

## Resumen

La demanda de nuevos productos y la necesidad de reducir los costes de producción han conducido al desarrollo de nuevos procesos y tecnologías en la industria moderna. Estos cambios, pese al esfuerzo simultáneamente realizado para conseguir una mayor seguridad, han sido una de las razones por las que continúan ocurriendo accidentes graves, tanto en las instalaciones industriales como en el transporte de determinados productos.

Entre estos accidentes ocupan un lugar significativo las explosiones que liberan a la atmósfera gases licuados o líquidos sobrecalentados y presurizados. Estos accidentes pueden ocurrir por la pérdida de las propiedades mecánicas del material con el que está construido el recipiente, por un calentamiento excesivo del mismo, en algunos casos por la abertura de una válvula de alivio que puede conducir a una expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición, etc. Este tipo de explosiones reciben la denominación de BLEVE, acrónimo de “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”.

Si el gas es inflamable, la explosión puede resultar en la probable e inmediata formación de una bola de fuego, lo cual constituye uno de los riesgos térmicos más peligrosos debido a la alta radiación que puede emitir. Así, la explosión BLEVE va a menudo acompañada de la formación de una bola de fuego, por lo que, en conjunto, este tipo de accidente cuando involucra una sustancia inflamable presenta simultáneamente las características de explosión e incendio, con los efectos correspondientes.

Este proyecto tiene por objetivo el análisis de los efectos mecánicos de estos accidentes, es decir, la sobrepresión, mediante el estudio comparativo de los diversos modelos existentes propuestos por diferentes autores.

Finalmente, se ha desarrollado una herramienta de Microsoft Excel<sup>®</sup> para estimar dicho efecto. Para verificar la funcionalidad de la herramienta, se ha aplicado a dos casos reales de los que se ha encontrado suficiente información, comparando los resultados obtenidos con los datos reales.

# Sumario

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>SUMARIO</b>	<b>2</b>
<b>1. GLOSARIO</b>	<b>5</b>
<b>2. PREFACIO</b>	<b>9</b>
2.1. Objetivo del proyecto .....	9
2.2. Motivación.....	10
<b>3. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
3.1. Objetivo del proyecto .....	11
3.2. Alcance del proyecto.....	11
3.3. Ámbito de aplicación.....	11
<b>4. BLEVE: DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO</b>	<b>13</b>
4.1. Condiciones necesarias para la producción de éste fenómeno .....	14
4.1.1. Gas licuado o líquido sobrecalentado y a presión.....	14
4.1.2. Disminución súbita de la presión en el interior del recipiente .....	14
4.1.3. Nucleación espontánea .....	16
4.2. Aspectos termodinámicos.....	17
4.2.1. Consecuencias de una BLEVE .....	22
4.3. Efectos mecánicos.....	22
4.3.1. Estimación de la energía liberada en el estallido .....	23
4.3.2. Método de TNT equivalente.....	23
4.3.3. Fragmentos.....	23
4.4. Efectos térmicos .....	27
4.4.1. El diámetro de la bola de fuego.....	27
4.4.2. La altura de la dicha bola .....	27
4.4.3. La duración máxima del fenómeno .....	27
4.4.4. Radiación térmica recibida.....	27
<b>5. SELECCIÓN DE MODELOS</b>	<b>29</b>
5.1. Modelo de Prugh (1991) .....	29
5.2. Modelo de TNO (1997) .....	29
5.3. Modelo de Roberts (1999) .....	31
5.4. Modelo de Planas - Cuchi et al. (2004).....	31
5.5. Método de la “energía de sobrecalentamiento” (2006).....	32

5.5.1. Expansión Isoentrópica.....	34
5.5.2. Expansión Irreversible.....	34
5.6. Modelo de Birk et al. (2007) .....	34
5.7. Estimación de la sobrepresión .....	35
<b>6. PROGRAMA DE CÁLCULO .....</b>	<b>36</b>
6.1. Descripción del programa .....	36
6.2. Funcionamiento del programa y obtención de resultado .....	37
<b>7. APLICACIÓN .....</b>	<b>39</b>
7.1. Resolución de casos reales mediante el programa .....	39
7.1.1. Caso 1 .....	39
7.1.2. Caso 2 .....	43
<b>8. IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>47</b>
<b>9. PRESUPUESTO .....</b>	<b>48</b>
9.1. Coste de personal .....	48
9.2. Coste de material .....	49
9.3. Otros costes .....	49
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>51</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
Referencias bibliográficas.....	54
Bibliografía complementaria .....	55
<b>10. ANEXOS I .....</b>	<b>57</b>
10.1. Cálculos previos correspondientes a los modelos seleccionados .....	57
10.1.1. Modelo de Prugh.....	57
10.1.2. Modelo de Roberts.....	57
10.1.3. Modelo de planas-Cuchi .....	58
10.1.4. Modelo de Casal-Salla .....	59
<b>11. ANEXO II .....</b>	<b>60</b>
11.1. Hoja de cálculo “Explosión BLEVE” .....	60
11.1.1. Guía del usuario.....	60
11.1.2. Listado de Macro .....	61
<b>12. ANEXO III .....</b>	<b>70</b>
12.1. Tablas y programa auxiliar “Water97_v13.xla” .....	70

12.1.1. El modelo de TNO con $d < 2$ .....	71
12.1.2. Las propiedades termodinámicas del propano y metano.....	74
12.1.3. Water97_v13.xla.....	77

# 1. Glosario

## SIGLAS

BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

GLP: Gas Licuado del Petróleo

NFPA: National Fire Protection Association

TNO: Netherland Organisation for Applied Scientific Research

## NOMENCLATURA

A: constante en la ecuación de Antoine (-)

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

a: constante empírica o semiempírica para el modelo de Roberts, 5,80

$a_1/a_a$ : relación del calor específico del aire ambiental (-)

B: constante en la ecuación de Antoine (-)

b: constante empírica o semiempírica para el modelo de Roberts, 0,333

c: constante empírica o semiempírica para el modelo de Roberts, 0,450

$C_p$ : capacidad calorífica a presión constante ( $kJ/kg \cdot K$ )

$C_w$ : coeficiente aerodinámico del fragmento (-)

D: diámetro de la bola de fuego (m)

d: distancia de evaluación (m)

$d_i$ : distancia escalada a modelo i ( $m \cdot kg^{-1/3}$ )

$d_{SO}$ : radio del tanque (m)

E: energía de expansión (kJ)

$E_v$ : energía disponible para proyección de fragmentos (J)

e: constante empírica o semiempírica para el modelo de Roberts, 0,333

H: altura del centro de la bola de fuego (m)

$H_c$ : calor de combustión (kJ/kg)

$H_v$ : entalpía de vaporización (kJ/kg)

h: entalpía (kJ/kg)

$h_{g0}$ : entalpía del vapor a temperatura atmosférica (kJ/kg)

$h_{l0}$ : entalpía del líquido a temperatura atmosférica (kJ/kg)

I: intensidad térmica (-)

M: masa del recipiente en proyecciones de fragmentos; masa de la substancia implicada en la bola de fuego (kg)

$M_p$ : masa del fragmento (kg)

$m_{TNT_i}$ : masa de TNT equivalente a modelo i (kg)

$m_T$ : masa total en el tanque (kg)

$N_E$ : número de fragmentos

P: presión (Pa)

$P_0$ : presión relativa (-)

$P_o$ : presión justo después de la explosión (normalmente presión atmosférica) (MPa)

$P'_v$ : presión parcial del vapor en la atmósfera ( $N/m^2$ )

$\overline{P_{SO}}$ : pico de sobrepresión adimensional después de la explosión (igual a  $(P_{SO}/P_a) - 1$ )

$P_{SO}$ : pico de sobrepresión después de la explosión

$P_r$ : presión reducida (-)

$P_c$ : presión crítica (Pa)

$q_l$ : calor relacionado por el líquido (kJ/kg)

$q_v$ : energía de vaporización (kJ/kg)

s: entropía (kJ/kg)

SE: "energía de sobrecalentamiento" del líquido (kJ/kg)

T: temperatura absoluta (K)

t: tiempo de duración de la bola de fuego (s)

$t_r$ : temperatura reducida (-)

$T_c$ : temperatura crítica (K)

$\Delta U$ : variación de la energía interna en el tanque (kJ/kg)

$U_i$ : energía interna total antes de la explosión (MJ/kg)

$u_L$ : energía interna del líquido en el estado final de un proceso irreversible (MJ/kg)

$u_G$ : energía interna del vapor en el estado final de un proceso irreversible (MJ/kg)

$V_r$ : volumen reducido (-)

$V_r$ : volumen del recipiente esférico ( $m^3$ )

V: volumen ( $m^3$ )

$V_c$ : volumen crítico ( $m^3$ )

$V_i$ : volumen del tanque ( $m^3$ )

$V(r)$ : velocidad a la distancia r (m/s)

$V_p$ : velocidad media del fragmento (m/s)

$v_L$ : volumen específico del líquido en el estado final de un proceso irreversible ( $m^3/kg$ )

$v_G$ : volumen específico del vapor en el estado final de un proceso irreversible ( $m^3/kg$ )

$\Delta V$ : variación de volumen entre estado inicial hasta atmosférica ( $m^3$ )

W: trabajo de expansión (kJ/kg)

x: fracción del vapor en el estado final de un proceso irreversible (-)

## LETRAS GRIEGA

$\beta$ : cantidad de energía convertida en onda de sobrepresión (%)

$\mu_a$ : masa molecular del aire ambiental, 0,0290 kg/mol

$\mu_1$ : masa molecular del gas comprimido (kg/mol)

$\gamma$ : relación de calores específicos del vapor (-)

$\gamma_a/\gamma_1$ : relación de calores específicos (-)

$\rho$ : densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

## SUBÍNDICES

a: atmosférica

1: antes de explosión

2: después de la explosión

b: ebullición

l: líquido

Rupt: rotura

Total: masa total del depósito

v: vapor

## 2. Prefacio

### 2.1. Objetivo del proyecto

El término BLEVE fue utilizado por primera vez en el año 1957 por los ingenieros norteamericanos James B. Smith, Williams S. Marsh y Wilbur L. Walls, para describir el daño producido por la explosión de un reactor en una planta química debido a la sobrepresión. El mismo acrónimo fue utilizado más tarde, por la NFPA en 1986 y por otros autores tales como, Kletz en 1977, Lees en 1980, Prugh en 1991 o McDevitt en 1992.

La palabra BLEVE, acrónimo inglés que corresponde a Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, hace referencia a la rotura catastrófica de un recipiente que contiene un líquido a una temperatura por encima de su punto de ebullición a la presión atmosférica; la sustancia contenida en el recipiente puede ser inflamable o no inflamable, produciéndose la fuga instantánea y masiva de dicho líquido a la atmósfera. El descenso prácticamente instantáneo de la presión a que se ve sometido el producto fugado en el momento de la rotura, provoca una evaporación súbita o flash explosivo de una parte del líquido, que forma una nube de vapor y pequeñas gotas en suspensión.

Cuando se produce la rotura del recipiente, el líquido de su interior entra en ebullición instantáneamente debido a que su temperatura es muy superior a la temperatura de ebullición de la sustancia a presión atmosférica. El cambio de fase masivo a vapor, hace que la presión ejercida sobre el recipiente sea superior a la resistencia mecánica del mismo. Se genera por tanto una onda de presión acompañada de la proyección de proyectiles (fragmentos) del propio depósito y piezas menores unidas a él, que pueden alcanzar distancias considerables. Además, si el producto es inflamable y encuentra un punto de ignición, puede producirse la combustión de la nube bifásica formada, dando lugar a otro fenómeno que se denomina bola de fuego.

Uno de los principales problemas causados por una explosión del tipo BLEVE es el efecto dominó que puede provocar. Durante años se han realizado estudios para determinar su mecanismo, sus efectos (esencialmente la sobrepresión) y la formación de proyectiles. Pese a estos esfuerzos, la modelización de este accidente no está todavía bien resuelta; además, algunos de los modelos propuestos por diversos autores son complejos y difíciles de aplicar y normalmente utilizan métodos indirectos para la determinación y cuantificación de los efectos.

Por este motivo, en este proyecto se ha planteado la necesidad de valorar comparativamente los diferentes modelos matemáticos, para ver hasta qué punto son

precisos y fiables. Para ello se ha utilizado la información procedente de dos explosiones a escala real.

Debido a esto, se plantea la necesidad de proponer una herramienta de cálculo con el fin de obtener los resultados de forma rápida y lo más adecuada posible.

## 2.2. Motivación

Los principales motivos por los cuales se ha decidido realizar este proyecto son los siguientes:

- La problemática real que existe respecto a la información obtenida a la hora de estimar la sobrepresión en función de la distancia, en el caso de que se produzca una explosión.
- Como persona activa laboralmente, trabajando en el sector de oleoquímica manufacturera desde hace un tiempo, y en cuya empresa disponen de diferentes instalaciones industriales (rectores químicos, autoclaves de desdoblamiento, calderas aquatubulares, etc), este proyecto ha representado la oportunidad de obtener una formación e información muy interesantes desde el punto de vista de la seguridad industrial. Finalmente, cabe citar el carácter multidisciplinar del proyecto, que me ha permitido aplicar muchos de los conocimientos que he adquirido a lo largo de la carrera. Entre los diversos aspectos tratados puedo destacar los relacionados con la tecnología del medio ambiente, fenómenos de transporte, circulación de fluidos, transferencia de calor, informática aplicada y programación.
- Finalmente, el tema tratado es de gran vigencia e importancia en el campo de la seguridad y el análisis de riesgos, tanto en lo que atañe a instalaciones fijas como al transporte de determinados productos por carretera o ferrocarril. Desgraciadamente, continúan ocurriendo explosiones BLEVE, algunas con graves consecuencias para la población (como ejemplo, puede citarse el accidente ocurrido en Lac Megantic, Canadá, con 32 muertos (2013)).

### 3. Introducción

En este apartado se presenta el principal objetivo de este proyecto, dada la gran variedad de temas relacionados con las explosiones BLEVE. Asimismo, se define también cuál es el alcance del mismo.

#### 3.1. Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es definir una metodología de trabajo sencilla y fiable para la modelización del fenómeno BLEVE. Por lo tanto, hace falta seleccionar los modelos matemáticos que mejor representen los efectos causados y que permita predecir cuáles serán sus consecuencias. Una vez elegidos, se implantará una herramienta informática que facilite su utilización posterior.

#### 3.2. Alcance del proyecto

El propósito de este proyecto se centra en la elección de un modelo matemático que describa de forma óptima el fenómeno BLEVE desde el punto de vista de su efecto mecánico (sobrepresión). : No se analizan los elementos de seguridad pasivos ni activos de la instalación en cuestión ni los materiales de que está construida la misma. Además, al tratarse de un trabajo con un enfoque teórico no se contemplarán las siguientes restricciones:

- Internas
  - Económicas: vendrán impuestas por el usuario a quien va dirigido.
  - Energéticas: deberá contratarse la potencia necesaria para la utilización de los equipos periféricos del tanque.
- Externas
  - Legales: la evaluación de seguridad en las plantas industriales en muchos ámbitos está sujeta a directivas y normativas específicas (Directriz SEVESO).

#### 3.3. Ámbito de aplicación

En este proyecto se ha concebido una herramienta informática para facilitar el cálculo de la onda de sobrepresión. Su ámbito de aplicación es muy amplio, debido a la gran demanda energética que existe actualmente en la industria , así como su posible utilidad en el ámbito doméstico. También es aplicable en el transporte de mercancías inflamables (camiones o

vagones cisterna). Finalmente, permite obtener parte de la información necesaria (distancias de afectación, intensidad de los efectos físicos) para realizar un plan de emergencia en caso de un posible accidente.

## 4. BLEVE: descripción del fenómeno

Una BLEVE es un tipo de explosión mecánica; la traducción de este acrónimo sería “Expansión explosiva del vapor en expansión de un líquido en ebullición”.

La BLEVE es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión, en el que se produce una evaporación súbita a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado sobrecalentado a presión.

La explosión BLEVE es puramente física y no es necesario que haya una reacción química ni fenómeno de combustión. Puede ocurrir incluso en los calentadores de agua y en las calderas de vapor. En principio, podría originarse en cualquier líquido almacenado en un recipiente hermético. El origen más frecuente de una explosión BLEVE es el calentamiento externo, posiblemente debido a un incendio, que incide sobre la superficie del recipiente a presión, especialmente cuando el contacto con las llamas se produce por encima del nivel del líquido. De esta manera, se debilitan las propiedades mecánicas del material, pudiéndose producir la rotura repentina del mismo. Esto da lugar a un escape súbito del contenido, que obliga a pasar una parte muy importante del líquido a vapor; adicionalmente, si la sustancia involucrada en este fenómeno es inflamable, es probable que se produzca la conocida bola de fuego. Esta última se forma por ignición de la masa de producto bifásico (vapor + gotas) liberada. Debido a esta circunstancia, éste es el escenario más común al hablar de una BLEVE y de sus consecuencias, pero debe quedar muy claro que la bola de fuego sólo ocurre cuando el líquido contenido es inflamable. Asimismo, es importante resaltar el hecho de que una BLEVE es una explosión mecánica, pudiendo ocurrir sin que sea seguida por un fenómeno de tipo térmico (este sería el caso de la explosión de una caldera de vapor o de un calentador de agua).

La característica fundamental de una BLEVE es la expansión explosiva del vapor procedente de toda la masa de líquido evaporada de forma súbita, aumentando su volumen de forma extraordinaria (más de 200 veces en el caso del GLP, hasta 1500 veces en el caso del agua). La gran energía liberada en esa explosión se invierte en generar una fuerte onda de sobrepresión y en proyectar fragmentos del recipiente, de distintos tamaños, a considerables distancias. Estos fragmentos proyectados pueden arrastrar tras de sí una cierta cantidad de líquido en forma de estela, que posteriormente puede ser inflamada.

En caso de que el líquido contenido sea inflamable, al producirse el estallido del recipiente toda la masa evaporada es proyectada al exterior, arrastrando así pequeñas gotas de líquido. Esta mezcla bifásica sólo puede quemar por su periferia (ya que en el interior no hay aire, es decir, falta el comburente). El calentamiento consiguiente reduce su densidad y la esfera de fuego se eleva, dejando tras de sí una estela; en conjunto, el fenómeno es

parecido al típico “hongo” de una explosión atómica, evidentemente a una escala mucho más reducida. Dicha bola de fuego se irá expandiendo a medida que va ardiendo la totalidad de la masa evaporada, hasta consumirse totalmente.

## **4.1. Condiciones necesarias para la producción de éste fenómeno**

Para que se produzca una explosión BLEVE se deben dar tres condiciones que son independientes entre sí:

### **4.1.1. Gas licuado o líquido sobrecalentado y a presión**

Los gases licuados a presión se encuentran a una temperatura bastante superior a la que se encontrarían si estuviesen hirviendo a presión atmosférica. En el caso de los líquidos que se encuentran a una temperatura superior a su temperatura de ebullición a presión atmosférica, cuando parte de la superficie del recipiente entre en contacto con una fuente de calor, éste experimentará un aumento de temperatura y, en consecuencia, de presión. Esta situación es relativamente frecuente en ciertos incendios en plantas de proceso o de almacenamiento, en los que la radiación o el contacto directo con las llamas afecta a determinado equipo..

Por tales motivos, existen dos grandes categorías de productos que pueden provocar BLEVEs:

- Los gases licuados almacenados bajo presión a temperatura ambiente.
- Los líquidos almacenados en un depósito que accidentalmente entren en contacto con una fuente de calor.

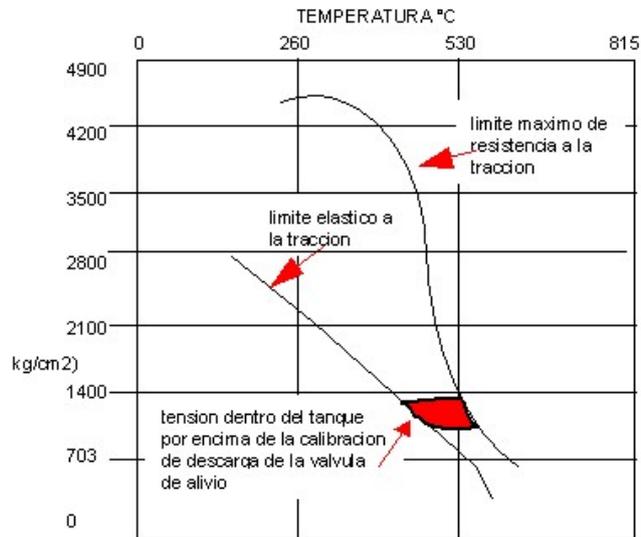
Conforme a las condiciones previamente expuestas que han de darse para que exista una BLEVE, la primera condición, esencial pero no suficiente, es el sobrecalentamiento de los gases licuados o los líquidos.

### **4.1.2. Disminución súbita de la presión en el interior del recipiente**

Otra condición necesaria es el descenso brusco, prácticamente instantáneo, de presión en el interior del recipiente. Esta segunda condición puede ser causada por la aparición de una fisura o grieta producida por causas mecánicas tales como impactos, choques o vuelcos de las cisternas bajo presión en su transporte.

También debe mencionarse que es posible que ocurra una BLEVE únicamente por causas térmicas: el material con el que está construido el recipiente tiene determinadas características mecánicas, que normalmente decrecen a medida que aumenta la

temperatura de exposición. Por ejemplo, el acero al carbono disminuye sus propiedades elásticas con el aumento de la temperatura, pudiéndose alcanzar valores de la misma a los que ya no puede aguantar la presión creada en el interior del recipiente



**Figura. 4.1** Comportamiento de un recipiente de acero al carbono en función de la temperatura [20].

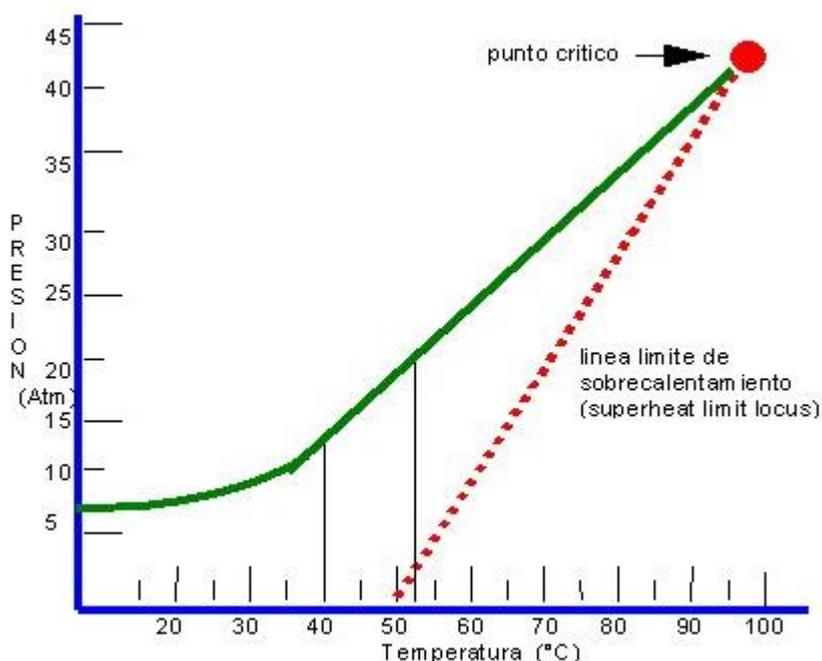
Por tanto, cuando el recipiente entra en contacto con las llamas de un incendio y recibe calor, sufre dos fenómenos peligrosos: en primer lugar, se debilita la resistencia mecánica del material; simultáneamente, aumenta la presión interna del líquido/vapor (Figura 4.1).

Si, como es de esperar, entra en servicio una seguridad pasiva existente en la instalación, es decir, un dispositivo de alivio (válvula de seguridad) en caso de que haya una sobrepresión en el tanque, se liberará material y se controlará el exceso de presión. Según algunos autores, en determinadas circunstancias esto puede también dar lugar a una BLEVE, aunque este aspecto no ha sido confirmado.

Las válvulas de seguridad tienen como función aliviar el exceso de presión en el interior del tanque en caso de que ésta sea superior a aquella a la que está tarada la válvula. Esto ha de permitir que el tanque expuesto al fuego descargue parte del producto en estado de ebullición, evitando así un posterior aumento de la presión. Sin embargo, estos dispositivos no evitan necesariamente la producción de una BLEVE debido a la ya citada pérdida de propiedades mecánicas del material de que está construido el recipiente; en función de las circunstancias, es muy posible que simplemente retrasen el momento de la explosión; esto puede ser, de por sí, importante desde el punto de vista de gestión de la emergencia (por ejemplo, permitiendo un mayor tiempo para la evacuación).

A pesar de que no se cuenta con información puntual que documente que alguna BLEVE se produjo a causa de la actuación de las válvulas de seguridad, es importante describir dos posibilidades que según algún autor podrían provocar la explosión:

1. La válvula de seguridad está calibrada a una presión por encima de la línea de sobrecalentamiento, dando lugar a la denominada “nucleación espontánea” (Figura 4.2 esta posibilidad se basa en una teoría actualmente abandonada por la mayoría de autores).
2. La válvula de seguridad evacua un gran caudal en caso de actuación, provocando una importante y rápida caída de presión. Sin embargo, este tipo de suceso ocurrirá más bien en el caso de un disco de rotura y no en una válvula de alivio, ya que a medida que desciende la presión dicha válvula se irá cerrando a la calibración que estaba tarada, mientras que la rotura del disco es completamente irreversible



**Figura. 4. 2** Línea de sobrecalentamiento y curva de presión de vapor para el propano [Reid, 1973].

#### 4.1.3. Nucleación espontánea

Es importante mencionar la teoría desarrollada por REID (1973) sobre la “Nucleación espontánea”, que constituye una interesante aproximación al problema de dar una explicación a la extraordinaria violencia de algunas explosiones BLEVE.

Según esta teoría, la existencia de nucleación instantánea es una condición específica para que ocurra una BLEVE: una evaporación en masa tipo flash, que ocurriría en milésimas de segundo, con un extraordinario incremento del volumen.

Conforme a las investigaciones de este y otros autores, se puede explicar el mecanismo de estas explosiones partiendo del hecho de que inicialmente el producto sufre una intensa despresurización. Para facilitar la comprensión de este fenómeno, puede utilizarse un ejemplo práctico:

Si se tiene un gas licuado o un líquido sobrecalentado confinado en un depósito, en su interior existe condición de equilibrio líquido – vapor. Supóngase que por cualquier motivo o causa mecánica se ve afectada la superficie de la chapa del depósito, formándose una grieta, fisura, agujero, etc. En consecuencia, se producirá una caída de presión y el líquido entrará en ebullición al pasar en un tiempo extremadamente corto de una presión dada a otra inferior que normalmente será la atmosférica.

Existirá por tanto un gas licuado o un líquido a una temperatura por encima de aquella a la que teóricamente estaría en equilibrio a la presión atmosférica; esto dará lugar a un estado de desequilibrio, que provocará una ebullición violenta del líquido; la sobrepresión resultante acabará de colapsar la fisura o la grieta del depósito.

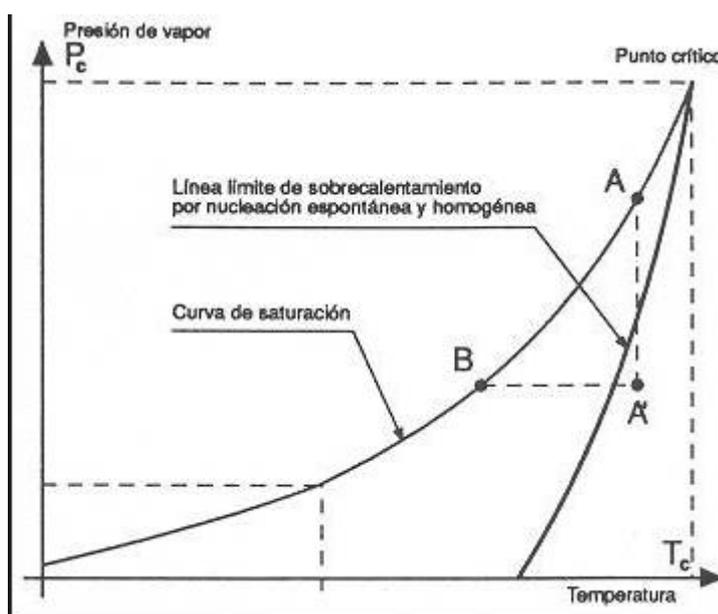
Según la teoría desarrollada por REID (1973) y de acuerdo con el comportamiento de los gases reales, debería alcanzarse una temperatura determinada en función del tipo de producto para que se produzca la nucleación espontánea; si la explosión se produce antes de alcanzar esta “temperatura límite de sobrecalentamiento”, no se trataría de una BLEVE. Dicha temperatura marcaría por tanto un límite a partir del cual la explosión pasaría a ser mucho más severa.

Sin embargo, esta teoría ha sido abandonada hoy en día por la mayoría de autores que investigan este fenómeno.

## 4.2. Aspectos termodinámicos

Como se ha comentado anteriormente, cualquier gas licuado o líquido almacenado en el interior de un recipiente se encuentran en estado de equilibrio según su curva de saturación de presión vs. temperatura (Figura 4.3). A cada temperatura del líquido le corresponde una determinada presión de vapor, que es la presión que soporta la pared en el interior del recipiente (en la realidad, la posible estratificación de temperaturas en el seno del líquido puede cambiar algo esta situación)..

Cada vez que aumenta la temperatura, por consiguiente también aumenta la presión de equilibrio, hasta alcanzar el punto crítico a partir del cual sólo es posible tener la fase gaseosa. Por este motivo, se define la temperatura crítica como aquella temperatura máxima a la que se puede licuar un gas y la presión crítica es la presión de vapor máxima que puede tener un líquido.



**Figura. 4.3** Curva de saturación P – T y línea límite de sobrecalentamiento según la teoría de Reid [21].

El sobrecalentamiento de una sustancia se puede lograr mediante calentamiento, superando su punto de ebullición sin pasar a estado gaseoso, o bien disminuyendo la presión permaneciendo la temperatura constante. Puede apreciarse en la Figura 4.3: desde el punto B para alcanzar un estado de sobrecalentamiento A' aumentado la temperatura a presión constante, o desde el punto A por una expansión isoentrópica hasta nuevamente el punto A'. Cabe mencionar que el estado correspondiente al punto A' es una posición inestable que tenderá a buscar su estado natural de equilibrio sobre la curva de saturación. En esta zona de inestabilidad se favorece la nucleación espontánea como paso previo de la vaporización masiva y por lo tanto, según la teoría desarrollada por Reid, esta sería la condición óptima para la ocurrencia de una explosión BLEVE.

Tal como se había comentado anteriormente, la BLEVE es provocada por un descenso brusco de la presión a temperatura constante por causas ya expuestas.

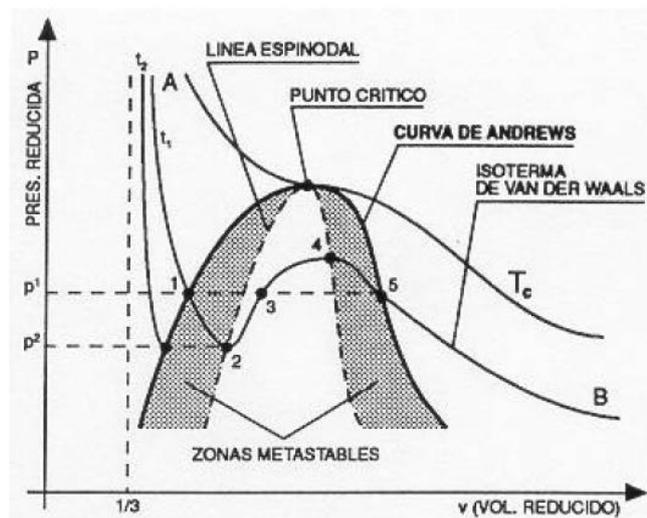
Para poder comprender mejor la situación de inestabilidad es necesario analizarla mediante la ecuación de Van der Waals:

$$\left(p_r + \frac{3}{v_r^2}\right) \cdot (3v_r^2 - 1) = 8t_r \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{donde: } p_r = \frac{P}{P_c}; v_r = \frac{V}{V_c}; t_r = \frac{T}{T_c}$$

Representando la ecuación de Van der Waals para los gases licuados mediante la relación para cada isoterma existente entre la presión y el volumen, pueden obtenerse dos posibles estados de inestabilidad (estados metaestables), el de líquido sobrecalentado y el de vapor subenfriado, que corresponden respectivamente a las zonas representadas de la isoterma 1-2 y 4-5 de la Figura 4.4. En los puntos límites de inestabilidad 2-4, donde se encuentran un mínimo y un máximo de la ecuación de estado, la pendiente de la tangente a la curva es cero.

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



**Figura. 4.4** Diagrama P-T-V para gases licuables [21].

La línea que une las zonas de inestabilidad que corresponden al líquido sobrecalentado y vapor subenfriado se suele denominar línea “espinodal”.

Las zonas de metaestabilidad quedan delimitadas entre la curva espinodal y la curva binodal o de Andrew, la cual separa el área en la que existen dos fases, vapor y líquido, de las áreas en la que solamente puede existir una sola fase.

El punto crítico corresponde a la tangente común entre la línea binodal, espinodal y la curva de presión de vapor.

Cabe reseñar que respecto a la BLEVE que nos ocupa, no toda la zona de metaestabilidad de líquidos sobrecalentado representa un riesgo, ya que se concreta al alcanzar los mínimos de la curva de Van der Waals en los que irremisiblemente el líquido sobrecalentado se vaporiza súbitamente y en consecuencia sufre una nucleación homogénea.

Para establecer el límite de sobrecalentamiento en el que se produciría la nucleación espontánea y consecuentemente la BLEVE según la teoría de Reid, deben determinarse los diferentes puntos de la curva espinodal que permitan representarla. Dado que la tangente a la curva en el punto crítico estará siempre en la parte izquierda de la gráfica, suele admitirse en la aplicación de la citada teoría que dicha tangente constituye el límite de seguridad con un margen suficientemente amplio.

Se ha comprobado que la diferencia entre el límite real de sobrecalentamiento que podría provocar la BLEVE y el límite establecido por la tangente a la curva de saturación en el punto crítico y a presión atmosférica, difieren entre 20 y 35 °C.

La relación entre la presión de vapor y la temperatura es la establecida por la ecuación de Antoine, que es una aproximación de la de Clausius Clapeyron:

$$\ln P = -\frac{A}{T} + B \quad (\text{Ec. 2})$$

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

$$\frac{dP}{dT} = A \frac{P}{T^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Aplicando esta expresión al punto crítico se obtiene:

$$\frac{P_c}{T_c} = A \frac{P_c}{T_c^2} = tg\alpha \quad (\text{Ec. 4})$$

Esta expresión da, por tanto, la pendiente de la línea tangente a la curva de saturación en el punto crítico; así pues, la ecuación de la recta será:

$$P = tg \alpha \cdot T + b \quad (\text{Ec. 5})$$

Para facilitar la comprensión de esta expresión, se calcula a continuación el valor límite de sobrecalentamiento para el butano. Los datos de equilibrio correspondientes al punto crítico y la presión atmosférica son:

$P_c$	38,7 atm	$T_c$	425,8 K
$P$	1 atm	$T$	272,5 K

**Tabla 4.1** Datos de equilibrio del propano [11].

Introduciendo estos datos en la ecuación de Antoine (ecuación 2), se hallan los valores de las constantes A y B para el hidrógeno (para la presión expresada en atm y la temperatura en K):

$$A = 2769 \qquad B = 10,16$$

Para obtener la tangente a la curva de saturación en el punto crítico se puede utilizar la ecuación (4):

$$\operatorname{tg} \alpha = 38,7 \cdot \left( \frac{2769}{425,8^2} \right) = 0,591$$

Y el valor de la ordenada en el origen, b, se obtiene introduciendo los valores correspondientes al punto crítico en la ecuación de la recta (Ec. 5)

$$P_c = \operatorname{tg} \alpha \cdot T_c + b$$

$$b = -213$$

De este modo, se obtiene el otro punto clave a la presión absoluta de cero atmósferas, es el punto de intersección con el eje de abscisas:

$$P_0 = -52 \text{ atm}$$

$$T_0 = 89 \text{ }^\circ\text{C}$$

Consecuentemente, los límites prácticos de riesgo estarían comprendidos entre una temperatura de 362,15 K y 425,8 K (Figura 5), lo que correspondería a las presiones de vapor comprendidas entre 12 atm y 38,7 atm.

Hay que comentar sin embargo que, si bien esta teoría desarrollada por Reid ha contribuido a entender el fenómeno de las explosiones BLEVE asociadas a una rapidísima vaporización del líquido sobrecalentado, hoy en día no se utiliza en absoluto en la estimación de la sobrepresión generada por estas explosiones.

#### **4.2.1. Consecuencias de una BLEVE**

Como se ha comentado anteriormente, aunque la BLEVE estrictamente hablando es una explosión mecánica de un recipiente presurizado, debido a la gran cantidad de accidentes ocurridos involucrando sustancias inflamables, suele asociarse a incendios (bola de fuego). En el presente trabajo el análisis se centra esencialmente en los efectos de tipo mecánico, si bien se hace también referencia explícita a los efectos térmicos.

Para la cuantificación de este tipo de consecuencias se han desarrollado diferentes modelos, empíricos unos y basados en un tratamiento teórico otros, propuestos por diversos investigadores en base a los accidentes ocurridos.

Dada la diversidad de modelos matemáticos existentes y su complejidad de aplicación en algunos casos, en este trabajo se han seleccionado básicamente los modelos propuestos por diversos autores para la estimación de los efectos mecánicos, es decir, sobrepresión por onda expansiva y proyección de fragmentos metálicos del recipiente, mencionándose asimismo uno de los modelos propuestos para el fenómeno de la bola de fuego.

### **4.3. Efectos mecánicos**

La energía generada en una explosión BLEVE se puede considerar que se invierte en cuatro apartados:

- La energía necesaria para romper el depósito.
- La energía de la onda de presión.
- La energía cinética de los fragmentos.
- El calentamiento del entorno.

La distribución relativa de la energía variará en función de las condiciones particulares de la explosión. Por este motivo, es muy difícil cuantificar con exactitud la cantidad de energía que se convierte en onda de presión.

Se han realizado varios estudios por diversos investigadores, habiéndose sugerido que si la explosión es por una rotura frágil del recipiente (cosa poco probable, dado el material de que están contruidos los recipientes y las condiciones en las que suele ocurrir la explosión), el 80% de la energía liberada se convierte en onda de presión; en cambio, si la rotura es dúctil (caso más corriente), en este caso se proyectan grandes secciones del recipiente y aproximadamente el 50% de la energía liberada se convierte en onda de presión.

La mayoría de los depósitos están contruidos con materiales dúctiles en condiciones normales de trabajo; una rotura frágil es muy poco probable, ya que para la mayoría de los materiales utilizados requeriría un enfriamiento totalmente anómalo. Por este motivo, una explosión BLEVE está casi siempre asociada a una rotura dúctil.

#### **4.3.1. Estimación de la energía liberada en el estallido**

La energía liberada en el estallido va asociada al incremento de volumen que experimenta el contenido del depósito. Se han propuesto para ello diversos modelos, que se presentan en las próximas secciones.

#### **4.3.2. Método de TNT equivalente**

Se puede determinar la onda de sobrepresión a través de la que generaría una masa de TNT equivalente, pero esto causa una imprecisión en el caso de una BLEVE. La velocidad generada en una BLEVE es menor que en una explosión de TNT, debido a que el volumen que ocupa el recipiente es mucho mayor que el que ocupa un explosivo convencional. Por este motivo, se debe realizar una corrección en la distancia desde el centro de la explosión hasta el lugar donde se quiere saber la sobrepresión.

Esta corrección se lleva a cabo mediante la utilización de la distancia normalizada o escalada,  $d_n$ , propuesta por Hopkinson en el año 1915 [1], en función de la distancia física y la masa de TNT:

$$d_n = \frac{d}{(m_{TNT})^{1/3}} \quad (\text{Ec. 8})$$

#### **4.3.3. Fragmentos**

Los fragmentos proyectados por una BLEVE tienen mayor alcance que el de la onda de sobrepresión y que el de los efectos térmicos de la bola de fuego, si bien sus efectos son lineales y no de zona. Hay que tener en cuenta que en su trayectoria pueden provocar por efecto dominó la destrucción de otros recipientes e instalaciones. Sin embargo, la formación, trayectoria y alcance de los proyectiles aún no está resuelta del todo y normalmente se

utilizan métodos de estimación indirectos y aproximados para su cuantificación y determinación.

La onda de presión generada por la explosión provoca la destrucción del depósito en varios fragmentos, siendo esto función de las propiedades mecánicas del depósito y de la forma cómo el mismo ha experimentado el calentamiento (posible afectación a cordones de soldadura, por ejemplo). En el caso de una rotura dúctil (caso general), suele considerarse que aproximadamente el 50% de la energía liberada se transforma en onda de sobrepresión y el 50% restante aproximadamente se invierte en la rotura del tanque y en la proyección de los fragmentos, que serán desplazados a una determinada distancia.

Por lo tanto, se puede determinar la cantidad de energía generada en la explosión, suponiendo una expansión isoentrópica y considerando que el gas es ideal, mediante la ecuación siguiente [19]:

$$E_v = 10^2 \cdot \left( \frac{P \cdot V}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Para un determinado fragmento se tendrá, por lo tanto una velocidad media de:

$$v_p = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 2 \cdot E_v}{M}} \quad (\text{Ec. 10})$$

La velocidad en función de la distancia se determina por:

$$v(d) = v_p \cdot \exp\left(\frac{-C_w \cdot A_f \cdot \rho \cdot d}{M_p}\right) \quad (\text{Ec. 11})$$

La distancia máxima de alcance del fragmento puede estimarse de forma aproximada mediante la siguiente expresión:

$$d_{m+1} = \frac{h \cdot v(d_m)}{g \cdot t} \quad (\text{Ec. 12})$$

El número de fragmentos formados en el caso de un recipiente cilíndrico suele ser de 2 o 3. Si se producen 2, éstos corresponden al fondo del depósito y el resto del recipiente. Aun sí, existen estudios para predecir la trayectoria de los proyectiles en caso de una explosión BLEVE, basados en la observación de múltiples accidentes reales. En la Figura 5 se puede apreciar la comparación del patrón de fragmentación de un recipiente cilíndrico y la fragmentación esperada según lo propuesto por diversos autores. En la Figura 6 se han presentado las ecuaciones usadas para la estimación probabilística en función de cada fragmento.

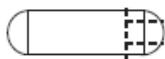
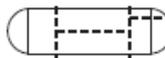
ID	Fragmentation pattern	Description	$P_{fp}$	Expected fragment shape
CV2		The fracture, likely to start in the axial direction, may turn in the circumferential direction due to stress field changes (bending or stress intensification near connections), or to defects. If the axial crack propagates on the tube-end and stops, a flattened tube-end may be generated.	0.67	Configuration A ( $P_{fs} = 0.28$ ): 2 tube-ends (PTE2) or Configuration B ( $P_{fs} = 0.72$ ): 1 tube-end (PTE2), 1 flattened plate (PL)
CV3		Similar to CV2. Credible if the fracture starts on a pipe connection or if one of the two tube ends impacts on a near object at the moment of the projection.	0.08	1 tube-end (PTE2), 2 parts of tube-end (PTE2 & PTE1)
CV4		Similar to CV2. Credible if the fracture starts on a pipe connection or if one of the two tube ends impact on a near object at the moment of the projection. The axial fractures on the tube-end could arrest originating flattened tube-ends.	0.13	1 tube-end (PTE2), 2 parts of tube-end (PTE1) 1 plate (PL)
CV7		An axial crack may propagate in circumferential direction in zones where a stress concentration (thickness change, supports, pipe connections), defects or weldings are present. It is highly probable that the circumferential cracks are located at the ends. The shell fragment is generally flattened.	0.08	2 tube-ends (PTE2), 1 flattened shell (PL)
CV11		Similar to CV7. The axial fracture on the tube-end may arrest originating a flattened tube-end.	0.04	1 tube-end (PTE2), 2 parts of tube-end (PTE2 & PTE1) 1 flattened shell (PL)
Case-study		The bottom of the 27V-16 tank was cut off just above the welding stringcourse. The cylindrical shell (item 1) was opened along the full length of the generatrix of the cylinder. The upper cover was cut in two halves (item 4 and 3) along the welding stringcourse. The manhole was cut in two halves (main one item 19). (Adapted from: Piccinini and Demichela (2006))	—	1 tube-end (PTE2), 2 parts of tube-end (PTE2 & PTE1) 1 flattened shell (PL) 1 manhole cover (PL)

Figura. 4.5 Comparación del patrón de fragmentación de un recipiente 27V-16 [18].

Equation	Purpose	ID
$P_{imp,F} = P_{gen,F} \cdot P_{trj,F}$	Evaluation of the probability of a target to be impacted by fragment F	A
$P_{gen,F} = P_{cp} \cdot P_{fp,F} \cdot P_{fs,F}$	Probability of fragment F to be generated: combination of the probability of propagation of the initial crack, probability of occurrence of a fragmentation pattern relevant for F and probability of the fragment shape F	B
$\frac{d^2x}{dt^2} + k\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = 0$	Equation describing the trajectory of the fragment on the horizontal coordinate of the flight plane	C
$\frac{d^2y}{dt^2} + (-1)^n k\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + g = 0$	Equation describing the trajectory of the fragment on the vertical coordinate of the flight plane	D
$\varphi(\theta, \varphi) \cdot d\theta \cdot d\varphi = \frac{\cos\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi}{4\pi}$	Probability distribution for the initial direction of fragment projection: the equation assumes a uniform probability distribution	E
$P_{trj,F} = \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\varphi} \varphi(\theta, \varphi) \cdot d\theta \cdot d\varphi$	Probability that the trajectory of fragment F impacts the target of concern. $\Delta\theta$ and $\Delta\varphi$ are the range of fragment initial directions that satisfy the impact condition according to the solution of Eq. C and D	F
$P_{imp} \cong \sum_F P_{imp,F}$	Calculation of the overall probability of a target to be impacted by a fragment	G
$f_{imp} = f_p \cdot P_{imp}$	Calculation of the frequency of impact by a fragment on a target	H

Figura. 4.6 Cuadro de ecuaciones usadas para la estimación probabilística [18].

En el caso de recipientes esféricos, la cantidad de fragmentos es mucho más difícil de determinar. Un estudio basado en un número relativamente pequeño de casos reales ha llegado a la conclusión de que se podría determinar dicho número de fragmentos mediante la expresión siguiente:

$$N_E = -3,77 + 0,0096 \cdot V_r \quad (\text{Ec. 13})$$

Aunque esta expresión es la única que ha sido propuesta hasta ahora, es muy poco precisa y debe utilizarse con cierta precaución.

## 4.4. Efectos térmicos

El impacto más importante en el caso de una BLEVE involucrando a una sustancia inflamable es el debido a la radiación térmica desprendida si se produce (como es previsible) una bola de fuego. La elevada energía térmica liberada en un corto tiempo suele imposibilitar la huida de las personas que se encuentran a su alrededor. Esta radiación crece de forma exponencial desde su inicio y se suma a los daños causados por la explosión mecánica que proviene del estallido del propio recipiente.

Previamente a los cálculos de la dosis de radiación térmica originada por una bola de fuego, a la que van a estar expuestas personas e instalaciones en caso de que ocurra este tipo de accidente, es preciso conocer las siguientes características correspondientes a la combustión de la masa vaporizada, utilizando así los datos correlativos a, b, c y e propuestos por el modelo de Roberts [1]:

### 4.4.1. El diámetro de la bola de fuego

$$D = a \cdot M^b \quad (\text{Ec. 14})$$

### 4.4.2. La altura de la dicha bola

$$H = 0,75 D \quad (\text{Ec. 15})$$

### 4.4.3. La duración máxima del fenómeno

$$t = c \cdot M^e \quad (\text{Ec. 16})$$

### 4.4.4. Radiación térmica recibida

Finalmente, para determinar la radiación térmica recibida por una superficie determinada es aconsejable utilizar el modelo del cuerpo sólido [1]. Es necesario conocer previamente otros parámetros que intervienen en dicho modelo: el valor de la potencia emisiva ( $E_p$ ), el del factor de vista (F) y el de la transmisividad atmosférica ( $\tau$ ), así como la distancia existente entre la superficie de la llama y el objetivo:

$$I = \tau \cdot F \cdot E_p \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\tau = 2,02(P'_v \cdot r)^{-0,09} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$E_p = \frac{\eta M H_c}{\pi D^2 t} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$F = \frac{D^2}{4r^2} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$\eta = 0,27P_0^{0,23} \quad (\text{Ec. 21})$$

Para la ecuación (21), varios autores proporcionan una serie de correlaciones para el valor de  $\eta$ , que suele estar comprendido entre 0,25 y 0,40. Este coeficiente indica la fracción de energía total desprendida en la combustión que es irradiada, ya que esta energía se ve reducida por las pérdidas de convección, fundamentalmente asociadas a la generación de humo y gases calientes.

Una vez calculados todos los parámetros necesarios para establecer la irradiación térmica, hay que proceder a calcular la dosis de radiación para las personas expuestas. En este caso se utilizará el método propuesto por Eisenberg et al. [1], basado en la utilización de la denominada función Probit:

$$Dosis = t \cdot I^{4/3} \quad (\text{Ec. 22})$$

El valor exponencial que afecta a  $I$ , representa un coeficiente de mayoración de la dosis, a efectos de seguridad. Debe tenerse en cuenta que, según la Directriz Básica para la elaboración de un plan de autoprotección del sector químico [12], los valores umbrales son:

1. El límite de la zona de intervención, en la cual la dosis máxima de exposición es de  $5 \text{ kW/m}^2$ , con un tiempo de exposición de 3 minutos.
2. El límite de la zona de alerta, en la cual la dosis máxima de exposición es de  $3 \text{ kW/m}^2$  y con un tiempo de exposición prácticamente indeterminado, ya que los daños solo serían perceptibles por los grupos de población críticos.

## 5. Selección de modelos

En esta sección se describen de forma resumida los modelos matemáticos más significativos para realizar el estudio comparativo de los mismos.

### 5.1. Modelo de Prugh (1991)

Para estimar la onda de presión mediante el método de Prugh [10], es necesario determinar la energía liberada en la explosión. Para ello se tendrá en cuenta que la energía interna del vapor es mayor antes de la explosión que después de la misma; obviamente, esta cantidad de energía es dependiente de la masa involucrada:

$$H_v = h_v(T_b) - h_l(T_b) \quad (\text{Ec. 23})$$

$$f_2 = 1 - \exp\left(-2,63 \left(\frac{C_p(T_b)}{H_v}\right) (T_c - T_b) \left(1 - \left(\frac{T_c - T_{rupt}}{T_c - T_b}\right)^{0,38}\right)\right) \quad (\text{Ec. 24})$$

$$V^* = V_v + V_l f_2 \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right) \text{ si } P_{rupt} < P_c; V^* = V \text{ si } P_{rupt} > P_c \quad (\text{Ec. 25})$$

$$m_{TNT-prugh} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} P_{rupt} V^*}{k-1} \left[1 - \left[\frac{101}{P_{rupt}}\right]^{(\gamma-1)/\gamma}\right] \quad (\text{Ec. 26})$$

$$d_{Prugh} = \frac{d}{(m_{TNT-prugh})^{1/3}} \quad (\text{Ec. 27})$$

Una vez que se ha obtenido la estancia escalada con la ecuación (27), se utiliza la Figura 8 para estimar el pico de la sobrepresión.

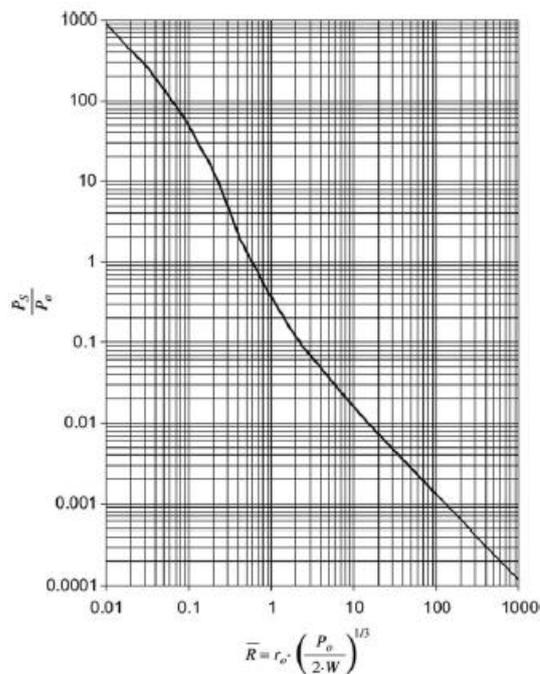
### 5.2. Modelo de TNO (1997)

Este modelo fue propuesto por la Netherland Organisation for Applied Scientific Research en 1997 para hacer una estimación de la sobrepresión generada por las explosiones BLEVE; en el mismo se ha considerado también una expansión isoentrópica [8]:

$$E_{TNO} = m_l(u_{l1} - u_{l2}) + m_v(u_{v1} - u_{v2}) \quad (\text{Ec. 28})$$

$$d_{TNO} = d \left(\frac{100Pa}{2E_{TNO}}\right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 29})$$

Si el valor obtenido de la ecuación (29) es superior a 2, entonces, para la estimación de la sobrepresión se debe utilizar  $d_{TNO}$  en la Figura 5.1.



**Figura. 5.1** Sobrepresión vs. La distancia escalada de Sachs ( $d_{TNT} > 2$ .) [8].

Si dicho valor es inferior a 2, entonces, se debe resolver la ecuación (31) por iteración. Otra alternativa es encontrar el valor de  $\overline{P_{SO}}$  mediante las Figuras 6, 7 y 8 del Anexo III.

$$\frac{a_1}{a_a} = \sqrt{\frac{\gamma_1 T_{rupt} \mu_a}{\gamma_a T_a \mu_1}} \tag{Ec. 30}$$

$$\frac{P_{rupt}}{P_a} = (\overline{P_{SO}} + 1) \left[ 1 - \frac{(\gamma_1 - 1) (a_a/a_1) \overline{P_{SO}}}{\sqrt{2\gamma_a (2\gamma_a + (2\gamma_a + 1)) \overline{P_{SO}}}} \right]^{-2\gamma_1 / (\gamma_1 - 1)} \tag{Ec. 31}$$

$$\overline{P_{SO}} = \frac{P_{SO}}{P_a} \tag{Ec. 32}$$

$$d_{SO} = 0,782 \sqrt[3]{V_v} \tag{Ec. 33}$$

$$D_{so} = d_{so} \left( \frac{100P_a}{E} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 34})$$

En la ecuación (34), el término  $D_{so}$  se determina mediante la Figura 6 del Anexo III a partir de la intersección con las curvas más cercanas.

### 5.3. Modelo de Roberts (1999)

Este modelo fue propuesto por Roberts, basándose asimismo en la suposición de una expansión isoentrópica [9].

$$x_{l2} = \frac{(s_{l1}-s_{l2})}{(s_{v2}-s_{l2})} = \frac{(h_{l1}-h_{l2})}{(h_{v2}-h_{l2})} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$x_{v2} = \frac{(s_{v1}-s_{l2})}{(s_{v2}-s_{l2})} = \frac{(h_{v1}-h_{l2})}{(h_{v2}-h_{l2})} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$m_{l2} = m_1(1 - x_{l2}) + m_v(1 - x_{v2}) \quad (\text{Ec. 37})$$

$$m_{v2} = m_1x_{l2} + m_vx_{v2} \quad (\text{Ec. 38})$$

$$W = \Delta U = -E_{Roberts} = (m_{l2}u_{l2} + m_{v2}u_{v2} - m_{l1}u_{l1} - m_{v1}u_{v1}) \quad (\text{Ec. 39})$$

$$d_{Roberts} = d \left( \frac{100P_a}{2E_{Roberts}} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 40})$$

Una vez se ha determinado la distancia mediante la ecuación (40), se obtiene la onda de sobrepresión usando la Figura 5.2.

### 5.4. Modelo de Planas - Cuchi et al. (2004)

Este modelo fue propuesto desde un enfoque más próximo a la situación real de una explosión BLEVE, ya que los otros métodos habían introducido un sobredimensionamiento al basarse en la teoría de los gases ideales y suponer que el vapor experimenta una expansión isoentrópica (Prugh) [6].

En este nuevo método, por tanto, se supone un proceso de expansión adiabática e irreversible (típica de una explosión), utilizándose asimismo las propiedades reales de las sustancias involucradas en la explosión.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, al tratarse de un proceso de expansión adiabática irreversible, el único trabajo que se realiza está asociado a la variación en el

volumen que experimenta la sustancia contenida en el depósito hasta alcanzar las condiciones atmosféricas. Es en parte similar al caso de una expansión isoentrópica, pero con la importante diferencia que ahora la entropía no será constante:

$$W = -P_o \cdot \Delta V \quad (\text{Ec. 42})$$

El término de la variación de volumen corresponde al cambio del estado inicial del recipiente, desde el momento de la explosión hasta alcanzar las condiciones atmosféricas inmediatamente después de la misma (estado final). Por otro lado, para un proceso adiabático, este trabajo es igual a la variación de energía interna contenida en el depósito:

$$-P_o \cdot \Delta V = \Delta U \quad (\text{Ec. 43})$$

La ecuación (43) se puede resolver de dos maneras, una es mediante el método gráfico y la otra es de forma analítica. Debido a la falta de los datos experimentales, aquí se ha optado por el método analítico:

$$-\Delta U = (u_L - u_G) \cdot m_T \cdot x - m_T \cdot u_L + U_i \quad (\text{Ec. 44})$$

$$P_o \cdot \Delta U = P_o \cdot [(v_G - v_L) \cdot m_T \cdot x - m_T \cdot v_L + V_i] \quad (\text{Ec. 45})$$

Igualando las ecuaciones (44) y (45) es posible determinar el valor de x:

$$x = \frac{m_T \cdot P_o \cdot v_L - V_i \cdot P_o + m_T \cdot u_L - U_i}{[(u_L - u_G) - (v_G - v_L) \cdot P_o] \cdot m_T} \quad (\text{Ec. 46})$$

Sustituyendo el valor de x en la ecuación (44) o en la (45), se determina la variación de la energía interna y, por lo tanto, se puede estimar la cantidad de TNT equivalente mediante la ecuación (47) y así, finalmente, el valor de la sobrepresión (Figura 5.2):

$$W_{TNT} = \beta \cdot 0,214 \cdot \Delta U \quad (\text{Ec. 47})$$

## 5.5. Método de la “energía de sobrecalentamiento” (2006)

Es un método fue diseñado para la estimación rápida de la sobrepresión causada por una BLEVE o una explosión similar. Se basa en el uso de la denominada “energía de sobrecalentamiento”, que corresponde a la diferencia entre la entalpía específica del líquido a la temperatura justo antes de la explosión y la entalpía específica del líquido a la temperatura de saturación y a presión atmosférica [5].

En este caso, los autores han propuesto que se puede hacer la estimación a partir de una determinada fracción de dicha energía.

$$|q_v| = h_{g0} - h_l \quad (\text{Ec. 48})$$

$$|q_l| = h_{hl} - h_{l0} \quad (\text{Ec. 49})$$

Igualando la ecuación (48) con la ecuación (49), se obtiene:

$$|q_v| = |q_l| \quad (\text{Ec. 50})$$

$$h_{hl} - h_{l0} = h_{g0} - h_l \quad (\text{Ec. 51})$$

De la ecuación (51), es posible calcular la temperatura de sobrecalentamiento mediante la entalpía de evaporación de la fracción líquida, que es igual a la del líquido enfriado, que no puede ser sometido a ningún cambio de estado:

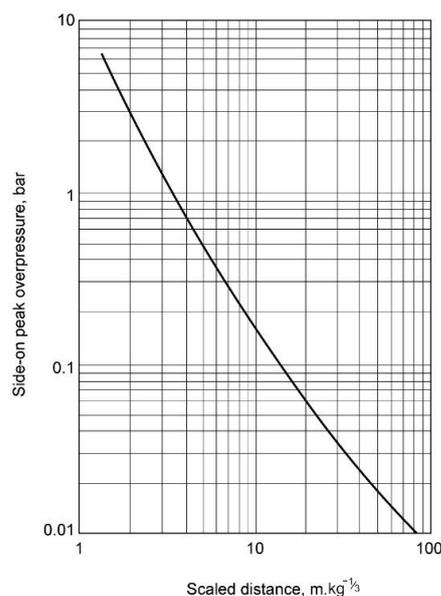
$$SE = h_l - h_{l0} \quad (\text{Ec. 52})$$

Una vez se ha estimado el término SE, si el proceso es isoentrópico, entonces la fracción de energía que se convierte en onda de presión estará comprendida entre el 7% y el 14% de SE; en cambio, si el proceso es irreversible entonces estará comprendida entre el 3,6% y el 5% de SE.

Después se calcula la cantidad de masa de TNT equivalente, para su posterior uso en la determinación de la distancia escalada mediante la siguiente expresión:

$$d_{\text{Casal-Salla}_i} = \frac{d}{(m_{\text{TNTCasal-Salla}_i})^{1/3}}; \text{ donde } i = \text{isoentrópica ó irreversible} \quad (\text{Ec. 53})$$

Finalmente, se obtiene la sobrepresión mediante la Figura 5.2.



**Figura. 5.2** Curva de sobrepresión para TNT equivalente [Casal, 2008].

### 5.5.1. Expansión Isoentrópica

Para este caso, si la presión de rotura es inferior a la presión crítica de la sustancia implicada, entonces:

$$m_{TNT_{Casal-Salla_Iso}} = 0,214e^{-3}0,14m_lSE \quad (\text{Ec. 54})$$

En cambio, si la presión de rotura es superior a la presión crítica de la sustancia implicada, entonces:

$$m_{TNT_{Casal-Salla_Iso}} = 0,214e^{-3}0,14m_{total}SE \quad (\text{Ec. 55})$$

### 5.5.2. Expansión Irreversible

Para este caso, si la presión de rotura es inferior a la presión crítica de la sustancia implicada, entonces:

$$m_{TNT_{Casal-Salla_IR}} = 0,214e^{-3}0,05m_lSE \quad (\text{Ec. 56})$$

En cambio, si la presión de rotura es superior a la presión crítica de la sustancia implicada, entonces:

$$m_{TNT_{Casal-Salla_IR}} = 0,214e^{-3}0,05m_{total}SE \quad (\text{Ec. 57})$$

## 5.6. Modelo de Birk et al. (2007)

Este modelo, muy parecido al de Prugh, fue propuesto en 2007 considerando una vez más el fenómeno como una expansión isoentrópica [7]:

$$E_{Birk} = m_v(u_{v1} - u_{v2}) \text{ ó } E_{Birk} = m_l(u_{l1} - u_{l2}) \quad (\text{Ec. 58})$$

$$m_{TNT-Birk} = 2 \cdot 0,214e^{-3} \cdot E_{Birk} \quad (\text{Ec. 59})$$

$$d_{Birk} = \frac{d}{(m_{TNT-Birk})^{1/3}} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$\frac{P_s}{P_a} = \frac{808 \left[ 1 + \left( \frac{d_{Birk}}{4,5} \right)^2 \right]}{\left( 1 + \left( \frac{d_{Birk}}{0,048} \right)^2 \right)^{1/2} \left( 1 + \left( \frac{d_{Birk}}{0,32} \right)^2 \right)^{1/2} \left( 1 + \left( \frac{d_{Birk}}{1,35} \right)^2 \right)^{1/2}} \quad (\text{Ec. 61})$$

## 5.7. Estimación de la sobrepresión

Para poder determinar la sobrepresión asociada a una explosión BLEVE existen varios métodos de estimación; en este trabajo se ha optado por el método del TNT equivalente (sección 1.7). Es el explosivo más utilizado en el campo bélico y ha sido ampliamente estudiado y tabulado. Es un método relativamente sencillo, de fácil aplicación; aunque sus resultados no son siempre lo buenos que cabría esperar, facilita una estimación relativamente aceptable.

Desde el estudio de Reid sobre la teoría de la línea de sobrecalentamiento que contribuyó a la comprensión del fenómeno asociado a las explosiones BLEVE hasta hoy en día, ha habido diversidades de opiniones sobre cuál es la fracción de la energía liberada que se invierte en generar la onda de presión. Muchos autores consideran la cantidad de energía invertida en esta explosión es de 100% (este es el caso de Prugh). En cambio, otros consideran que la cantidad de energía invertida es de 50% (caso de Casal-Salla). Dada la información publicada en los últimos años, aquí se ha considerado una estimación aceptable suponer que no toda la energía se convierte en la onda de presión.

La relación entre la cantidad de energía invertida en la onda de presión y el equivalente TNT equivalente viene dada por la expresión siguiente:

Para el caso de los autores Birk, Prugh, Roberts y TNO, que consideran que la cantidad de energía invertida es de 100%:

$$m_{TNT} = \frac{1}{4680 \text{ kJ/kg}} \cdot W_c \cdot \Delta H_C = 2,14 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \cdot W_c \cdot \Delta H_C \quad (62)$$

Para el caso de los autores Casal-Salla y Planas-Cuchi, que consideran que la cantidad de energía invertida es de 40 a 50%:

$$m_{TNT} = (0,4 - 0,5) \cdot \frac{1}{4680 \text{ kJ/kg}} \cdot W_c \cdot \Delta H_C = (0,4 - 0,5) \cdot 2,14 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{kJ}} \cdot W_c \cdot \Delta H_C \quad (63)$$

Finalmente, conocida la masa de TNT equivalente, se puede determinar el valor del pico de sobrepresión en un punto situado a una distancia  $d$  del lugar de la explosión. Para ello hay que recurrir una serie de gráficos en los cuales cada uno de estos parámetros viene dado según la distancia normalizada, ésta se puede calcular mediante la expresión presentada en la sección del método del TNT equivalente.

## 6. Programa de cálculo

En este apartado se describe la aplicación informática que se emplea para determinar los efectos mecánicos causados por el fenómeno BLEVE. La aplicación se llama “Explosión BLEVE” y es una hoja de cálculo realizado con el Excel 2007 de Windows, donde se realiza las diferentes rutinas (macros) que se han programado previamente con el lenguaje Visual Basic.

Esta herramienta permite estimar la sobrepresión provocada por una explosión BLEVE mediante los modelos propuestos por Birk, Casal-Salla, Planas – Cuchi, Prugh, Roberts y TNO.

### 6.1. Descripción del programa

El programa se encuentra en una hoja de cálculo de Excel. La hoja de cálculo “Explosión BLEVE” consta de 2 Tab’s: “Datos” y “Resultados”. En la hoja de datos es donde se han de introducir los datos comunes para los diferentes modelos; la hoja de resultados recopila los resultados generados por el programa para la estimación de la sobrepresión en un fenómeno BLEVE. A continuación se describen en una tabla con sus respectivos nombres y funciones.

Nombre	Descripción
Datos	En este Tab, se deben introducir todos los datos de la sustancia implicada en un fenómeno BLEVE, tanto comunes como específicos.
Resultados	En este Tab, se recopila los resultados de forma automática para un fenómeno BLEVE.
Modelo Casal-Salla	Contiene dos modelos de Casal-Salla para la estimación de la onda de presión.
Modelo Planas-Cuchi	Contiene el modelo de Planas-Cuchi para la estimación de la onda de presión.

Modelo Prugh	Contiene el modelo de Prugh para la estimación de la onda de presión
Modelo Birk	Contiene el modelo de Birk para la estimación de la onda de presión.
Modelo TNO	Contiene el modelo propuesto por TNO para estimación de la onda de presión.
Modelo Roberts	Contiene el modelo de Roberts para estimación de la onda de presión.

**Tabla. 6.1** Cuadro de resumen de la hoja de cálculo “Explosion BLEVE”.

## 6.2. Funcionamiento del programa y obtención de resultado

En este apartado se describe el funcionamiento de la herramienta informática “Explosión BLEVE”, con sus diferentes modelos y la obtención de los resultados.

El programa contiene 3 Tab’s; “Datos”, “Resultados” y “Macros”. La hoja de Datos consta de un “ComboBox” (lista de modelos), que permite seleccionar el modelo de interés y a su vez sólo muestra al usuario los datos de dicho modelo. Además, cuenta con un “CommandButton” (calcular), que permite realizar la estimación de la sobrepresión en función del modelo seleccionado. A continuación se detallan los nombres y la función de cada uno de ellos.

Comando	Descripción
Datos	En este Tab, se deben introducir todos los datos de la sustancia implicada en un fenómeno BLEVE
Resultados	En este Tab, se recopilan los resultados de forma automática para un fenómeno BLEVE.
ComboBox	Este comando, proporciona una lista de los

	modelos disponibles para la estimación de un caso BLEVE.
Calcular	En este comando, están implantado todos los modelos y las funciones auxiliares para poder llevar a cabo la estimación, es decir, Macros.
Casal-Salla expansión Isoentrópica	Esta macro proporciona la sobrepresión de un caso BLEVE, considerado como una expansión isoentrópica.
Casal-Salla expansión Irreversible	Esta macro proporciona la sobrepresión de un caso BLEVE, considerado como una expansión irreversible.
Sobrepresión Prugh	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Prugh.
Sobrepresión Planas-Cuchi	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Planas-Cuchi.
Sobrepresión Birk	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Birk.
Sobrepresión Roberts	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Roberts.
TNO	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Roberts.

**Tabla. 6.2** Cuadro de resumen de los comandos disponible.

## 7. Aplicación

En este apartado se verifica la funcionalidad del programa “Explosión BLEVE” mediante la resolución de diferentes casos prácticos.

### 7.1. Resolución de casos reales mediante el programa

A continuación, se describen brevemente los dos casos reales utilizados como referencia para el cálculo mediante el programa “Explosión BLEVE”.

#### 7.1.1. Caso 1

En este caso, el accidente ocurrió en una instalación de descarga destinada al producto GLP, durante el trasvase de GLP de un camión cisterna a un tanque de almacenamiento fijo, mediante la conexión de una tubería con la ayuda un flexo metálico (manguera flexible). El tanque de abastecimiento del camión era de forma cilíndrica horizontal ( $L = 3,6$  m,  $D = 2$  m) con una capacidad total de aproximadamente  $13 \text{ m}^3$  y estaba cargado con GLP licuado al 65 % de su capacidad; esto corresponde a aproximadamente 4200 kg de GLP.

La instalación receptora disponía de un tanque de forma cilíndrica, vertical y enterrado, con una capacidad total de  $3 \text{ m}^3$  aproximadamente. La instalación se encontraba cerca de una planta industrial, estando parcialmente confinada por todos los lados; había un cobertizo situado por encima de la plataforma de descarga, así como dos almacenes que se encontraban a una distancia de 20 y 30 metros, respectivamente, durante la descarga del camión cisterna.

Para la reconstrucción de los hechos ocurridos, se dispuso del testimonio de varios testigos que pudieron presenciar el accidente ocurrido.

Según éstos, el derrame accidental de GLP líquido empezó desde la parte trasera del camión cisterna, donde se encontraban todos los equipos de bombeo. La ubicación exacta de la fuga no fue identificada; sin embargo, tras el accidente la reconstrucción del hecho puso de manifiesto que debió haber ocurrido desde la línea de la tubería muy cerca de la conexión con el tanque.

La fuga generó un charco de líquido en las proximidades del camión y debido a la rápida evaporación se produjo una densa nube de vapor; la misma se estratificó sobre el suelo, siendo su dispersión parcialmente confinada por la configuración de la zona circulante. Según el testimonio de los testigos, 5 minutos más tarde de la fuga empezó a arder el vapor

de nube y el fuego retrocedió hasta camión a través del líquido embalsado en el suelo, formándose así un charco de fuego con llamas altas.

En consecuencia, el depósito del camión que todavía contenía GLP se vio envuelto casi por completo en un charco de fuego; 25 minutos después desde el incendio del charco, la cisterna se rompió de forma catastrófica, dando lugar a una BLEVE, provocando así proyectiles y también una bola de fuego.

En la Tabla 7.1, se recopilan todos los datos necesarios para poder llevar a cabo un estudio comparativo entre las consecuencias reales y las predichas por medio de los modelos elegidos para este trabajo.

Substancia	Presión (bar)	Tª (K)	Masa líquido( kg)	Volumen líquido (m3)	Volumen vapor (m3)	% de carga al tanque
LPG (Propano)	10,01	300	500	1	12	65

**Tabla. 7.1** Datos del accidente del caso R. Bobbico y Cía.

Para verificar la funcionalidad del programa “Explosión BLEVE”, se han establecido una serie de condiciones específicas, de acuerdo con el caso real de la bibliografía [16]. Se desea determinar la onda de sobrepresión a una distancia de 20 y 30 metros respectivamente, realizando un estudio comparativo con todos los modelos disponibles.

Datos Comunes	Presión atmosférica (bar)	Distancia de evaluación (m)	Temperatura crítica (K)	Temperatura de rotura (°C)	Presión crítica (bar)	Presión de rotura (bar)
	1	20 y 30	369,89	300	42,51	10,01

**Tabla. 7.2** Cuadro de datos comunes.

Modelo Prugh	Entalpía vapor 1 (kJ/kg)	Entalpía líquido 1 (kJ/kg)	Cp (kJ/kg·K)	Tª Ebullición ambiente (K)	Tª ruptura (K)	Volumen vapor 1 (m3)	Volumen líquido 1 (m3)	Densidad vapor 1 (kg/m3)	Densidad líquido 1 (kg/m3)	Volumen (m3)	Cv
	502,7	170,9	1,6848	231	300	12	1	21,74	489,3	13	1,283

**Tabla. 7.3** Cuadro de datos específico Prugh.

Modelo TNO	Masa de líquido (kg)	Masa de vapor (kg)	Energía interna líquido 1 (kJ/kg)	Energía interna líquido 2 (kJ/kg)	Energía interna vapor 1 (kJ/kg)	Energía interna vapor 2 (kJ/kg)	Relación calor específico en aire ambiente
	500	260,88	168,89	0,0191	457,53	384,39	1,4

**Tabla. 7.4** Cuadro de datos específico TNO.

Modelo Roberts	Entalpía líquido 1 (kJ/kg)	Entalpía líquido 2 (kJ/kg)	Entalpía vapor 1 (kJ/kg)	Entalpía vapor 2 (kJ/kg)	Masa líquido 1 (kg)	Masa vapor 1 (kg)	Energía interna líquido 1 (kJ/kg)	Energía interna líquido 2 (kJ/kg)	Energía interna vapor 1 (kJ/kg)	Energía interna vapor 2 (kJ/kg)
	170,9	0,1908	502,7	425,5	500	260,88	168,89	0,0191	457,53	384,39

**Tabla. 7.5** Cuadro de datos específico Roberts.

Modelo Planas-Cuchi	Energía interna líquido 2 IR (MJ/kg)	Energía interna vapor 2 (MJ/kg)	Masa Total depósito (kg)	Energía interna total antes explosión (MJ)	Volumen específico vapor 2 IR (m³/kg)	Volumen específico líquido 2 IR (m³/kg)	Volumen depósito (m³)
	0,0000191	0,3844	760,88	203,81	0,412	0,00172	13

**Tabla. 7.6** Cuadro de datos específico Planas-Cuchi.

Modelo Casal-Salla	Entalpía líquido a presión ruptura (kJ/kg)	Entalpía líquida a temperatura ambiente (kJ/kg)	Masa líquido (kg)
	170,9	0,1908	500

**Tabla. 7.7** Cuadro de datos específico Casa-Salla Expansión Isoentrópica e Irreversible.

Modelo Birk	Masa vapor/líquido (kg)	Energía interna vapor/líquido 1 (kJ/kg)	Energía interna vapor/líquido 2 (kJ/kg)
	500	168,89	0,0191

**Tabla. 7.8** Cuadro de datos específico Birk.

A continuación, presentaremos los resultados obtenidos mediante el programa “Explosión BLEVE”. Cabe mencionar que la implantación de los modelos en el VBA, dependiendo el modelo, solamente proporcionan la distancia escalada y en cambio, el modelo de Birk nos proporciona la onda de sobrepresión directamente. Por lo tanto, es necesario el uso de las gráficas que se encuentran en el Anexo III.

Distancia (m)	Modelos								R. Bubbico et al
	Prugh 100 % vapor	Casal-Salla ISO 50 %	Casal-Salla IR 50 %	Birk 100 % vapor	Birk 100 % líquido	Roberts 100 %	Planas-Cuchi 40 %	TNO 100 %	
20	18	9,8	6	9,9	20,7	90	7	d < 2	5 - 6
30	11	5,5	3,5	6,0	11,2	40	5,2	10	3

**Tabla. 7.9** Cuadro de resultados de la onda sobrepresión (KPa) 100% energía invertida.

En la Tabla 7.9, se ha realizado un estudio comparativo mediante diferentes modelos propuestos por diversos investigadores para la determinación de la onda de sobrepresión, consecuencia de una BLEVE. Se han distinguido dos consideraciones: una corresponde a los autores que afirman que la cantidad de energía invertida en la onda de sobrepresión es el total (encabezado de la columna: 100%) y la otra a los que suponen que no toda la energía se invierte, solamente el 40-50% de esa energía es convertida en pico de sobrepresión (encabezado de la columna; 40% ó 50%).

Distancia (m)	Modelos								R. Bubbico
	Prugh 40 % vapor	Casal-Salla ISO 50 %	Casal-Salla IR 50 %	Birk 50 % vapor	Birk 50 % líquido	Roberts 50 %	Planas- Cuchi 40 %	TNO 50 %	
20	13	9,8	6	7,4	14,4	57	7	d < 2	5 - 6
30	7	5,5	3,5	4,6	8,3	28	5,2	7	3

**Tabla. 7.10** Cuadro de resultados de la onda sobrepresión (KPa) 50% energía invertida.

En la Tabla 7.10 se presentan los resultados del estudio comparativo; para éste caso, se ha considerado que en lugar de invertir toda la energía en generar sobrepresión, únicamente se invierte el 50%.

### 7.1.2. Caso 2

De forma análoga como en el caso 1, se describe brevemente el accidente que tuvo lugar el 22 de junio de 2002, a las 13:30 pm, en la carretera C-44 cerca de Tivissa, Catalunya (España). Un camión cisterna que contenía gas natural licuado perdió el control en una fuerte pendiente. Volcó sobre el lado izquierdo, quedando al lado de la carretera. Inmediatamente aparecieron llamas entre la cabina y el remolque, inicialmente sin humo.

Un testigo que se encontraba a una distancia de 70 m dijo que al principio las llamas era azules y muy altas, pero momentos más tarde, los neumáticos comenzaron a arder, produciendo pequeñas explosiones y el humo era de color negro. Según otros testigos, más tarde las llamas aumentaron de tamaño. Después de 2 minutos tras el accidente, las llamas podrían haber sido alimentadas por el gasóleo del depósito del camión o por el GLP que transportaba, o más probablemente, por ambos combustibles. Las fotografías que proporciona el caso en la bibliografía [22], muestran la existencia de humo blanco; esto podría ser vapor que originó la despresurización de la válvula de seguridad. 20 minutos más tarde del accidente de tráfico, el tanque explotó; según alguno de los testigos, hubo primero una pequeña explosión, a continuación un fuerte silbido y luego inmediatamente una gran explosión. Inmediatamente después de la misma, el fuego desapareció y apareció una nube blanca que se encendió, dando lugar a una bola de fuego.

En la Tabla 7.11, se recopilan todos los datos necesarios para poder llevar a cabo un estudio comparativo entre las consecuencias reales y predichos por medio de los modelos elegidos para éste trabajo

Substancia	Presión (bar)	Tª (K)	Volumen líquido (m³)	Volumen vapor (m³)	% de carga al tanque
LNG (metano)	8	145	47,6	8,4	85

**Tabla. 7.11** Datos del accidente para caso Tivissa.

Datos Comunes	Presión atmosférica (bar)	Distancia evaluación (m)	Temperatura crítica (K)	Temperatura rotura (°C)	Presión crítica (bar)	Presión rotura (bar)
	1	125	45,99	145	42,51	8

**Tabla. 7.12** Cuadro de datos comunes.

Modelo Prugh	Entalpía vapor 1 (kJ/kg)	Entalpía líquido 1 (kJ/kg)	Cp (kJ/kg·K)	Tª ebullición ambiente (K)	Tª ruptura (K)	Volumen vapor 1 (m³)	Volumen líquido 1 (m³)	Densidad vapor 1 (kg/m³)	Densidad líquido 1 (kg/m³)	Volumen (m³)	Cv
	265,7	-163,7	2,2315	115	145	8,4	47,6	12,96	367,65	56	1,707

**Tabla. 7.13** Cuadro de datos específico Prugh.

Modelo TNO	Masa líquido (kg)	Masa vapor (kg)	Energía interna líquido 1 (kJ/kg)	Energía interna líquido 2 (kJ/kg)	Energía interna vapor 1 (kJ/kg)	Energía interna vapor 2 (kJ/kg)	Relación calor específico en aire ambiente
	17500	108,86	-165,83	-274,93	205,14	1867,17	1,4

**Tabla. 7.14** Cuadro de datos específico TNO.

Modelo Roberts	Entropía Entalpía líquido 1 (kJ/kg)	Entropía Entalpía líquido 2 (kJ/kg)	Entropía Entalpía vapor 1 (kJ/kg)	Entropía Entalpía vapor 2 (kJ/kg)	Masa líquido 1 (kg)	Masa vapor 1 (kg)	Energía interna líquido 1 (kJ/kg)	Energía interna líquido 2 (kJ/kg)	Energía interna vapor 1 (kJ/kg)	Energía interna vapor 2 (kJ/kg)
	-163,7	-274,7	265,7	229,4	17500	108,86	165,83	-274,93	205,14	187,17

**Tabla. 7.15** Cuadro de datos específico Roberts.

Modelo Planas-Cuchi	Energía interna líquido 2 IR (MJ/kg)	Energía interna vapor 2 (MJ/kg)	Masa total depósito (kg)	Energía interna total antes explosión (MJ)	Volumen específico vapor 2 IR (m <sup>3</sup> /kg)	Volumen específico líquido 2 IR (m <sup>3</sup> /kg)	Volumen depósito (m <sup>3</sup> )
	-0,274	-0,187	17608,86	-2879,66	0,43	0,00239	56

**Tabla. 7.16** Cuadro de datos específico Planas-Cuchi.

Modelo Casal-Salla	Entalpía líquida a presión ruptura (kJ/kg)	Entalpía líquida a temperatura ambiente (kJ/kg)	Masa líquido (kg)
	-163,7	-274,7	17500

**Tabla. 7.17** Cuadro de datos específico Casa-Salla Expansión Isoentrópica e Irreversible.

Modelo Birk	Masa vapor/líquido (kg)	Energía interna vapor/líquido 1 (kJ/kg)	Energía interna vapor/líquido 2 (kJ/kg)
	17500	-165,83	-274,93

**Tabla. 7.18** Cuadro de datos específico Birk.

A continuación presentamos los resultados obtenidos de forma idéntica que en el caso 1:

Modelos									
Distancia (m)	Prugh 100 % vapor	Casal-Salla ISO 50 %	Casal-Salla IR 50 %	Birk 100 % vapor	Birk 100 % líquido	Roberts 100 %	Planas-Cuchi 40 %	TNO 100 %	Caso Tivissa
125	2,7	3,2	2	0,62	6,85	90	2,2	6	3

**Tabla. 7.19.** Cuadro de resultados de la onda sobrepresión (KPa) 100% energía invertida.

Modelos									
Distancia (m)	Prugh 40 % vapor	Casal-Salla ISO 50 %	Casal-Salla IR 50 %	Birk 50 % vapor	Birk 50 % líquido	Roberts 50 %	Planas-Cuchi 40 %	TNO 50 %	Caso Tivissa
125	1,8	3,2	2	0,5	5,24	60	2,2	4	3

**Tabla. 7.20** Cuadro de resultados de la onda sobrepresión (KPa) 50% energía invertida.

## 8. Impacto ambiental

En cualquier proyecto es necesario hacer la evaluación medioambiental. En este caso el proyecto se ha desarrollado básicamente utilizando herramientas informáticas y materiales imprimidos en papel; es decir, el posible impacto ambiental reside en la generación de residuos y consumo energético.

El residuo generado han sido: tinta de impresora y materiales compuestos como pueden ser bolígrafos o CD's. El principal residuo generado ha sido el papel. Entre los apuntes, cálculos previos hechos a mano, imprimir la memoria y fotocopiar artículos se han consumido aproximadamente unas 500 hojas, que representan unos 2,5 kg de papel. Todos estos residuos han sido depositados en sus respectivos contenedores (color azul), de manera que sea posible su reciclaje ordinario.

Durante la elaboración del proyecto la herramienta principal de trabajo ha sido un ordenador portátil. El consumo de éste es de 120 W; durante 1000 horas de trabajo representan 120 kWh. Se han utilizado 600 horas de luz artificial, lo cual implica un consumo energético de 48 kWh.

Finalmente, los desplazamientos por parte del ingeniero se han realizado en transporte público, de forma que no se ha incrementado ninguna emisión de gases globales como a consecuencia de la elaboración del proyecto.

De acuerdo con las consideraciones anteriores se puede considerar que el impacto ambiental es muy pequeño para este proyecto.

## 9. Presupuesto

En este apartado se describe el análisis económico del proyecto. Se ha de mencionar que al tratarse de un proyecto teórico, sus gastos son muy limitados. Los mismos se han dividido en tres grandes grupos: gastos de personal, gastos de material y otros gastos.

### 9.1. Coste de personal

El gasto de personal está constituido por las horas dedicadas al proyecto por un ingeniero Junior y la supervisión de un ingeniero Sénior. Sus remuneraciones son 27,27 €/h y 81,81 €/h respectivamente.

<b>Ingeniero Junior</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Coste (€)</b>
Recopilación de información	200	5454
Estudio de los modelos	50	1364
Elección de modelos	10	273
Programación	300	8181
Elaboración de proyecto y anexos	240	6545
Reuniones	10	273
Revisión de contenido y formato	50	1364
<b>Total Junior</b>	<b>860</b>	<b>23452</b>
<b>Ingeniero Sénior</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Coste (€)</b>
Revisión y asesoramiento	20	1636
<b>Total Sénior</b>	<b>20</b>	<b>1636</b>

**Tabla. 9.1** Cuadro resumen de gastos personales.

El coste personal total para llevar a cabo este trabajo es de 25.088 € y una dedicación parcial de 880 horas; a esta estimación se le debe sumar un factor complementario de 12% respecto a las horas totales de dedicación.

## 9.2. Coste de material

En este apartado se describe la amortización asociada al desarrollo del proyecto, incluyendo la adquisición de la licencia del sistema Operativo Windows Vista, el ordenador portátil, los aparatos periféricos al portátil y los materiales fungibles, es decir, el papel, el toner de la impresora, CD's, la encuadernación y los materiales de la oficina.

Para llevar a cabo el concepto de la amortización, basándose en las leyes vigentes, se aplica los siguientes criterios:

Para los activos que sean de carácter tangible su amortización se estipula un 12% anual sobre su valor actualizado y para los activos de carácter intangible su amortización es de 10% anual sobre su valor actualizado.

Concepto	Coste (€)
Electricidad	205
Internet	75
Teléfonos	45
Desplazamiento	52,75

**Tabla. 9.2** Cuadro de resumen de los gastos materiales.

Los gastos de materiales para llevar a cabo este trabajo suman un total de 570 €.

## 9.3. Otros costes

En este apartado se describen los gastos que son imputados de forma indirecta a la elaboración de este proyecto, es decir, la electricidad, internet, el teléfono y el desplazamiento al lugar de estudio.

Concepto	Coste (€)
Electricidad	205
Internet	75
Teléfonos	45
Desplazamiento	52,75

**Tabla. 9.4** Cuadro de resumen de otros gastos

Por lo tanto, el coste total de este proyecto es de 26.036 € con el IVA incluido. A continuación se representa en la tabla siguiente convenientemente desglosado:

Concepto	Coste (€)
Gasto personal	25088
Gasto material	570
otros gastos	378
Total	26036

**Tabla. 9.5** Cuadro de resumen de los gastos totales del proyecto.

## Conclusiones

El proyecto se ha realizado satisfactoriamente, estableciendo en gran parte los objetivos que se ha planteado desde su inicio.

Del análisis de los modelos existentes para la estimación de la onda de sobrepresión causada por una explosión BLEVE, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Entre los modelos existentes para el cálculo de los picos de sobrepresión en un accidente BLEVE, predominan los de origen empírico.
- El análisis comparativo realizado con los pocos datos a escala real existentes ha puesto de manifiesto lo siguiente.
- En el accidente analizado por los investigadores Bubbico y Marchini (explosión de un depósito de propano),

El modelo de Casal-Salla considerando una expansión irreversible es la que más acerca a los datos experimentales; este modelo es además de aplicación simple y rápida.

En el accidente ocurrido en Tivissa (explosión de un camión cisterna de gas natural licuado), el modelo Casal-Salla considerando una expansión isoentrópica es la que más se acerca al valor estimado del análisis del accidente.

- Se ha hecho un análisis comparativo considerando una conversión de 50 % de energía a la onda de sobrepresión y excluyendo a los autores que ya desde principio contemplaban esta hipótesis, para el caso de Bobbico y Marchini, el modelo de Birk para el vapor es la que más se acerca a los datos experimentales y para el accidente que ocurrió en Tivissa (España), el modelo que más se acerca al valor estimado del accidente es el de TNO.
- Cabe destacar que para este trabajo se ha descartado (de acuerdo con el director del proyecto) el método de cálculo para el modelo de TNO en caso de que la distancia escalada sea inferior a 2, dada la complejidad de su aplicación.

Se ha desarrollado una herramienta informática que permite obtener de manera rápida y fiable el valor de la sobrepresión máxima en una explosión del tipo BLEVE. Esta herramienta de cálculo resulta de especial interés, ya que la mayoría de los modelos son de aplicación tediosa. Su interés radica también en el potencial que presenta este tipo de accidente para la generación del efecto dominó, tanto en instalaciones industriales (como, por ejemplo, una refinería) como en el transporte por carretera o ferrocarril.

Finalmente, cabe mencionar que todos los modelos presentan inexactitudes en la estimación de las consecuencias de una explosión BLEVE; sin embargo, algunos de ellos constituyen una buena aproximación a la realidad para su posterior uso en la elaboración de un plan de autoprotección en caso de un potencial accidente.

## Agradecimientos

Mi agradecimiento para el Dr. Joaquim Casal Fábrega por su acogida y su ayuda en la realización de este proyecto.

Gracias también al profesor Gerard Escudero quien me ayudó en la programación en entorno Visual Basic.

También quiero dar las gracias a Núria Royo y Mónica Escrigas por su ayuda en mi última estancia en la ETSEIB.

Gracias a mi familia y en especialmente a mi hermana Helen Chen; sin su ayuda no hubiese podido llegar hasta aquí.

En definitiva, a todas las personas que de una forma u otra han contribuido a la concepción de este proyecto.

## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] Casal, J. *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Elsevier. Amsterdam, 2008.
- [2] Casal, J., Montiel, H. Planas, E., Vílchez, J. A. *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Edicions UPC. Barcelona, 1999.
- [3] Abbasi, T., Abbasi, S. A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management, *Journal of Hazardous Materials* 141 (2007) 489-519, Elsevier.
- [4] <http://www.airliquide.com/>, 21 de Diciembre de 2013
- [5] Casal J., M. Salla J. M. Using liquid superheating energy for a quick estimation of overpressure in BLEVE and similar explosions, *Journal of Hazardous Materials A* 137 (2006) 1321-1327, Elsevier.
- [6] Planas-Cuchi, E., Salla, J. M., Casal, J. Calculating overpressure from BLEVE explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17 (2004) 431-436, Elsevier.
- [7] Birk, A. M., Davison, C., Cuningham, M. Blast overpressure from medium scale BLEVE test. *J. Loss Prev. Process Ind.* 20 (2007), 194-206.
- [8] Committee for the Prevention of Disasters, *Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquid and gases) – Yellow Book, CPR14E, 3<sup>rd</sup> ed.* The Hague (Netherlands) 1997.
- [9] Roberts, M. W. Analysis of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Events at DOE sites. Safety Analysis Working Group (SAWG) Workshop, April 28 – May 4, 2000.
- [10] Prugh, R. W. Quantitative Evaluation of “BLEVE” Hazards. *Journal of Fire Protection Engineering* 1991, 3.9.
- [11] Perry, R. H., Green, D. W., *Manual del Ingeniero Químico, Vol.I, 7a edició*, Ed. Mac Graw Hill. New York, 2002.

- [12] Guía técnica: zona de planificación para accidentes graves de tipo térmico, en el ámbito del real decreto 1254/99 [Seveso II], Dirección General de Protección Civil Ministerio del Interior, Universidad de Murcia, 2002
- [13] Laboureur, D. Experimental characterization and modeling of hazards: BLEVE and boilover. PhD thesis. Ecole Polytechnique de Bruxelles. Bruxelles, 2014.
- [14] Galán, S. Explosión de equipos a presión. Análisis de riesgos y consecuencias. PFC, Facultad de Náutica-UPC. Barcelona, 2009.
- [15] [www.emeraldinsight.com/0965-3562.htm](http://www.emeraldinsight.com/0965-3562.htm), 10.01.2014.
- [16] Bubbico, R., Marchini, M. Assessment of an explosive LPG release accident: A case study. Journal of Hazardous Materials 155 (2008)-558-565 .
- [17] Laboureur, D., Heymes, F., Lapebie, E., Buchlin, J. M., Rambaud, P. BLEVE Overpressure: Multiscale Comparison of Blast Wave Modeling. AIChE, Process Safety Progress (Vol.00, No.00), 2013.
- [18] Tugnoli, A., Milazzo, M., Landucci, G., Cozzani, V., Maschio, G. Assessment of the hazard due to fragment projection: A case study, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 28 (2014) 36-46, Elsevier.
- [19] [http://www.unizar.es/quiar/1/Accident/An\\_conse/BLEVE.htm](http://www.unizar.es/quiar/1/Accident/An_conse/BLEVE.htm), 20.02.2014
- [20] <http://www.contraincendioonline.com/operaciones/bleve2.php3> 21.02.2014
- [21] <http://www.contraincendioonline.com/operaciones/bleve2.php3> 5.03.2014
- [22] Planas-Cuchi, E., Gasulla, N., Ventosa, A., Casal, J. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17 (2004) 315-321, Elsevier.

## Bibliografía complementaria

- I. Martínez, Termodinámica básica y aplicada, Dossat SA. 1992
- J. A. Rodríguez Renuncio, J.J: Ruiz Sánchez y J.S. Urieta Navarro, Termodinámica Química. Síntesis, 1998.
- I.N. Levine, Fisicoquímica, 5a edición, volumen 1, 2004, MacGraw-Hill Inc./Interamericana de España, S.A.U.
- P. Atkins and J. de Paula, Physical Chemistry, 8a Edition, Oxford U.P. 2006

- Salla, J. M. Demichela, M., Casal, J. BLEVE: A new approach to the superheat limit temperature, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 19 (2006) 690-700, Elsevier.
- Tôrôk, Z., Ajtai, N., Turcu, A. T., Ozunu, A. comparative consequence analysis of the BLEVE phenomena in the context on Land Use Planning; case study: The Feyzin accident. *Process Safety and Environmental Protection* 89 (2011) 1-7, IChem.
- Y. W. Gong, W. S. Lin, A. Z. Gu, X. S. Lu, A simplified model to predict the thermal response of PLG and its influence on BLEVE. *Journal of Hazardous Materials A* 108 (2004) 21-26, Elsevier.
- Pinhasi, G. A., Ullmann, A., Dayan, A. 1 D plane numerical model for boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE). *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 4780-4795, Elsevier.

## 10. Anexos I

### 10.1. Cálculos previos correspondientes a los modelos seleccionados

En este apartado se realizan los cálculos previos de cada modelo, con la finalidad de poder llevar a cabo la estimación de la sobrepresión.

#### 10.1.1. Modelo de Prugh

Para este modelo se emplea los datos del Anexo III y de la referencia bibliográfica:

$$C_{p,propano} = 1,6848 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$C_{v,propano} = 1,283 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$C_{p,metano} = 2,2315 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

$$C_{v,metano} = 1,7079 \text{ kJ/kg} \cdot K$$

#### 10.1.2. Modelo de Roberts

Para este modelo se emplean los datos del Anexo III:

$$M_{\text{líquido, propano}} = 500 \text{ kg}$$

$$M_{\text{vapor, propano}} = 1 \text{ m}^3 \cdot 21,74 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 260,88 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} u_{\text{líquido, propano } 1} &= h_{\text{líquido,1}} - P_1 \cdot v_{\text{líquido,1}} \\ &= 170,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left[ 10,01 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^4 \text{ cm}^2}{\text{m}^2} \cdot 2,044 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,8105 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \\ &= 168,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{\text{líquido, propano 2}} &= h_{\text{líquido,2}} - P_2 \cdot v_{\text{líquido,2}} \\
 &= 0,1908 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 &\quad - \left[ 1,017 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^4 \text{cm}^2}{\text{m}^2} \cdot 1,7209 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,8105 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \\
 &= \mathbf{0,0191} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{\text{vapor, propano 1}} &= h_{\text{vapor,1}} - P_1 \cdot v_{\text{vapor,1}} \\
 &= 502,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left[ 10,01 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^4 \text{cm}^2}{\text{m}^2} \cdot 4,599 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,8105 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \\
 &= \mathbf{457,53} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{\text{vapor, propano 2}} &= h_{\text{vapor,2}} - P_2 \cdot v_{\text{vapor,2}} \\
 &= 425,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - \left[ 1,017 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{10^4 \text{cm}^2}{\text{m}^2} \cdot 0,4120 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 9,8105 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right] \\
 &= \mathbf{384,39} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

De forma análoga se calcula para el caso 2 (metano).

### 10.1.3. Modelo de planas-Cuchi

$$u_{\text{total antes de la explosión caso 1}} = m_{\text{líquido, propano 1}} \cdot u_{\text{líquido propano 1}} + m_{\text{vapor propano 1}} \cdot u_{\text{vapor propano 1}}$$

$$500 \text{ kg} \cdot 168,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 260,88 \text{ kg} \cdot 457,53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 203,81 \text{ MJ}$$

$$u_{\text{total antes de la explosión caso 2}} = m_{\text{líquido, propano 1}} \cdot u_{\text{líquido propano 1}} + m_{\text{vapor propano 1}} \cdot u_{\text{vapor propano 1}}$$

$$17500 \text{ kg} \cdot -165,83 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 108,86 \text{ kg} \cdot 205,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = -2879,69 \text{ MJ}$$

#### 10.1.4. Modelo de Casal-Salla

Para poder determinar la onda de sobrepresión es necesario calcular previamente la cantidad de propano (caso 1) y metano (caso 2) que contiene en el tanque, con la ayuda de los datos del Anexo III:

$$M_{\text{líquido, propano}} = 500 \text{ kg}$$

$$M_{\text{vapor, propano}} = 1 \text{ m}^3 \cdot 21,74 \text{ kg/m}^3 = 260,88 \text{ kg}$$

$$M_{\text{líquido, metano}} = 47,6 \text{ m}^3 \cdot 367,65 \text{ kg/m}^3 = 17500 \text{ kg}$$

$$M_{\text{vapor, metano}} = 8,4 \text{ m}^3 \cdot 12,96 \text{ kg/m}^3 = 108,86 \text{ kg}$$

# 11. Anexo II

## 11.1. Hoja de cálculo “Explosión BLEVE”

En la siguiente sección se realiza una explicación más extensa de cómo se debe utilizar la herramienta informática programada, para la determinación de la sobrepresión en un accidente “BLEVE”. Asimismo, se presentan todas las macros creadas para este programa.

### 11.1.1. Guía del usuario

Para iniciar el programa se debe abrir el libro de cálculo “Explosión BLEVE”. Se trabaja en la hoja “Datos”, donde se han de introducir todos los parámetros necesarios para la estimación de la sobrepresión. En esta hoja se puede encontrar una lista de modelos de aplicación y un botón para calcular la sobrepresión o la distancia escalada, dependiendo del modelo de interés.

Una vez se hayan introducido los datos, en la Figura 1 hay una celda situada debajo de cada modelo que actúa de contador (éste se debe reiniciar siempre con un número 3 para su posterior uso en la hoja “Resultados”). A la derecha se puede apreciar un botón “Calcular”, mediante el cual se llamará a todas las subrutinas de cada modelo para la determinación de la sobrepresión; a medida que se vaya utilizando este botón, el número de la casilla contador se irá incrementando.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Datos Comunes	Coef. Calor Específico del Vapor $\gamma$	Presión Atmosférica (bar)	Distancia Evaluación (m)	Temperatura Crítica (K)	Presión Crítica (bar)	Presión Rotura (bar)			Modelo Prugh		Calcular		
2			1	180	369,89	42,51	19,07							
3	Modelo Prugh	Entalpía Vapor 1 (kJ/kg)	Entalpía líquido 1 (kJ/kg)	Calor Específico Cp (kJ/kg·K)	Temperatura Ebullición ambiente (K)	Temperatura Ruptura (K)	volumen Vapor 1 (m <sup>3</sup> )	volumen Líquido 1 (m <sup>3</sup> )	Densidad Vapor 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Líquido 1 (kg/m <sup>3</sup> )	volumen (m <sup>3</sup> )	Cp	Entalpía de vaporación (kJ/kg)	
4	4	525,2	253,4	2,4	231,1	328,15	50	200	43,81	438,2	250	2,105	430	
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
38														
39														
40														

Figura. 1 Hoja de cálculo “Datos”.



En la Figura 2 se ha representado la hoja de cálculo “Resultados”, donde se recopilan todos los resultados generados por la hoja “Datos”. Se puede ver que hay una cabecera para cada modelo (distancia, resultado de interés en función del modelo elegido y sobrepresión), con lo cual, los resultados calculados se deben iniciar en la fila 3 de esta hoja; por este motivo la celda contador se debe iniciar con el número 3, tal como había mencionado anteriormente.

1	Modelo Prugh			Modelo Casal Expansión Isoentrópica			Modelo Casal Expansión Irreversible			Modelo Birk		Modelo Roberts			Modelo Planas Cuchi			M
2	Distancia (m)	Distancia escalada m/kg <sup>1/2</sup>	Sobrepresión Pa	Distancia (m)	Distancia escalada m/kg <sup>1/2</sup>	Sobrepresión Pa	Distancia (m)	Distancia escalada m/kg <sup>1/2</sup>	Sobrepresión Pa	Distancia (m)	Sobrepresión Pa	Distancia (m)	Distancia escalada m/kg <sup>1/2</sup>	Sobrepresión Pa	Distancia (m)	Distancia escalada m/kg <sup>1/2</sup>	Sobrepresión Pa	Distancia (m)
3	180	26,1959	4000	180	26,7619	4200	180	37,7198	2800			180	5,4479	12200				
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		

Figura. 2 Hoja de cálculo “Resultados”.

Para reiniciar el programa, tan sólo se tienen que borrar todos los resultados recopilados de la hoja “Resultados” y empezar con el número 3 en la hoja de “Datos”.

### 11.1.2. Listado de Macro

Comando	Descripción
Datos	En este Tab se deben introducir todos los datos de la sustancia implicada en un fenómeno BLEVE
Resultados	En este Tab se recopilan los resultados de forma automática para un fenómeno BLEVE.

ComboBox	Este comando proporciona una lista de los modelos disponibles para la estimación de un caso BLEVE.
Calcular	En este comando están implantados todos los modelos y todas las funciones auxiliares para poder llevar a cabo la estimación, es decir, Macros.
Casal-Salla expansión Isoentrópica	Esta macro proporciona la sobrepresión de un caso BLEVE, considerado como una expansión isoentrópica.
Casal-Salla expansión Irreversible	Esta macro proporciona la sobrepresión de un caso BLEVE, considerado como una expansión irreversible.
Sobrepresión Prugh	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Prugh.
Sobrepresión Planas-Cuchi	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Planas-Cuchi.
Sobrepresión Birk	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de Birk.
TNO	Esta macro proporciona el valor de la sobrepresión basándose en el modelo de TNO

**Figura. 3** Cuadro de resumen de las macros utilizados en la herramienta de cálculo “Explosión BLEVE”.

A continuación se presenta una lista de todas las macros programadas en el entorno Visual Basic.

**Macro: "ComboBox1\_Change"**

```
Private Sub ComboBox1_Change()  
  
    If ComboBox1.Value = "Modelo Prugh" Then  
  
        ActiveSheet.Rows("3:4").Hidden = False  
  
        ActiveSheet.Rows("5:16").Hidden = True  
  
    End If  
  
    If ComboBox1.Value = "Casal Exp. Iso" Then  
  
        ActiveSheet.Rows("5:6").Hidden = False  
  
        ActiveSheet.Rows("3:4").Hidden = True  
  
        ActiveSheet.Rows("7:16").Hidden = True  
  
    End If  
  
    If ComboBox1.Value = "Casal Exp. Irrev" Then  
  
        ActiveSheet.Rows("7:8").Hidden = False  
  
        ActiveSheet.Rows("3:6").Hidden = True  
  
        ActiveSheet.Rows("9:16").Hidden = True  
  
    End If  
  
    If ComboBox1.Value = "Modelo Birk" Then  
  
        ActiveSheet.Rows("9:10").Hidden = False  
  
        ActiveSheet.Rows("3:8").Hidden = True  
  
        ActiveSheet.Rows("11:16").Hidden = True  
  
    End If
```

```
If ComboBox1.Value = "Modelo TNO" Then
```

```
    ActiveSheet.Rows("11:12").Hidden = False
```

```
    ActiveSheet.Rows("3:10").Hidden = True
```

```
    ActiveSheet.Rows("13:16").Hidden = True
```

```
End If
```

```
If ComboBox1.Value = "Modelo Roberts" Then
```

```
    ActiveSheet.Rows("13:14").Hidden = False
```

```
    ActiveSheet.Rows("3:12").Hidden = True
```

```
    ActiveSheet.Rows("15:16").Hidden = True
```

```
End If
```

```
If ComboBox1.Value = "Modelo Planas-Cuchi" Then
```

```
    ActiveSheet.Rows("15:16").Hidden = False
```

```
    ActiveSheet.Rows("3:14").Hidden = True
```

```
End If
```

```
End Sub
```

### **Macro: "CommandButton1 Click()**

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    If ComboBox1.Value = "Modelo Prugh" Then
```

```
        Worksheets("Resultados").Cells(Cells(4, 1), 2) = DistanciaEscaladaPrugh(Cells(4, 4),  
Cells(4, 12), Cells(4, 5), Cells(2, 5), Cells(4, 6), Cells(4, 10), Cells(4, 9), Cells(4, 7), Cells(4,  
11), Cells(2, 7), Cells(2, 3), Cells(2, 4), Cells(4, 2), Cells(4, 3))
```

```
        Worksheets("Resultados").Cells(Cells(4, 1), 1) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)
```

```
        Cells(4, 1) = Cells(4, 1) + 1
```

```
    End If
```

If ComboBox1.Value = "Casal Exp. Iso" Then

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(6, 1), 5) = CasalExpansionIso(Cells(6, 2), Cells(6, 3), Cells(2, 7), Cells(2, 6), Cells(6, 4), Cells(2, 4), Cells(6, 5))

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(6, 1), 4) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)

Cells(6, 1) = Cells(6, 1) + 1

End If

If ComboBox1.Value = "Casal Exp. Irrev" Then

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(8, 1), 8) = CasalExpansionIR(Cells(8, 2), Cells(8, 3), Cells(2, 7), Cells(2, 6), Cells(8, 4), Cells(2, 4), Cells(8, 5))

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(8, 1), 7) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)

Cells(8, 1) = Cells(8, 1) + 1

End If

If ComboBox1.Value = "Modelo Birk" Then

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(10, 1), 11) = SobrepresionBirk(Cells(10, 2), Cells(10, 3), Cells(10, 4), Cells(2, 4), Cells(2, 3))

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(10, 1), 10) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)

Cells(10, 1) = Cells(10, 1) + 1

End If

If ComboBox1.Value = "Modelo TNO" Then

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(12, 1), 19) = TNO(Cells(12, 2), Cells(12, 4), Cells(12, 5), Cells(12, 3), Cells(12, 6), Cells(12, 7), Cells(2, 4), Cells(2, 3))

Worksheets("Resultados").Cells(Cells(12, 1), 18) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)

Cells(12, 1) = Cells(12, 1) + 1

End If

If ComboBox1.Value = "Modelo Planas-Cuchi" Then

```
Worksheets("Resultados").Cells(Cells(16, 1), 16) = DistanciaEscaladaPlanasCuchi(Cells(16,
2), Cells(16, 3), Cells(16, 4), Cells(16, 5), Cells(16, 6), Cells(16, 7), Cells(2, 1), Cells(2, 4),
Cells(16, 8))
```

```
Worksheets("Resultados").Cells(Cells(16, 1), 15) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)
```

```
Cells(16, 1) = Cells(16, 1) + 1
```

```
End If
```

```
If ComboBox1.Value = "Modelo Roberts" Then
```

```
Worksheets("Resultados").Cells(Cells(14, 1), 13) = DistanciaEscaladaRoberts(Cells(14,
2), Cells(14, 3), Cells(14, 4), Cells(14, 5), Cells(14, 6), Cells(14, 7), Cells(14, 8), Cells(14, 9),
Cells(14, 10), Cells(14, 11), Cells(2, 4), Cells(2, 3))
```

```
Worksheets("Resultados").Cells(Cells(14, 1), 12) = Worksheets("Datos").Cells(2, 4)
```

```
Cells(14, 1) = Cells(14, 1) + 1
```

```
End If
```

```
End Sub
```

### **Macro: "SobrepresionBirk"**

```
Public Function SobrepresionBirk(mVapor, uVapor1, uVapor2, r, Patm As Double)
```

```
EBirk = mVapor * (uVapor1 - uVapor2)
```

```
mBirkTNT = 2 * 0.000214 * EBirk
```

```
dBirk = r / (mBirkTNT) ^ (1 / 3)
```

```
SobrepresionBirk = Patm * ((808 * (1 + (dBirk / 4.5) ^ 2)) / (((1 + (dBirk / 0.048) ^ 2)) ^ (1 /
2) * ((1 + (dBirk / 0.32) ^ 2)) ^ (1 / 2) * ((1 + (dBirk / 1.35) ^ 2)) ^ (1 / 2)))
```

```
End Function
```

### **Macro: "CasalExpansionIso"**

```
Public Function CasalExpansionIso(HLiquid1, HLiquid2, Prupt, Pc, mLiquid, r, mTot As
Double)
```

```
SE = HLiquid1 - HLiquid2
```

If Prupt < Pc Then

$$mTNT\_Casal = 0.000214 * 0.14 * mLiquid * SE$$

Elseif Prupt > Pc Then

$$mTNT\_Casal = 0.000214 * 0.14 * mTot * SE$$

End If

$$CasalExpansionIso = r / (mTNT\_Casal) ^ (1 / 3)$$

End Function

### **Macro: "CasalExpansionIR"**

Public Function CasalExpansionIR(HLiquid1, HLiquid2, Prupt, Pc, mLiquid, r, mTot As Double)

$$SE = HLiquid1 - HLiquid2$$

If Prupt < Pc Then

$$mTNT\_Casal = 0.000214 * 0.05 * mLiquid * SE$$

Elseif Prupt > Pc Then

$$mTNT\_Casal = 0.000214 * 0.05 * mTot * SE$$

End If

$$CasalExpansionIR = r / (mTNT\_Casal) ^ (1 / 3)$$

End Function

### **Macro: "DistanciaEscaladaPlanasCuchi"**

Public Function DistanciaEscaladaPlanasCuchi(uLiquid2, uVapor2, mTotal, Utotal, VEspecificoVapor2, VEspecificoLiquid2, Patm, r, VDeposito As Double)

$$x = (mTotal * Patm * VEspecificoLiquid2 - VDeposito * Patm + mTotal * uLiquid2 - Utotal) / ((uLiquid2 - uVapor2) - (VEspecificoVapor2 - VEspecificoLiquid2) * Patm) * mTotal$$

$$dU = (uLiquid2 - uVapor2) * mTotal * x - mTotal * uLiquid2 + Utotal$$

$$dU = -dU$$

$$W_{TNT} = 0.4 * 0.214 * dU$$

$$\text{DistanciaEscaladaPlanasCuchi} = r / (W_{TNT})^{(1 / 3)}$$

End Function

### **Macro: "DistanciaEscaladaPrugh"**

Public Function DistanciaEscaladaPrugh(Cp\_Tb, Cv, Tb, Tc, Trupt, DLiquid, DVapor, VVapor, V, Prupt, Patm, r, HVapor\_Tb, HLiquid\_Tb As Double)

$$Hv = HVapor\_Tb - HLiquid\_Tb$$

$$f2 = 1 - \text{Exp}(-2.63 * (Cp\_Tb / Hv) * (Tc - Tb) * (1 - ((Tc - Trupt) / (Tc - Tb))^{0.38}))$$

If Prupt < Pc Then

$$VFicticia = VVapor + VLiquid * f2 * (DLiquid / DVapor)$$

Elseif Prupt > Pc Then

$$VFicticia = V$$

End If

$$\text{gamma} = Cp\_Tb / Cv$$

$$mTNTPrugh = (0.024 * Prupt * VFicticia / (\text{gamma} - 1)) * (1 - (Patm / Prupt))^{((\text{gamma} - 1) / \text{gamma})}$$

$$\text{DistanciaEscaladaPrugh} = r / (0.4 * mTNTPrugh)^{(1 / 3)}$$

End Function

**Macro: "DistanciaEscaladaRoberts"**

Public Function DistanciaEscaladaRoberts(SLiquid1, SLiquid2, SVapor1, SVapor2, mLiquid1, mVapor1, uLiquid1, uLiquid2, uVapor1, uVapor2, r, Patm As Double)

$$XLiquid1 = (SLiquid1 - SLiquid2) / (SVapor2 - SLiquid2)$$

$$XVapor1 = (SVapor1 - SLiquid2) / (SVapor2 - SLiquid2)$$

$$mLiquid2 = (1 - XLiquid1) * mLiquid1 + (1 - XVapor1) * mVapor1$$

$$mVapor2 = XLiquid1 * mLiquid1 + XVapor1 * mVapo$$

$$Eroberts = mLiquid2 * uLiquid2 + mVapor2 * uVapor2 - mLiquid1 * uLiquid1 - mVapor1 * uVapor1$$

$$Eroberts = -Eroberts$$

$$DistanciaEscaladaRoberts = r * ((100 * Patm / (2 * Eroberts)) ^ (1 / 3))$$

End Function

**Macro: "TNO"**

Public Function TNO(mLiquid, uLiquid1, uLiquid2, mVapor, uVapor1, uVapor2, r, Patm As Double)

$$ETNO = mLiquid * (uLiquid1 - uLiquid2) + mVapor * (uVapor1 - uVapor2)$$

$$dTNO = r * (100 * Patm / 2 * ETNO) ^ (1 / 3)$$

If dTNO > 2 Then

$$TNO = dTNO$$

Elseif dTNO < 2 Then

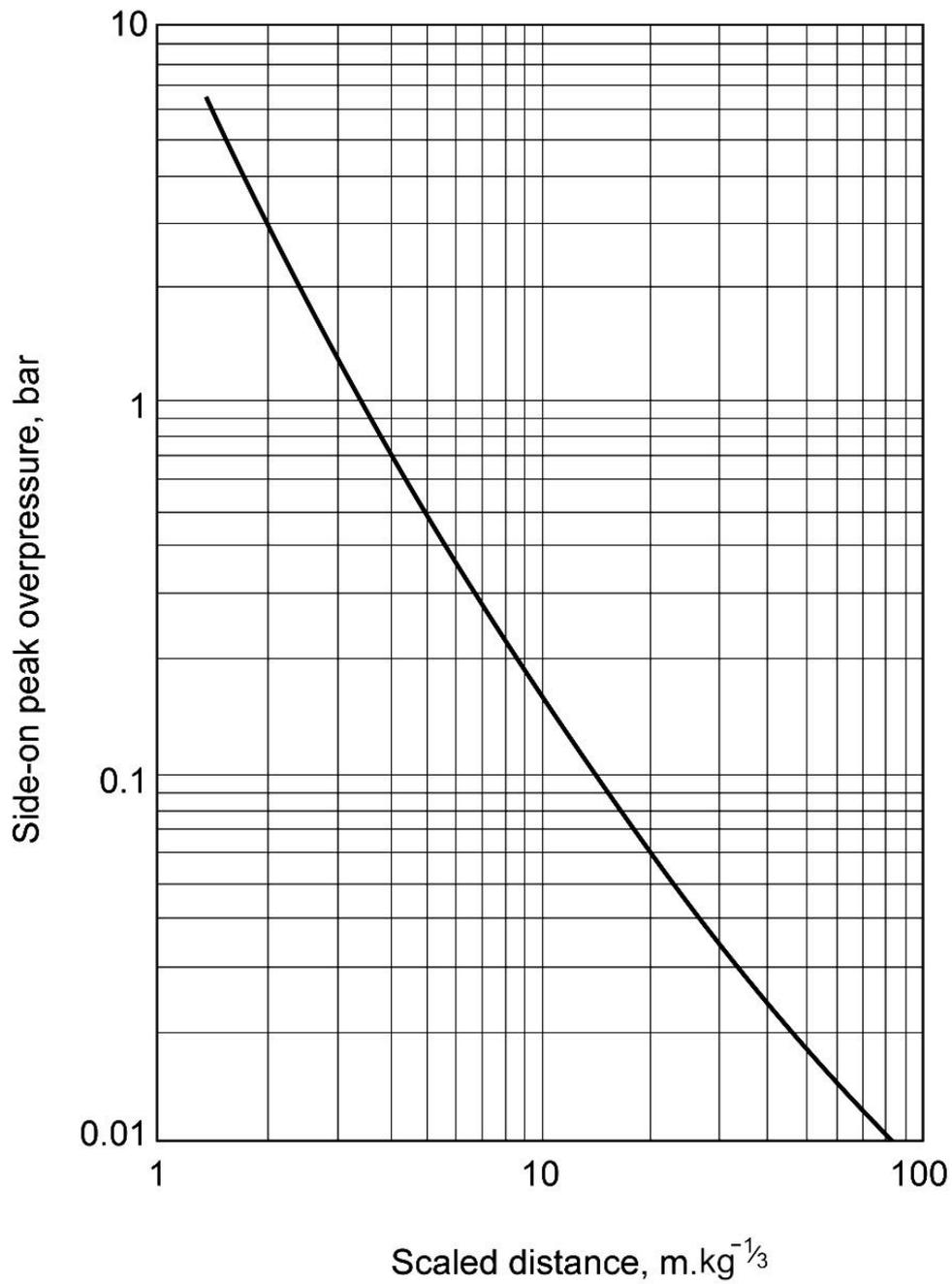
MsgBox "Debes hacer una resolución iterativa utilizando la figura 7,7 y 7,8 de Yellow Book"

End If

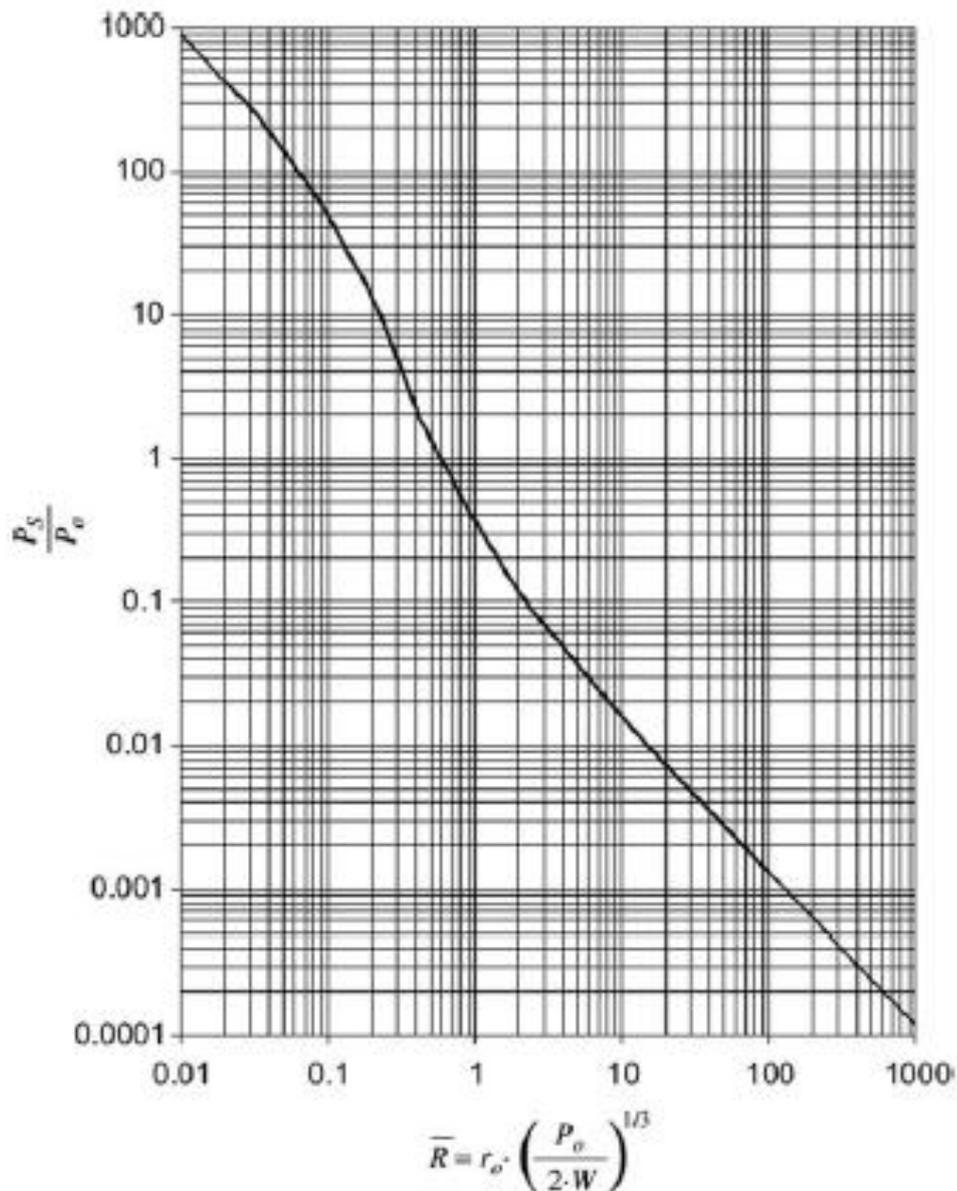
End Function

## 12. Anexo III

### 12.1. Tablas y programa auxiliar "Water97\_v13.xla"



**Figura. 4** Curva de sobrepresión para la masa de TNT equivalente.

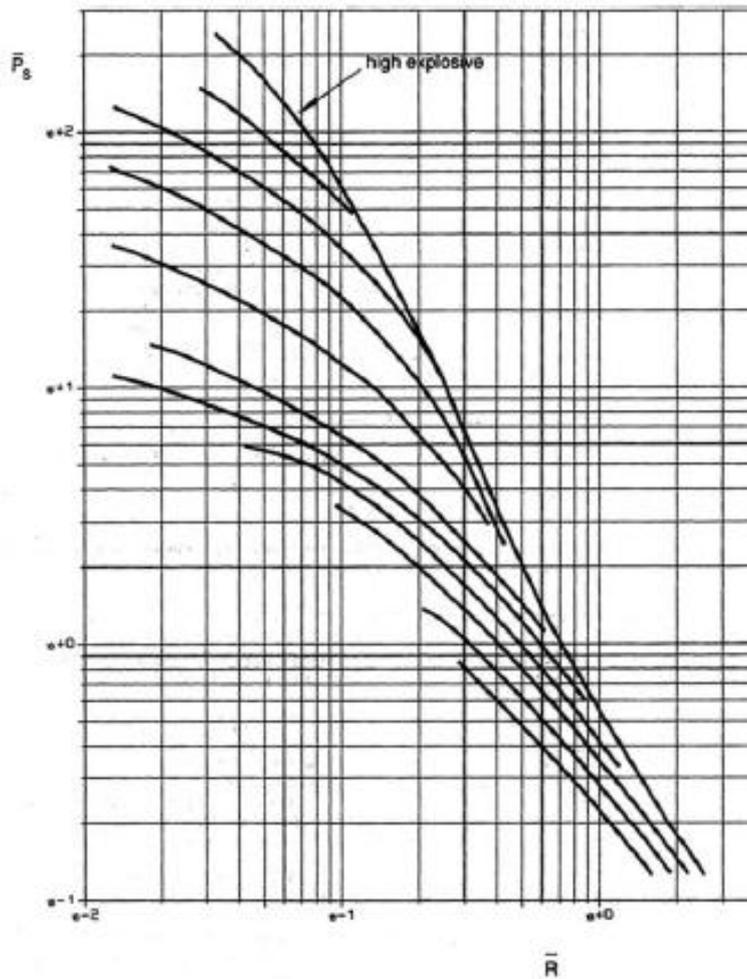


**Figura. 5** Sobrepresión vs. distancia escalada de Sachs ( $d_{TNT} > 2$ ) ( método de Roberts).

### 12.1.1. El modelo de TNO con $d < 2$ .

En este apartado se incluyen todos los gráficos necesarios para calcular la onda de sobrepresión para el modelo de TNO en caso de que la distancia escalada sea inferior a 2; tras comentar con el director de proyecto y dada la complejidad de la aplicación del método, éste se ha excluido del estudio comparativo.

No obstante, para los futuros usuarios que estén interesados en su aplicación, se han anexado todas las gráficas a continuación.



**Figura. 6** Sobrepresión Vs. distancia escalada de Sachs ( $d_{TNT} < 2$ ).

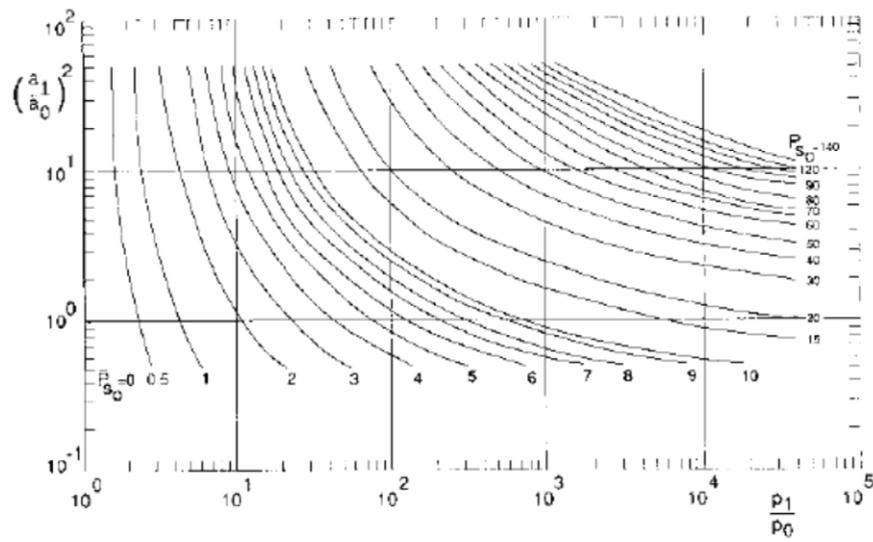


Figura. 7. Temperatura del gas vs. presión para constante  $\overline{P_{S0}}$  y  $\gamma=1,14$ , at Baker [1977].

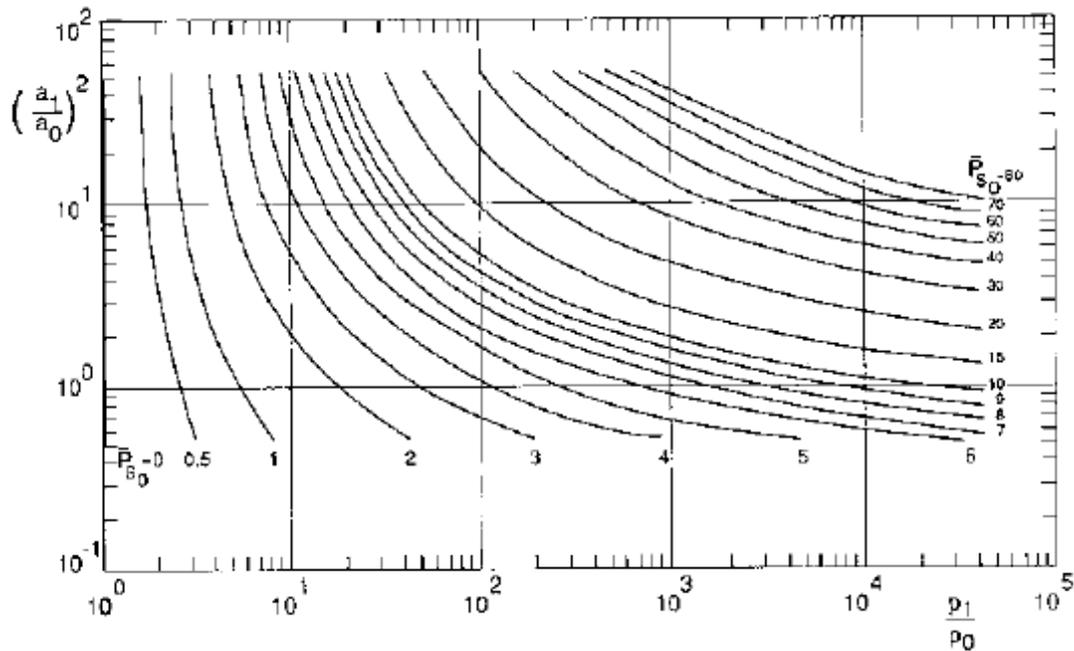


Figura. 8. Temperatura gas vs. presión para constante  $\overline{P_{S0}}$  y  $\gamma=1,66$ , at Baker [1977.]

### 12.1.2. Las propiedades termodinámicas del propano y metano

Temperatura (°C)	P absoluta (bar)	Dens. líquido (kg/m <sup>3</sup> )	Dens. vapor (kg/m <sup>3</sup> )	h <sub>L</sub> (kJ/kg)	H <sub>V</sub> (kJ/kg)
-50	0,7046	590,3	1,726	-17,67	416
-49	0,7388	589,1	1,804	-15,46	417,1
-48	0,7744	588	1,884	-13,23	418,3
-47	0,8113	586,9	1,968	-11,01	419,5
-46	0,8496	585,7	2,054	-8,779	420,7
-45	0,8893	584,6	2,143	-6,543	421,9
-44	0,9304	583,4	2,234	-4,304	423,1
-43	0,973	582,3	2,329	-2,059	424,3
-42	1,017	581,1	2,427	0,1908	425,5
-41	1,063	580	2,528	2,445	426,7
-40	1,11	578,8	2,633	4,705	427,9
-39	1,159	577,7	2,74	6,97	429,1
-38	1,209	576,5	2,851	9,239	430,3
-37	1,261	575,3	2,966	11,51	431,5
-36	1,315	574,2	3,083	13,79	432,7
-35	1,371	573	3,205	16,08	433,9
-34	1,428	571,8	3,33	18,37	435
-33	1,488	570,6	3,459	20,67	436,2
-32	1,549	569,4	3,591	22,97	437,4
-31	1,612	568,2	3,728	25,28	438,6
-30	1,677	567	3,868	27,59	439,8
-29	1,744	565,8	4,013	29,91	441
-28	1,813	564,6	4,161	32,23	442,2
-27	1,884	563,4	4,314	34,56	443,3
-26	1,957	562,2	4,471	36,9	444,5
-25	2,033	561	4,633	39,24	445,7
-24	2,11	559,8	4,798	41,58	446,9
-23	2,19	558,6	4,969	43,94	448
-22	2,272	557,3	5,144	46,3	449,2
-21	2,357	556,1	5,324	48,66	450,4
-20	2,444	554,9	5,508	51,03	451,5
-19	2,533	553,6	5,697	53,41	452,7
-18	2,625	552,4	5,892	55,8	453,9
-17	2,719	551,1	6,091	58,19	455
-16	2,815	549,9	6,296	60,58	456,2
-15	2,915	548,6	6,506	62,99	457,3
-14	3,017	547,3	6,721	65,4	458,5

-13	3,121	546,1	6,942	67,81	459,7
-12	3,228	544,8	7,168	70,24	460,8
-11	3,338	543,5	7,4	72,67	462
-10	3,451	542,2	7,638	75,1	463,1
-9	3,567	540,9	7,882	77,55	464,2
-8	3,685	539,6	8,131	80	465,4
-7	3,807	538,3	8,387	82,46	466,5
-6	3,931	537	8,649	84,92	467,7
-5	4,059	535,7	8,918	87,4	468,8
-4	4,189	534,3	9,193	89,88	469,9
-3	4,323	533	9,474	92,37	471
-2	4,46	531,7	9,762	94,86	472,2
-1	4,6	530,3	10,06	97,36	473,3
0	4,743	529	10,36	99,87	474,4
1	4,89	527,6	10,67	102,4	475,5
2	5,039	526,2	10,99	104,9	476,6
3	5,193	524,9	11,31	107,5	477,7
4	5,349	523,5	11,64	110	478,8
5	5,51	522,1	11,98	112,5	479,9
6	5,673	520,7	12,33	115,1	481
7	5,84	519,3	12,68	117,7	482,1
8	6,011	517,9	13,04	120,2	483,2
9	6,186	516,5	13,42	122,8	484,2
10	6,346	515	13,8	125,4	485,3
11	6,546	513,6	14,18	128	486,4
12	6,732	512,2	14,58	130,6	487,4
13	6,922	510,7	14,99	133,3	488,5
14	7,116	509,2	15,4	135,9	489,5
15	7,313	507,8	15,83	138,5	490,6
16	7,515	506,3	16,26	141,2	491,6
17	7,72	504,8	16,71	143,8	492,7
18	7,93	503,3	17,16	146,5	493,7
19	8,144	501,8	17,63	149,2	494,7
20	8,362	500,3	18,1	151,9	495,7
21	8,585	498,7	18,59	154,6	496,7
22	8,812	497,2	19,08	157,3	497,7
23	9,043	495,6	19,59	160	498,7
24	9,278	494,1	20,11	162,7	499,7
25	9,518	492,5	20,64	165,4	500,7
26	9,763	490,9	21,18	168,2	501,7
27	10,01	489,3	21,74	170,9	502,7
28	10,27	487,7	22,3	173,7	503,6

29	10,52	486,1	22,88	176,5	504,6
30	10,79	484,4	23,48	179,3	505,5
31	11,05	482,8	24,08	182,1	506,4
32	11,33	481,1	24,7	184,9	507,4
33	11,61	479,4	25,34	187,7	508,3
34	11,89	477,7	25,99	190,6	509,2
35	12,18	476	26,65	193,4	510,1
36	12,47	474,3	27,33	196,3	510,9
37	12,77	472,6	28,03	199,2	511,8
38	13,07	470,8	28,74	202,1	512,7
39	13,38	469,1	29,46	205	513,5
40	13,69	467,3	30,21	207,9	514,4
41	14,01	465,5	30,97	210,8	515,2
42	14,33	463,7	31,75	213,8	516
43	14,66	461,8	32,55	216,7	516,8
44	15	460	33,37	219,7	517,6
45	15,34	458,1	34,2	222,7	518,4
46	15,69	456,2	35,06	225,7	519,1
47	16,04	454,3	35,94	228,7	519,9
48	16,4	452,4	36,84	231,7	520,6
49	16,76	450,4	37,76	234,8	521,3
50	17,13	448,4	38,71	237,8	522
51	17,5	446,4	39,67	240,9	522,7
52	17,89	444,4	40,67	244	523,4
53	18,27	442,4	41,69	247,1	524
54	18,67	440,3	42,73	250,3	524,6
55	19,07	438,2	43,81	253,4	525,2
56	19,47	436,1	44,91	256,6	525,8
57	19,89	433,9	46,04	259,8	526,4
58	20,3	431,7	47,2	263	526,9
59	20,73	429,5	48,39	266,2	527,4
60	21,16	427,3	49,62	269,5	527,9

**Tabla 2.** Datos termodinámicos del propano [11].

Presión( bar)	Tª( K)	Vol. liquido esp (m <sup>3</sup> /kg)	Vol. V esp (m <sup>3</sup> /kg)	h <sub>l</sub> (kJ/kg)	H <sub>v</sub> (kJ/kg)	Dens. liquido (kg/m <sup>3</sup> )	Dens. vapor (kg/m <sup>3</sup> )
1	115	0,0024	0,4305	-274,7	229,4	418,4100	2,3230
8	145	0,0027	0,0772	-163,7	265,7	367,6471	12,9601

---

**Tabla 2.** Datos termodinámicos del metano [11].

### 12.1.3. Water97\_v13.xla

A continuación se hace una breve descripción del programa Water97, dado que es un programa libre encontrado en la web, que proporciona toda la información necesaria para el agua, con todas sus propiedades termodinámicas (diagrama de Mollier).

Este programa permite obtener los datos termodinámicos del agua a una presión dada (Caso 2), tales como la entalpía de saturación, densidades, entropía, etc.

Al tratarse de una herramienta libre, se incluye a continuación el manual en PDF:

## Water97\_v13.xla – Excel Add-In for Properties of Water and Steam in SI-Units

Version 1.3 – 10 February 2002, documentation updated

Version 1.2 – 6 February 2001, numerical values in densreg3 adjusted

Version 1.1 – 29 January 2001, error in the calculation of thermal conductivity (partial derivatives) corrected.

Version 1.0 – 27 August 2000

Authored by Bernhard Spang, Hamburg, Germany  
URL: <http://www.cheresources.com/staff.shtml>  
Email: [b.spang@hamburg.de](mailto:b.spang@hamburg.de)

Copyright 2000-2002 by Bernhard Spang. All rights reserved.  
May be redistributed for free, but may not be changed or sold without the author's explicit permission.  
Provided "as is" without warranty of any kind.

### Introduction

Water97\_v13.xla is an Add-In for MS Excel which provides a set of functions for calculating thermodynamic and transport properties of water and steam using the industrial standard IAPWS-IF97. For more information about IAPWS-IF97, underlying equations and references see

<http://www.cheresources.com/iapwsif97.shtml>

### Installation

The functions are provided as an Add-In file (water97\_v13.xla) for MS Excel. After downloading and decompressing the archive file which contains "water97\_v13.xla" you may load "water97\_v13.xla" in Excel every time you need it by going to Tools...Add-ins or by simply double clicking on "water97\_v13.xla" in Explorer. The water property functions are then available just like built-in functions. In the function Wizard list they can be found under User Defined. See also the documentation for MS Excel for more information about add-in files.

### Reference of available functions

Functions are available for calculating the following properties in the single-phase state for temperatures  $273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K}$  and pressures  $0 < p \leq 1000 \text{ bar}$

- density
- specific internal energy
- specific enthalpy
- specific entropy
- specific isobaric heat capacity
- specific isochoric heat capacity
- dynamic viscosity
- thermal conductivity

Additionally there are functions for calculating the boiling point temperature as a function of pressure and