniciales en inglés “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion” cuya traducción sería “Expansión Explosiva del Vapor de un Líquido en Ebullición”.***

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

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

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





Cabe destacar que, dichos fenómenos no pueden ser circunscriptos únicamente al ámbito interno industrial de planta, debido a que los mismos pueden originarse tanto en etapa de manipulación, almacenamiento ó transporte de mercancías peligrosas.

Una situación particular y especial de ello se da en el transporte, debido a que las sustancias y contenedores se encuentran en movimiento, la población vulnerable expuesta es mayor (ej. grandes ciudades) y por sobre todo a que la exposición al riesgo se ve incrementada por las situaciones adversas e inesperadas propias del transporte.

Así por ejemplo, podemos mencionar que estadísticamente el mayor porcentaje de incidentes relacionados con este tipo de eventos, se suscitaron durante la movilización de las sustancias en el ámbito terrestre (accidentes con camiones cisternas en rutas).

Cabe destacar al respecto, en relación a esta última etapa, que las medidas técnico preventivas de ingeniería y seguridad se ven acotadas en su relevancia, en contraste con las adoptadas en el medio industrial para instalaciones fijas. Así podemos

mencionar, a modo de ejemplificación, sistemas de control de sobrepresión automatizados y a control remoto, sistemas de rociadores de agua contra incendios autoenfriantes, etc.

Estas explosiones tienen el alto potencial de provocar daños catastróficos al medio a través de las diversas consecuencias asociadas. Entre ellas caben destacar (serán expuestas con mayor detalle y precisión en el desarrollo): bolas de fuego de gran magnitud con emisión de altísimas radiaciones térmicas, ondas expansivas de sobre presión capaces de destruir edificaciones de gran porte, proyección de objetos, elementos y fragmentos a distancias de hasta más de un kilómetro.

Estas severas consecuencias, tal como lo ha demostrado la historia siniestral en todo el mundo, son capaces de arrasar y destruir por completo toda el área circundante al contenedor explosionado, acabando con toda forma de vida en cientos de metros a la redonda.

A continuación y con el aporte de las herramientas de la ingeniería y de las ciencias exactas, se desarrollará con mayor detalle el comportamiento de este fenómeno, sus causas principales, sus etapas de evolución, los daños asociados y las medidas preventivas estipuladas en estos casos. Así mismo, se establecerán casos simulados de emergencia, a los efectos de lograr una mejor comprensión de este tipo de sucesos catastróficos.

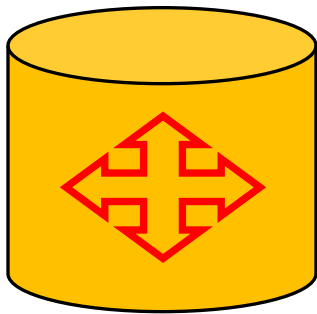




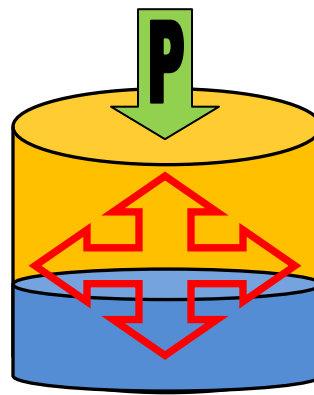
## DESARROLLO:

Tal como se expuso precedentemente, la fenomenología BLEVE se constituye como un tipo de explosión mecánica, producida por la falla de un recipiente hermético con contenidos almacenados en su interior en condiciones de sobrepresión.

Esta falla catastrófica, ocasiona la liberación instantánea y posterior expansión del líquido ó gas licuado en el interior del contenedor, generando un incremento exponencial del volumen almacenado, al encontrarse éste repentinamente a condiciones atmosféricas normales (exterior del contenedor). Así, esta masa almacenada normalmente a sobre presión, es transformada casi instantáneamente al estado de vapor con su consecuente expansión volumétrica (aproximadamente 200 veces el volumen inicial).



**Figura 01 - A**



**Figura 01 - B**

Dicha liberación (con consecuente cambio repentino de presión y volumen) genera una potente onda expansiva en el proceso de ruptura del contenedor, lo que ocasiona la explosión del mismo, con proyección de fragmentos a un radio de alcance de cientos de metros a la redonda.

Así mismo, cabe destacar que, si la sustancia almacenada posee características inflamables, se producirá una deflagración instantánea con gran potencial térmico, en caso de encontrarse en su liberación con una fuente de ignición capaz de combustionar la masa gaseosa en expansión (ej. incendio alrededor del tanque contenedor). Esta deflagración es conocida comúnmente como “bola de fuego” ó “fireball”.

Tal como se representa gráficamente en las figuras 1-A y 1-B; los gases almacenados se comportan de acuerdo a las leyes que rigen en las ciencias físicas de la termodinámica (relación volumen – presión – temperatura).

Así, todo gas almacenado en condiciones de presión y temperatura normal, se expenderá en estado gaseoso hasta adoptar finalmente la forma y volumen del recipiente contenedor, ocasionando consecuentemente una presión “X” sobre las paredes internas del recipiente. **(Figura 1-A).**

No obstante, dicha forma de almacenamiento no siempre resulta útil ó conveniente (operacional y económicamente hablando), máxime si de transporte de sustancias se trata. Por tal razón, mediante la aplicación de ciencias de la ingeniería, se ha logrado extremar los volúmenes almacenados mediante la aplicación de sobrepresiones al interior del recipiente, lo que genera un cambio de comportamiento molecular en el gas, ocasionando la licuación del mismo (parte de éste se transforma al estado líquido), permitiendo la incorporación de hasta 200 veces más volumen de sustancia al contenedor (rendimiento económico y operacional asegurado).

Este mecanismo de almacenamiento, tal como lo destaca la **Figura 1 – B**, transforma parte de la masa gaseosa al estado líquido, generando consecuentemente un altísimo aumento de las condiciones de presión sobre las paredes internas del recipiente contenedor.

Dicha condición, resulta fundamental y necesaria para la producción de este tipo de explosiones (almacenamiento de líquidos ó gases licuados a presión sobrecalentados).

Cuando un líquido es almacenado a presiones elevadas, la temperatura de almacenamiento suele ser notablemente superior a la temperatura de ebullición normal. Al producirse la falla con posterior ruptura del contenedor, el líquido almacenado en el interior comienza rápidamente a entrar en ebullición, a causa de que la temperatura del medio exterior es notablemente superior a la de ebullición de la sustancia almacenada. Esta condición provoca un cambio masivo a fase vapor, con la consecuente falla mecánica del contenedor.



Es por ello, como puede observarse, que las explosiones BLEVES pueden producirse incluso en calderas de vapor ó calentadores de agua. Sin embargo, debido a su potencial de daño, el presente trabajo centra su estudio en las explosiones BLEVE con inclusión de deflagraciones térmicas, debido al almacenamiento de sustancias inflamables.

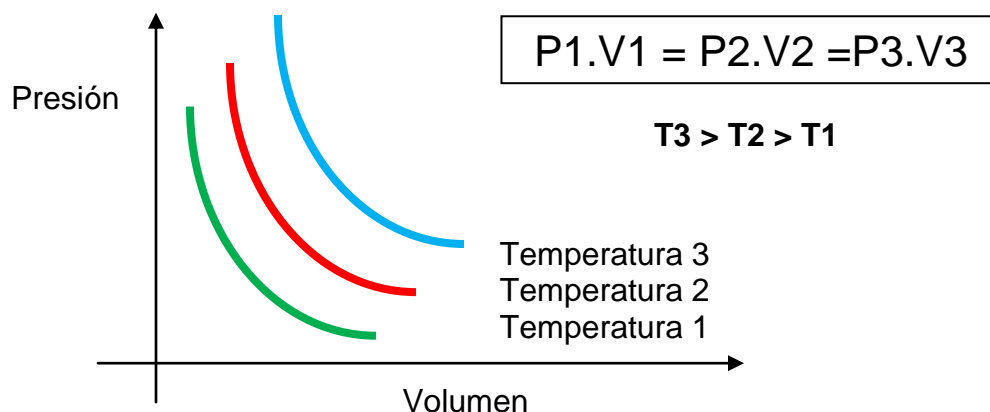
### **FENOMENOLOGÍA TERMODINÁMICA:**

Como se expuso brevemente y a rasgos generales en el párrafo anterior, las condiciones de almacenamiento capaces de producir este tipo de siniestros, se basan en la aplicación práctica de las leyes termodinámicas que rigen su comportamiento.

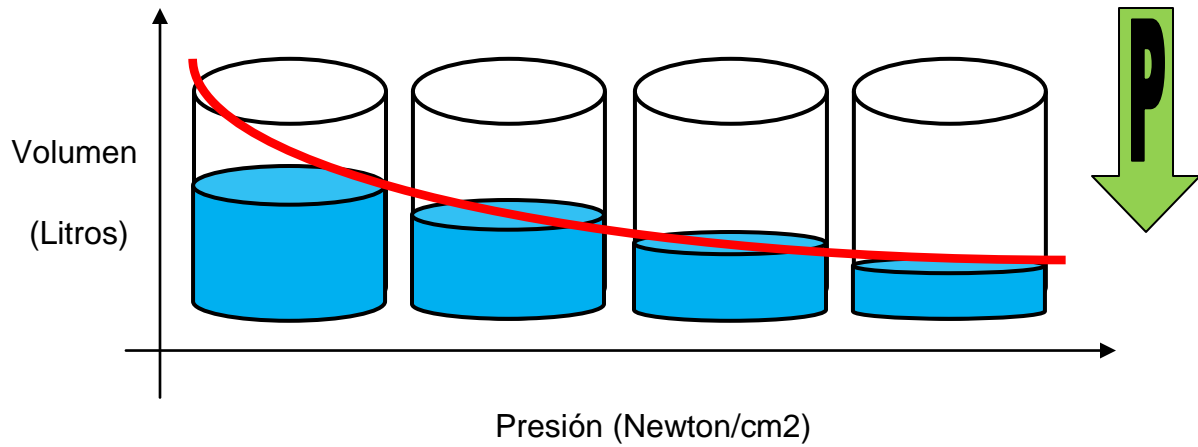
Precisamente entonces, a fin de comprender fácilmente el desarrollo de esta fenomenología, resulta conveniente hacer hincapié en los preceptos básicos que explican tal comportamiento. A continuación y de forma reducida, se mencionarán algunas de las leyes más comunes aplicadas en el estudio termodinámico, con el objeto de destacar el papel fundamental que toman las variables independientes de presión, volumen y temperatura en las explosiones BLEVE.

#### **A) Ley de Boyle – Mariotte:**

“Si un gas se mantiene a temperatura constante, su volumen es inversamente proporcional a la presión. Si se comprime una gas hasta la mitad de su volumen inicial, se duplica la presión”.



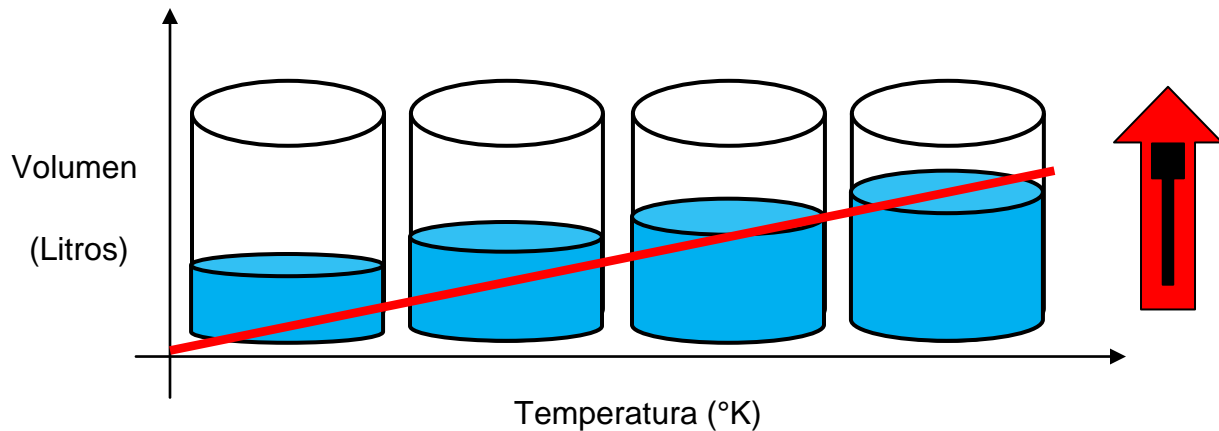




**B) Ley de Gay – Lussac:**

“Si un gas se mantiene a presión constante, su volumen es directamente proporcional a la temperatura absoluta. Si se calienta un gas hasta una temperatura dos veces mayor que la inicial (°K), el volumen del gas del es duplicado”.

P= constante:  
 $V_F/T_F = V_I/T_I$        $T = °K$   
V= constante:       $V = v/m$   
 $P_F/T_F = P_I/T_I$



**C) Ley de Charles:**

“La presión ejercida por una masa gaseosa, es directamente proporcional a su temperatura absoluta, siempre y cuando el volumen se mantenga constante”.

**D) Ecuación general del estado gaseoso:**

“En una masa gaseosa, los volúmenes y las presiones son directamente proporcionales a sus temperaturas absolutas e inversamente proporcionales entre sí”.

**CONDICIONES NECESARIAS PARA EXPLOSIONES BLEVE:**

Tras un pequeño resumen asociado al comportamiento termodinámico de los gases en virtud de sus variables independientes (presión – volumen – temperatura), nos adentramos ya en el estudio propio de este tipo de explosiones.

Deben existir una serie de condiciones interdependientes y necesarias para lograr la producción de explosiones BLEVE.

- **Producto en estado líquido sobrecalentado:** En caso de acaecerse un incendio que incida exteriormente sobre la superficie del contenedor ó bajo circunstancias de sobrellenado del mismo, puede generarse una situación de inestabilidad indeseada, producto de la elevación de temperatura del producto, mayor que la de equilibrio a presión de vapor normal. A su vez, de producirse una falla catastrófica que origine una fisura del depósito, puede llegar a ocasionarse un descenso abrupto de presión que produciría un sobrecalentamiento del gas licuado.
- **Descenso abrupto de presión isoentrópica del tanque contenedor:** En caso de ocasionarse un exponencial descenso de la presión interna del depósito, los efectos de la explosión BLEVE serán aun mayores. Este descenso puede ser producto de la falla mecánica del acero en el recipiente (ej. a causa de exposición externa a llamas ó radiación térmica) ó debido a deficiencias de los mecanismos de seguridad del mismo (válvulas de sobrepresión mal diseñadas, discos de ruptura, perforaciones



del acero por sobrellenado ó impactos externos). El tamaño ó área de ruptura en la falla del depósito, es determinante en el descenso de la presión isoentrópica del tanque y en la zona afectada por la nucleación. A fin de comprender fácilmente este último concepto, tomaremos cita textual de la nota técnico preventiva NTP – 293 del año 1991, emitida por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España.

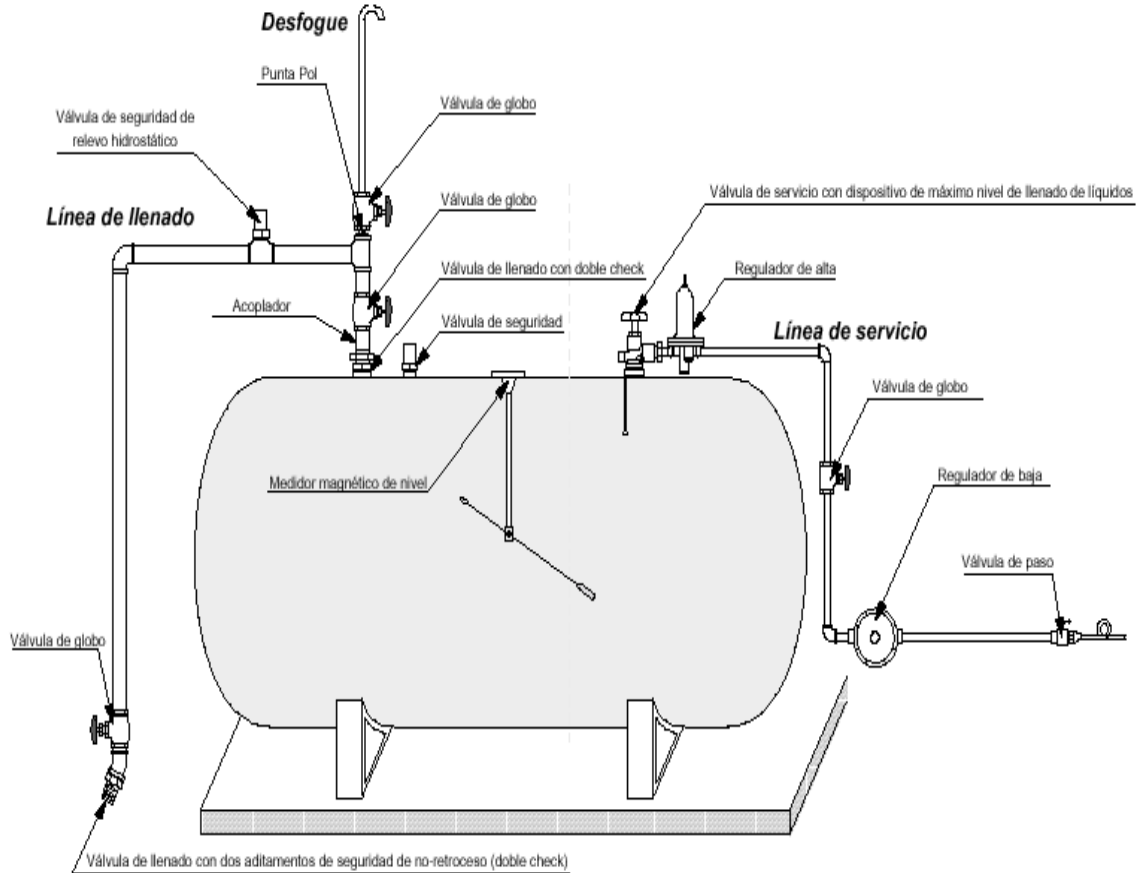
***“La mayoría de estudios de investigación realizados sobre este proceso de nucleación espontánea coinciden en que la evaporación con formación de minúsculas burbujas no afectan a la totalidad de la masa, aunque la cantidad evaporada instantáneamente es de tal magnitud que arrastra al líquido restante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

### **Ejemplo:**

A modo de ejemplificación, tomaremos la instancia de almacenamiento en planta de una cisterna de gas propano. En esta circunstancia, determinaremos las propiedades generales de dicha sustancia y analizaremos las posibilidades de falla del contenedor de acero a causa de una posible implicancia de incendio externo sobre el recipiente (análisis de fallos).



## DIAGRAMA DE INSTALACIÓN Y MECANISMOS DE SEGURIDAD:



## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPLOSIVO:

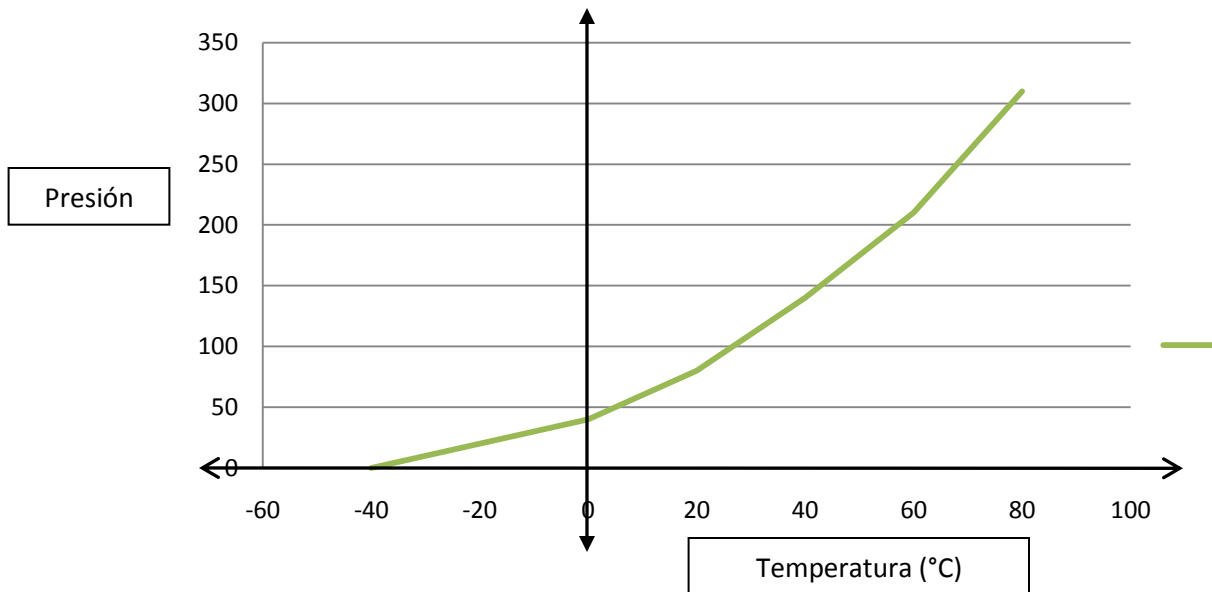
- 1) El contenedor de gas licuado a sobrepresión (propano), es alcanzado por llamas directas producto de un incendio en un depósito industrial lindero.

## DATOS TÉCNICOS DEL PROPANO:

- **Rango de expansión:** 1 Litro de propano a 25°C se expenderá a 270 litros.
- **Rango de inflamabilidad:** LEL 2,2% - UEL 9,5%
- **Toxicidad:** Si bien no es tóxico, a altas concentraciones posee características anestésicas.
- **Número de identificación internacional (ONU):** 1075 – **N° Guía:** 115

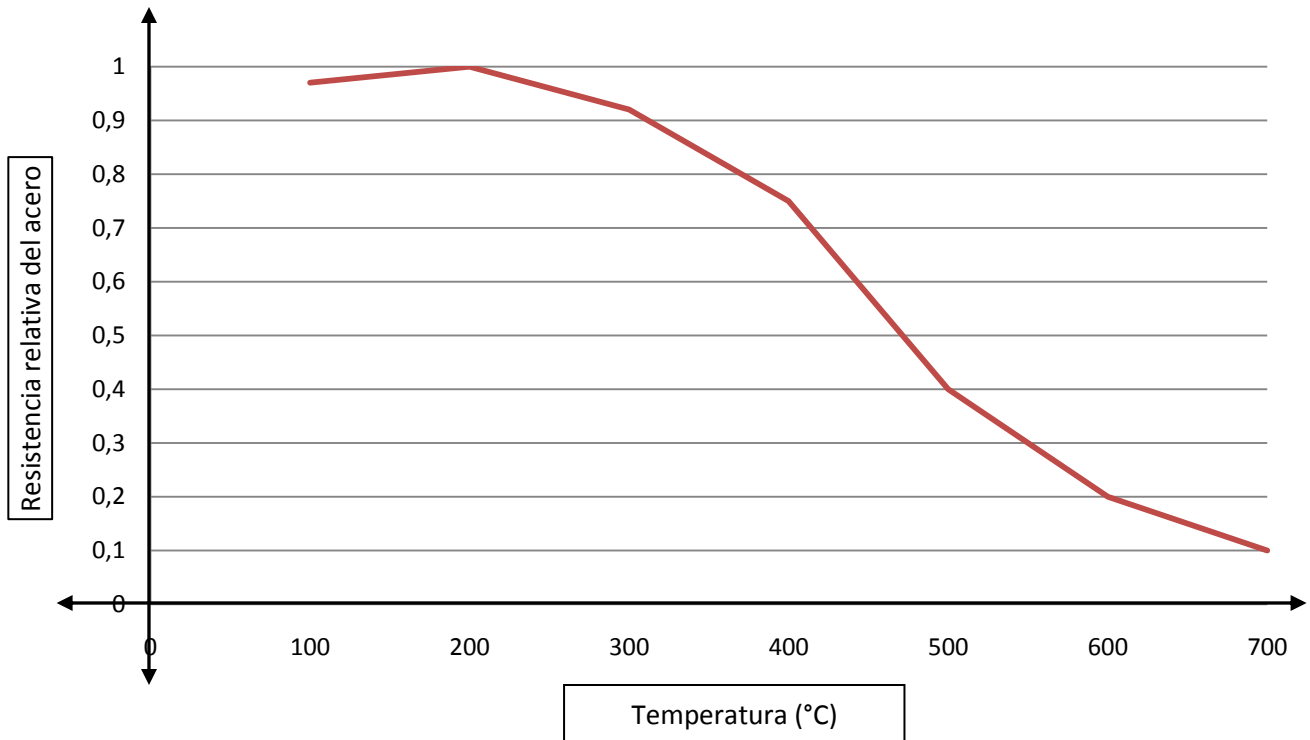
- 2) Las llamas toman contacto e inciden directamente sobre la superficie externa del recipiente.
- 3) El incremento de temperatura origina un aumento de volumen interno en el contenedor, con consecuente elevación de presión interna.

### **COMPORTAMIENTO PRESIÓN – TEMPERATURA DEL PROPANO**



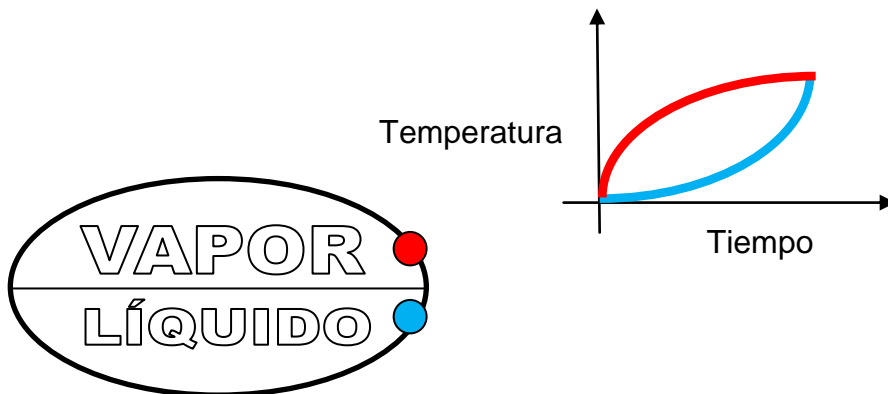
- 4) Se disparan las válvulas de seguridad, aliviando parcialmente la presión excedente.
- 5) El gas liberado comienza a combustionar producto de las llamas externas.
- 6) La acción del fuego sobre la estructura de acero de la cisterna, produce un debilitamiento en la resistencia relativa del mismo.

### CÁLCULO DE RESISTENCIA RELATIVA DEL ACERO (FALLAS ANTE INCENDIO)



- 7) Las válvulas de seguridad no alcanzan a cubrir las necesidades de evacuación de sobrepresión interna.
- 8) El acero del contenedor comienza a fatigarse y a disminuir notablemente su resistencia en la parte superior del recipiente (fase gaseosa).

### ESTADO DE FASES E IMPLICANCIA DE LA ACCIÓN TÉRMICA:

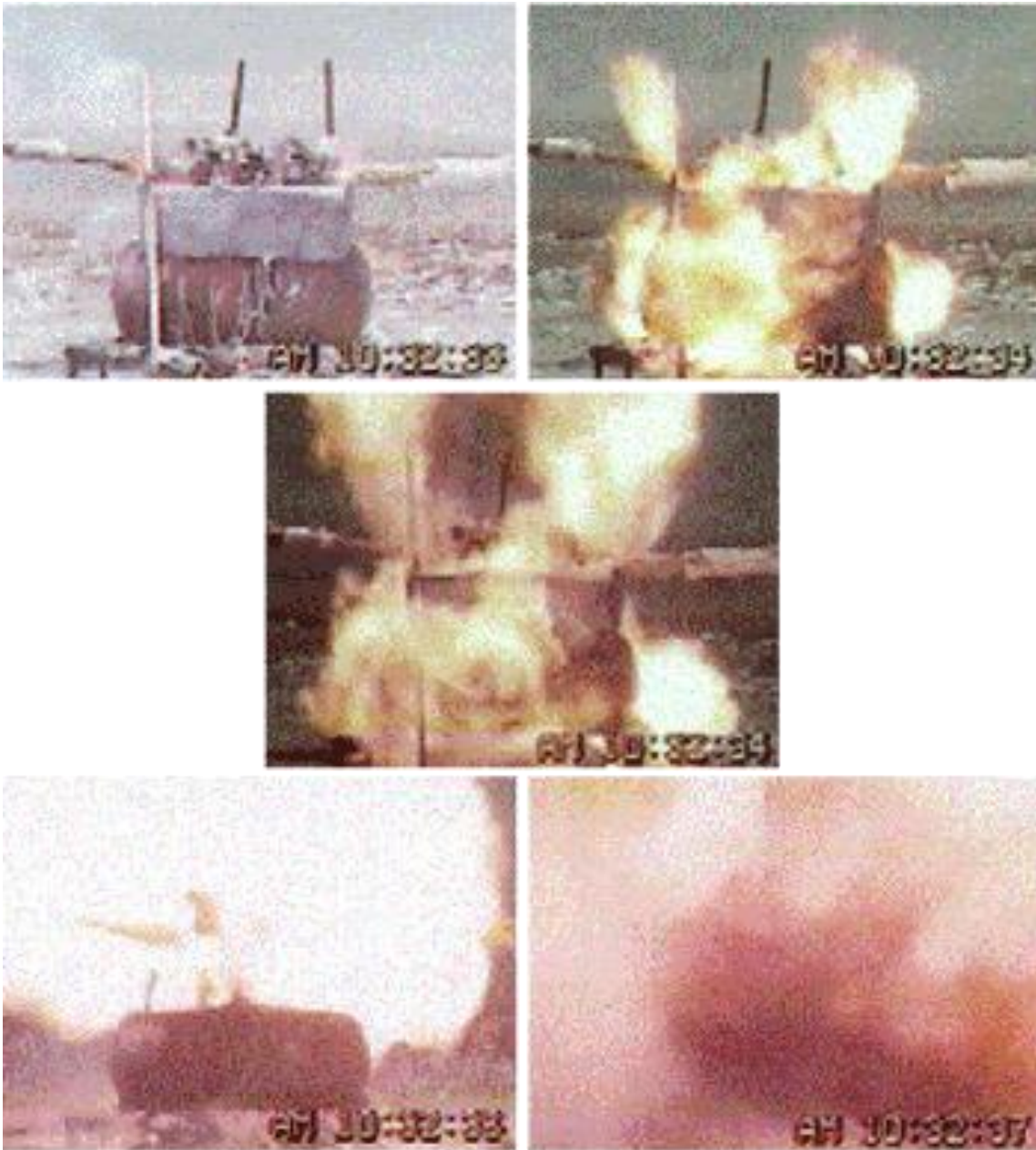




- 9) La presión interna excedente, en conjunción con el debilitamiento estructural, ocasionan una falla con posterior ruptura en el tanque.
- 10) Producto de la expansión del gas almacenado, el contenedor estalla, liberando y despresurizando la masa gaseosa a la atmosfera externa a presión normal (1 atm.)
- 11) Se produce un pasaje a estado vapor de toda la masa contenida, con expansión volumétrica de la misma (aproximadamente, en este caso, 250 veces el volumen inicial de propano almacenado bajo presión).
- 12) El estallido origina una onda de sobrepresión, arrojando restos estructurales fragmentados del contenedor, en forma de proyectiles a distancias de hasta 1000m.



- 13) La masa gaseosa se deflagra producto del contacto con las llamas externas, generando consecuentemente una gran bola de fuego (fireball) con producción de una importante radiación térmica.



Secuencias fotográficas del proceso explosivo de la BLEVE.

## **ANÁLISIS DE SUCESO CATASTRÓFICO:**

Tal como puede observarse en la secuencia de ejemplificación precedentemente expuesta, los efectos principales producto de la exposición BLEVE pueden individualizarse en:

- a) Ondas de sobrepresión expansiva.
- b) Proyección de restos estructurales del contenedor.
- c) Radiación térmica de la bola de fuego (fireball).

### **A) ONDAS DE SOBREPRESIÓN EXPANSIVAS**

Tras la expansión energética del gas liberado, es generada una onda de sobrepresión expansiva, en un radio equidistante al contenedor explotado. Dicha onda expansiva es capaz de provocar la muerte y/o daños fisiológicos a los individuos que circunden el área crítica, como lesiones pulmonares, quemaduras internas y/o roturas de tímpanos. Estos daños son ocasionados en áreas no mayores a 100 m a la redonda de la explosión.

A su vez, los efectos indeseados de la onda expansiva, poseen un potencial de daño con capacidad de ocasionar daños estructurales a distancias de hasta 500 m del epicentro de la explosión.

### **B) PROYECCIÓN DE RESTOS ESTRUCTURALES DEL CONTENEDOR**

Producto de la explosión y las ondas expansivas generadas, restos fragmentados del contenedor y de estructuras cercanas, alcanzan proyección a distancias de hasta 1000 m del recipiente explotado, con potencial de daño sumamente considerable.



### **C) RADIACIÓN TÉRMICA**

A los fines de estimación matemática de los efectos y alcances de las bolas de fuego y sus radiaciones térmicas, previamente necesitaremos conocer las características principales de estas.

- 1) Radio de la bola de fuego.
- 2) Altura de la bola de fuego.
- 3) Duración máxima de la deflagración.

Las fórmulas y modelos matemáticos utilizados en el presente trabajo de integración, cabe destacar, se sustentan en mecanismos estimativos aplicados mundialmente, con reconocimiento científico en relación a sus aplicaciones prácticas. Las ecuaciones a continuación utilizadas, corresponden a informes del I.N.S.H.T de España.

#### **1) DIAMETRO DE LA BOLA DE FUEGO**

Matemáticamente, podemos estimar de forma aproximada el diámetro de la bola de fuego en base a la siguiente ecuación representativa:

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

Referencias:

- D = diámetro máximo (m).
- W = masa total del combustible (kg).

#### **2) ALTURA DE LA BOLA DE FUEGO**

$$H = 0,75. D$$

Referencias:

- H = altura del centro de la bola de fuego (m).
- D = diámetro máximo de la bola de fuego (m)



### 3) DURACIÓN APROXIMADA DE LA DEFLAGRACIÓN

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

Referencias:

- T = tiempo de duración de la deflagración (s)
- W = masa total de combustible (Kg)

Experimentalmente, se ha demostrado que en contenedores de gran capacidad, el tiempo de deflagración de la bola de fuego puede llegar hasta los tres minutos.

### EJEMPLIFICACIÓN APLICADA

Supongamos la explosión de un contenedor de gas butano en un camión cisterna que almacena 314 m<sup>3</sup> de dicha sustancia. Se desea calcular, a fin de estimar daños potenciales, el diámetro, altura y duración de la bola de fuego en una posible explosión BLEVE, debida a un accidente vehicular durante el transporte en carretera. Graficar

**1) Diámetro máximo de la bola de fuego:** (densidad del butano 0,5 Kg/dm<sup>3</sup>)

$$W = 0,5 \text{ kg/dm}^3 \cdot 314.000\text{dm}^3 = \mathbf{157.000 \text{ kg}}$$
$$D = 6,48. 157.000 \text{ Kg}^{0,325} \text{ (T. N. O.)} = \mathbf{316, 40 \text{ m}}$$

**2) Altura máxima del centro de la bola de fuego:**

$$H = 0,75. 316, 40 \text{ m} = \mathbf{237, 30 \text{ m}}$$

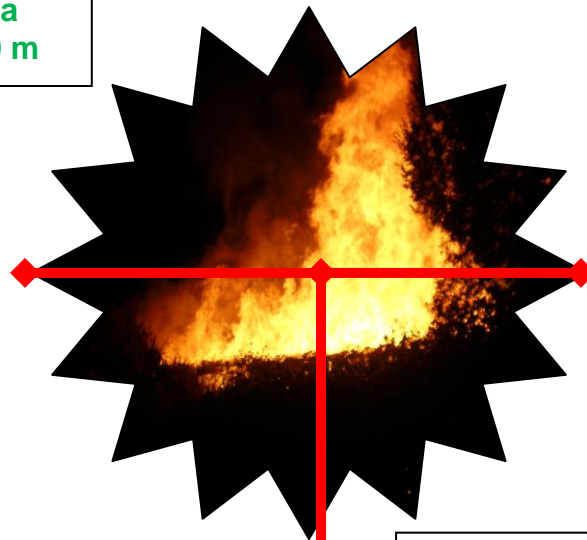
**3) Duración de la deflagración:**

$$T = 0,852. 157.000 \text{ Kg}^{0,26} \text{ (T. N. O.)} = \mathbf{19 \text{ segundos}}$$

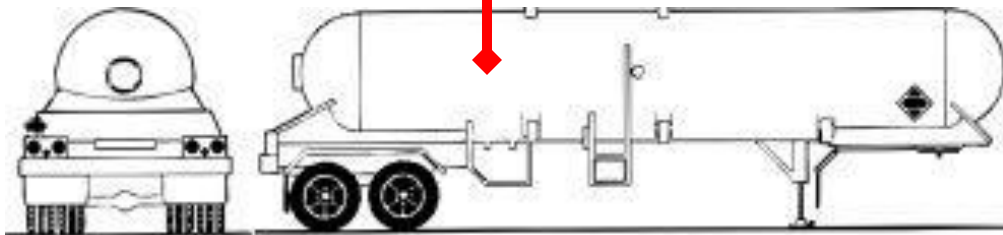


Diámetro máximo de la Bola de fuego = 316,40 m

~ 20 ~



Altura a centro de Bola de fuego = 237,30 m



Tal como hemos expuesto precedentemente, es posible establecer un modelo científico que nos permita analizar el suceso catastrófico desde una perspectiva analítica.

Esta particularidad establece la posibilidad de, a través del análisis matemático, prever posibles contingencias siniéstrales relacionadas con exposiciones BLEVE. A su vez, dicho estudio proporciona datos fundamentales a la hora de prevenir emergencias industriales mayores y/o establecer de forma anticipada un estudio de fallos y daños asociados.

Por tal razón, el estudio analítico de este tipo de sucesos se constituye como una herramienta fundamental en las labores de la higiene y seguridad en el ámbito laboral.



Sin embargo, no culminaríamos totalmente el estudio analítico de daños previsibles, si no incorporásemos a la ecuación general, la estimación de radiación térmica recibida por parte de los cuerpos que se encontrasen a una distancia equidistante de la explosión (ej. edificios) y la ecuación de dosis de radiación térmica recibida por los individuos expuestos a una determinada distancia del evento (indispensable para establecer previsiones de mortalidad asociada).

Dichas determinaciones resultan imprescindibles a la hora de establecer áreas de evacuación, labores de control de emergencias con coeficientes de seguridad para el personal de respuesta, estimación de daños estructurales, etc.

#### **D) RADIACIÓN TÉRMICA RECIBIDA EN UN PUNTO DETERMINADO**

$$i = d \cdot f \cdot e$$

##### **Referencias:**

- $i$  = irradiación recibida por el cuerpo receptor ( $\text{KW}/\text{m}^2$ )
- $d$  = coeficiente de transmisión atmosférica
- $f$  = factor geométrico de visión
- $e$  = intensidad media de radiación ( $\text{KW}/\text{m}^2$ )

#### **1) COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN ATMOSFÉRICA**

Su determinación es función de la humedad relativa del aire y de la distancia a que se encuentre el cuerpo receptor de la radiación térmica, en relación a la fuente generadora (bola de fuego)

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

##### **Referencias:**

- $P'v$  = presión parcial absoluta del vapor en el aire ambiental (Pa) ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ )
- $x'$  = distancia entre la bola de fuego y el cuerpo receptor de radiación térmica (m).



## 2) FACTOR GEOMÉTRICO DE VISIÓN

Este coeficiente es estimado en relación a variables propias de las circunstancias eventuales, como la forma del cuerpo generador y la del receptor de la radiación térmica y de la longitud equidistante a que se encuentre el objeto de estudio irradiado.

A fin de simplificar dicho aspecto y considerando propiedades características de este tipo de explosiones, dicho coeficiente adopta la forma analítica de:

$$f = D^2 / 4 \cdot X^2$$

### Referencias:

- D = diámetro máximo de bola de fuego (m).
- X = distancia entre el centro de la esfera y el cuerpo irradiado (m).

## 3) INTENSIDAD MEDIA DE RADIACIÓN

Podemos conceptualizar esta definición, como el flujo de radiación recibido por unidad de superficie y tiempo sobre el cuerpo receptor. En relación a las referencias aplicadas en la ecuación de intensidad media de radiación, podemos individualizar al coeficiente de radiación “f<sub>r</sub>”, el cual oscila entre 0,25 y 0,40. Dicho coeficiente representa la fracción de energía total desarrollada en la combustión de la masa deflagrada.

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

### Referencias:

- W = masa total del combustible (kg).
- H<sub>c</sub> = calor de combustión (kJ/kg).
- D = diámetro de la bola de fuego (m).
- T = duración de la deflagración (s).

## **E) DOSIS DE RADIACIÓN TÉRMICA PARA PERSONAS EXPUESTAS**

Un dato fundamental a la hora de intentar establecer estimaciones de daños asociados, es el valor de dosis de radiación térmica para personas expuestas a los efectos de la deflagración explosiva.

Lógicamente, dicho valor tomará variables independientes de la explosión en sí, como ser el caso del tiempo de exposición del cuerpo receptor (individuo) a las altas radiaciones emitidas por la deflagración.

Uno de los mecanismos matemáticos más utilizados mundialmente, se basa en la aplicación del método Eisenberg. Tal ecuación toma la forma de:

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

### **Referencias:**

t = tiempo de exposición (s).

i = irradiación recibida (W/m<sup>2</sup>).

Habiendo concluido la totalidad de los cálculos estimativos expuestos, nos encontramos ya en posibilidad de aplicar de forma práctica la utilización analítica frente a una posible contingencia de dicha índole.

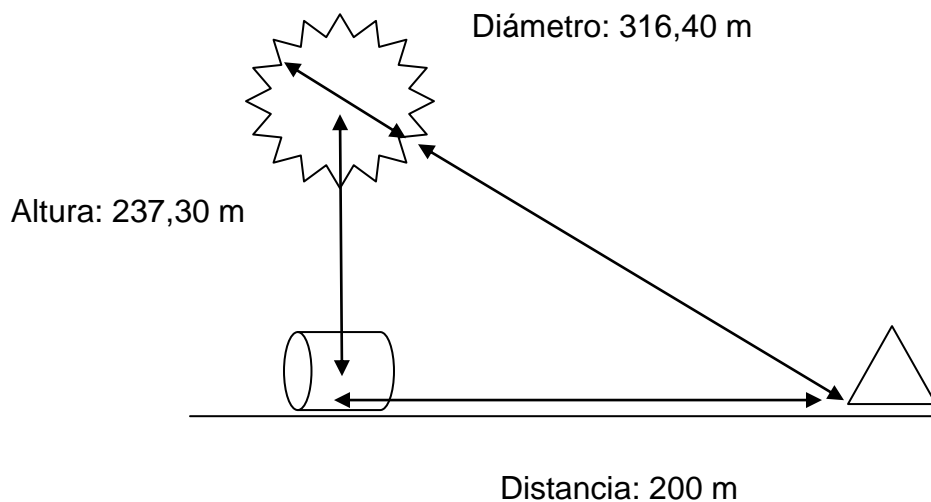
## **EJEMPLIFICACIÓN PRÁCTICA**

Suponiendo el caso asimilativo tratado anteriormente (explosión de un camión cisterna transportando una masa de 314 m<sup>3</sup> de gas butano), deseamos conocer, a fin de estimar daños posibles, diámetro de la bola de fuego, altura al centro de radio de la misma, tiempo de deflagración, radiación térmica recibida por un cuerpo estructural (edificio) y por un individuo expuesto a la radiación (durante toda la explosión), ambos a una distancia de 200 m.



A los fines de facilitar los cálculos pertinentes, diremos que la temperatura de almacenamiento del butano es de 20°C y la humedad relativa ambiente (atmosfera exterior) se encuentra en 50%. Otros datos prácticos necesarios, nos indican que:

- Presión absoluta del vapor de agua saturado a 20°C = **2310 Pa.**
- Presión parcial absoluta del vapor en el aire ambiental ( $P'_v$ ) = **1155 Pa**
  - $P'_v / P_v = 0,5$  -----  $P'_v = 0,5 \cdot 2310 \text{ Pa} = \mathbf{1155 \text{ Pa}}$
- Calor de combustión del butano = **45800 kJ/kg.**
- Densidad del butano en las condiciones expuestas = **0,5kg/dm<sup>3</sup>.**
- Distancia entre borde externo de la bola de fuego y el cuerpo irradiado a 200m (x')
- Cálculos trigonométricos:  $[\sqrt{(237,3^2 + 200^2)}] - (316,40/2) = \mathbf{152,14 \text{ m}}$
- Distancia entre centro de bola de fuego y cuerpo irradiado (X)
  - Cálculos trigonométricos:  $\sqrt{(237,3^2 + 200^2)} = \mathbf{310,34 \text{ m}}$



Según datos estimados anteriormente:

- A) **Diámetro de la bola de fuego: 316, 40 metros**
- B) **Altura de la bola de fuego: 237, 30 metros**
- C) **Duración de la deflagración: 19 segundos**

Cálculos restantes:

1) Coeficiente de transmisión atmosférica

$$d = 2,02 \cdot (1155 \text{ Pa} \cdot 152,14 \text{ m})^{-0,09} = \mathbf{0,683}$$

2) Factor geométrico de visión

$$f = 316,40^2 / (4 \cdot 310,34^2) = \mathbf{0,259}$$

3) Intensidad media de radiación ( $f_r = 0,25$ )

$$e = (0,25 \cdot 157000 \text{ kg} \cdot 45800 \text{ KJ/Kg}) / (3,14 \cdot 237,30^2 \text{ m} \cdot 19 \text{ seg}) = \mathbf{535 \text{ kW/m}^2}$$

**D) Irradiación recibida**

$$i = d \cdot f \cdot e = 0,683 \cdot 0,259 \cdot 535 = \mathbf{94,63 \text{ kW/m}^2}$$

(Sobre superficie hipotéticamente perpendicular a la radiación)

$$\text{Tg } \alpha = 237,30 \text{ m} / 200 \text{ m} = 1,18 \text{ ----- } \alpha = \mathbf{49^\circ 43' 12''}$$

(Radiación recibida sobre una persona o superficie vertical en el suelo)

$$I_{\text{real}} = 94,63 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{Cos } 49^\circ 43' 12'' = 61,18 \text{ kW/m}^2 = \mathbf{61180 \text{ W/m}^2}$$

**E) Dosis de radiación térmica para personas expuestas (durante toda la explosión)**

$$\text{Dosis} = (19 \cdot 61180^{4/3}) = \mathbf{45.803.594 \text{ W/m}^2}$$

Tal como hemos observado analíticamente en los modelos de aproximación de daños utilizados, las ciencias básicas nos permiten experimentar situaciones catastróficas y prever efectos indeseados sobre las personas y bienes materiales involucrados.

Para estimar finalmente los daños aproximados que generaría un evento de las características citas, haremos referencia a cuadros y datos ilustrativos extraídos del programa “Toccatà – Italia”.

<b>Material constructivo</b>	<b>Resistencia estructural máxima a la radiación térmica (W/m<sup>2</sup>)</b>
Madera	10.000
Acero	40.000
Cemento	60.000
Hormigón armado	200.000
Vidrio	30.000 // 30.000
Pared de ladrillo	400.000

Como vemos, en virtud de los resultados arrojados por los modelos de experimentación analítica, para un cuerpo (edificio) irradiado térmicamente a 200 m del contenedor explosionado, con un potencial de irradiación real de **61180 W/m<sup>2</sup>**, observaríamos daños estructurales en cemento, acero, madera y vidrio. Lógicamente, el potencial de daño para las personas expuestas, puede ser definido como “mortal”.



## **CONCLUSIONES**

En virtud de los expuestos precedentes y sus demostraciones científico analíticas, podemos afirmar, sin temor a equivocarnos, que el potencial de daño de este tipo de sucesos catastróficos es extremadamente alto, constituyéndose como uno de los más severos en relación accidentes industriales mayores.

Esta condición particular hace fundamental el evitar que el mismo suceda, debido a su vez a que las labores de control de emergencias asociadas, se caracterizan por un elevado riesgo de ejecución, bajas posibilidades de control y neutralización de riesgos, dificultades de evacuación masiva por implicancia de grandes superficies de cobertura de las explosiones, etc.

Por tal razón, una herramienta fundamental en la prevención de estas catástrofes es la aplicación analítica de los mecanismos estimativos de potencialidad destructiva y daños asociados, los cuales permiten a los profesionales de higiene y seguridad laboral, establecer un marco conceptual teórico a sus labores de prevención.

A su vez, tal como puede observarse en el presente trabajo de recopilación y análisis, existe un avanzado estudio de la fenomenología BLEVE, producto tal vez del aprendizaje dejado por las secuelas pasadas tras los sucesos explosivos en todo el mundo.

Esta circunstancia de conocimiento e investigación, ha posibilitado el desarrollo de tecnologías preventivas y de control de emergencias, que permiten explotar el potencial industrial sin caer continuamente en desgracia por siniestros de dicha magnitud.

Será entonces responsabilidad de los entes gubernamentales y de las empresas en su generalidad, el prever la ocurrencia de dichos sucesos y adoptar las medidas preventivas pertinentes al caso.



## **INGENIERÍA EN PREVENCIÓN DE EMERGENCIAS (ANEXO DE CONCLUSIÓN)**

Pretender establecer un estudio detallado y analítico de las medidas preventivas adoptadas en los tanques de almacenamiento para evitar explosiones BLEVE, escaparía al objeto del presente estudio y constituye en su esencia un análisis pormenorizado propio de un trabajo independiente y tendiente a trabajar tal aspecto. Idéntico criterio es establecido para los mecanismos de respuesta y control de emergencias asociadas, los cuales debido a su complejidad, ameritan un capítulo aparte en su estudio específico.

Sin embargo, como parte de la presente conclusión, este equipo de investigación ha creído conveniente y oportuno realizar una pequeña introducción a la materia preventiva, mencionando a rasgos generales los aspectos básicos a tomar en cuenta para evitar la ocurrencia de explosiones BLEVE.

Las medidas de ingeniería preventiva concentran principalmente su objeto en:

- **Evitar ó limitar la generación de presiones excesivas en el interior del tanque.**
  - Válvulas de seguridad (aliviadoras de presión)
  - Discos de ruptura
  - Sistemas de vaciado rápido ante emergencias
  - Control de presiones y capacidad de llenado durante las tareas de carga
- **Evitar ó limitar el aumento de temperatura en el tanque (ej. incendios)**
  - Cubas de retención de material (evitar incendios ante derrames)
  - Sistemas de refrigeración de contenedores (rociadores automáticos)
  - Aislamiento térmico de recipientes
- **Evitar fallas mecánicas (rotura) las paredes de los contenedores.**
  - Control de espesores en paredes
  - Control de acción corrosiva sobre estructura
  - Protección contra impacto (golpes al contenedor)
  - Control de soldaduras
- **Retardar el proceso de nucleación espontánea.**





***“Si se conocen las técnicas y los mecanismos preventivos para evitar que un accidente suceda, los mismos no son adoptados y a causa de ello éste ocurre, no podemos hablar ya de accidente, sino de imprudencia humana”.***

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **1) MATERIAL TÉCNICO**

- Manual de seguridad IV – Escuela Superior de Bomberos (Villa María – Córdoba)
  - ***Tecnicatura Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo.***
- Nota Técnico Preventiva (NTP-293) - Año 1991.
  - ***Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo – España.***
- Nota Técnico Preventiva (NTP-294) – Año 1991.
  - ***Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo – España.***
- “Estallido de Depósitos (BLEVE)”
  - ***Grupo “GUIA” (Desarrolladores FIREX)***
- Manual de “Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales”
  - ***Descarga sin datos de autor – módulo explosiones.***
- Manual de Prevención y Respuesta a explosiones BLEVE
  - ***CIQUIME***
- Manual de Bomberos – Nivel 1.
  - ***Consejo Nacional de Bomberos de la Republica Argentina.***
- Guía CIQUIME (Guía para intervención en incidentes con materiales peligrosos)
  - ***Edición 2008***
- Boletín Informativo ABR-2003
  - ***Instituto de Seguridad y Educación Vial (ISEV)***
- Artículo 101- 01/01/2000. (Transporte terrestre de Mat Pel en el ámbito nacional)
  - ***Estrucplan On Line – [www.estrucplan.com.ar](http://www.estrucplan.com.ar)***
- Microsoft Encarta 2005 (Comportamiento de gases / Termodinámica)

### **2) ENTREVISTAS PROFESIONALES**

- Ing. Panelli Norma (Exxon Mobil - Directora de Salud, Seguridad y Medio Amb.)
- Víctor Casalotti (Instituto Argentino del Petróleo y Gas - IAPG)

