

**ESTUDIO DE LA ONDA DE PRESIÓN Y LA RADIACIÓN TÉRMICA  
PRODUCIDA POR LA EXPLOSIÓN TIPO BLEVE (Explosión de Vapores en  
Expansión y Líquidos en Ebullición) EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO  
DE GLP**

**DIANA CATALINA CRUZ CEBALLOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**ESTUDIO DE LA ONDA DE PRESIÓN Y LA RADIACIÓN TÉRMICA  
PRODUCIDA POR LA EXPLOSIÓN TIPO BLEVE (Explosión de Vapores en  
Expansión y Líquidos en Ebullición) EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO  
DE GLP**

**DIANA CATALINA CRUZ CEBALLOS**

**Trabajo de Grado para optar al Título de  
Ingeniero Químico**

**Directores:**

**Ph.D. M. SAM MANNAN**

**Texas A & M University**

**PhD HUMBERTO ESCALANTE**

**Universidad Industrial de Santander**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

A mi familia por el apoyo incondicional durante toda la carrera y la confianza que siempre han tenido en mis proyectos. A mis amigos por hacer de mi época universitaria una muy memorable. A mis profesores, directores de proyecto por toda su colaboración y enseñanzas.

Diana Catalina Cruz

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Sam Mannan y al Dr. Humberto Escalante por haber dirigido éste proyecto. A la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander y la de Texas A&M por la oportunidad de ingresar en el convenio como miembro del Mary Kay O'connor Process Safety Center. A todos los compañeros y amigos del centro, y egresados UIS en Texas por su colaboración, amabilidad y consejos durante el transcurso de la pasantía.

Al Dr. Hans Pasman por toda su colaboración durante la realización del proyecto, siendo guía de su desarrollo. Al Dr. Alvaro Ramírez por todo su apoyo.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. MARCO TEORICO .....	3
1.1 TERMINAL DE PEMEX. ....	3
1.2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL DESASTRE.....	4
1.3. GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP).....	5
1.3.1. Riesgos del GLP. ....	5
1.4. BLEVE .....	6
1.4.1. Definición .....	6
1.4.2. Causas.....	7
1.4.3. Cuando una explosión califica como BLEVE. ....	7
1.4.4. Mecanismo de una BLEVE .....	7
1.4.5. Consecuencias de la BLEVE .....	8
1.5. BOLA DE FUEGO.....	8
1.6 ONDA DE SOBREPRESIÓN.....	9
2 METODOLOGÍA .....	10
2.1 PROCEDIMIENTOS USADOS POR LA TNO (1985) .....	10
2.1.1. Bola de fuego.....	10
2.1.2. Onda de presión.....	12
2.2 PROCEDIMIENTOS ACTUALES.....	12
2.2.1. Bola de fuego.....	12
2.2.2. Onda de sobrepresión.....	15
2.2.3. Respuestas de la población ante los incidentes. ....	18

3. CALCULOS Y RESULTADOS .....	20
3.1. BOLA DE FUEGO.....	20
3.1.1. Comparación de los métodos. ....	24
3.2. ONDA DE SOBREPRESIÓN .....	27
3.2.1. Comparación.....	28
CONCLUSIONES .....	31
BIBLIOGRAFIA .....	33

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Instalaciones de la planta. [1] .....	3
Figura 2. Curva de Presión de Vapor/Temperatura para propano y butano comercial. [5].....	6
Figura 3. Diagrama P-v. [10] (R.C. Reid)	
Figura 4. Diagrama P-T. [10] (R.C. Reid).....	8
Figura 5. Onda de presión de un BLEVE (D.M. Johnson, J.M. Pritchard and M.J. Wickens)[10] .....	9
Figura 6. Metodología. ....	10
Figura 7 Dosis recibida por las diferentes superficies del objetivo.....	21
Figura 8. Dosis y radiación termal sobre una superficie vertical. ....	21
Figura 9. Cambio de los parámetros con el tiempo.....	22
Figura 10. Radiación a $x=300m$ , $f(t)$ .	
Figura 11. Radiación promedio, $f(x)$ .....	23
Figura 12. Resultado, método TNO [13]	
Figura 13. Resultado, método DNV.[13] .....	23
Figura 14. Comparación del valor de la dosis para cada método. ....	24
Figura 15. Diagrama de propano, localización de los cuatro estados. Refprop ....	27
Figura 16. Sobrepresión usando curvas de TNT y el método Planas-Cuchi.....	28
Figura 17. Contornos de sobrepresión sobre las instalaciones de PEMEX. ....	29
Figura 18. Sobrepresión calculada de las graficas de propano. ....	29
Figura 19. Método usado por la TNO en el reporte de 1985.[1].....	37
Figura 20. Dimensiones de la bola de fuego. [10].....	39
Figura 21. Crecimiento de la bola de fuego [10] .....	40
Figura 22. Dimensiones de uno de los planos circulares [13].....	42
Figura 23. Parámetros usados para cálculo del factor geométrico.[13] .....	42
Figura 24. Validación del método propuesto por A.C. Berg. [19] .....	44
Figura 25. Gráfico para propano propuesto por A.C. Berg.[19].....	44
Figura 26. Distribución normal. [10] .....	45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de tanques. [1].....	3
Tabla 2. Distancias resultantes del reporte vs distancias resultantes método A....	25
Tabla 3. Distancias resultantes del reporte vs distancias resultantes método B....	25
Tabla 4. Verificación de la zona de validación. ....	29
Tabla 5. Distancia del daño por sobrepresión.....	30
Tabla 6. Características de la bola de fuego [1].....	36
Tabla 7. Efectos de la bola de fuego [1].....	36
Tabla 8. Sobrepresion causada por la expansion del vapor [3] .....	38
Tabla 9. Sobrepresión calculada por la evaporación del líquido [1] .....	38
Tabla 10. Conversión de unidades de probit a porcentajes.[3] .....	45
Tabla 11. Densidad del GLP. ....	46
Tabla 12. Características de la bola de fuego_1.....	46
Tabla 13. Características de la bola de fuego_2.....	47
Tabla 14. Condiciones meteorológicas, Noviembre 19, 1984. [25].....	47
Tabla 15. Tomada de la tabla de presiones de falla para diferentes situaciones.[11] .....	47
Tabla 16. Caracterización de los cuatro estados. ....	51
Tabla 17. Descripción de los cuatro estados. ....	51
Tabla 18. Energía de explosión. Phast. ....	52

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1- Procedimientos usados por la TNO.....	36
Anexo 2. Procedimientos actuales.....	39
Anexo 3. Cálculos y resultados.....	46

## RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA ONDA DE PRESIÓN Y LA RADIACIÓN TÉRMICA PRODUCIDA POR LA EXPLOSIÓN TIPO BLEVE (Explosión de Vapores en Expansión y Líquidos en Ebullición) EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE GLP\*

AUTOR: Diana Catalina Cruz Ceballos\*\*

PALABRAS CLAVES: Explosión de vapores en expansión y líquidos en ebullición, BLEVE, gas licuado de petróleo, GLP, consecuencias de explosiones. Respuesta a la dosis térmica. Respuesta a la sobrepresión, onda de presión, radiación, bola de fuego.

### DESCRIPCIÓN:

Los desastres en terminales de almacenamiento de gases licuados como el propano han dejado consecuencias atroces a lo largo de la historia, siendo causas de numerosas pérdidas humanas, no solamente dentro del establecimiento, sino también en zonas residenciales aledañas. Por esta razón durante la realización del montaje de un terminal se debe presupuestar entre otros aspectos, la compra de una cantidad prudente de terreno, que tendrá por objetivo evitar el desarrollo urbanístico de la zona para mitigación de las consecuencias en poblaciones humanas en caso de algún incidente.

El tipo de incidente analizado en este trabajo es uno de los menos frecuentes, pero de los peores que tienen probabilidad de ocurrir, se trata de la explosión de vapores en expansión y líquidos en ebullición, por siglas inglesas conocido como BLEVE. En este trabajo se realiza una comparación de los métodos usados para evaluar dos de sus efectos más importantes, la onda de presión y debido a la inflamabilidad de la sustancia, la bola de fuego formada instantes después de la explosión. Para su análisis se ha utilizado como modelo de estudio el incidente ocurrido en la planta de PEMEX en ciudad de México en 1984. La comparación de estos métodos tiene como motivación la evaluación y entendimiento de las consecuencias y del fenómeno en sí, para cálculo de distancias de riesgo que enfrenta una población en caso de ocurrencia de éste tipo de incidente.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. M. Sam Mannan; Texas A&M University y PhD. Humberto Escalante; Universidad Industrial de Santander.

## ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE BLAST WAVE AND THE THERMAL RADIATION PRODUCED BY A BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) IN STORAGE TANKS OF LPG.\*

AUTOR: Diana Catalina Cruz Ceballos\*\*

KEY WORDS: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE, Liquefied Petroleum Gas, LPG, consequence analysis, response to thermal dose, response to overpressure, blast wave, thermal radiation, fireball.

### DESCRIPTION:

Disasters in terminals storage of liquefied gases such as propane left enormous consequences throughout history, causing many casualties, not only in the work place but also in the surrounding residential areas. For this reason, during the design stage of a terminal is important to budget among other things, the purchase of a considerable area of land outside the facility, which will aim to avoid the urban development of the area to mitigate the human consequences in the event of an incident.

The type of incident discussed in this paper is one of the less frequent, but the worst of which are likely to occur in this type of facility. It is the boiling liquid expanding vapor explosion, known as BLEVE. In this report a comparison of the methods used to evaluate two of its most important effects are explained, the effects analyzed are; the pressure wave and due to the flammability of the substance, the fireball formed moments after the explosion. For this analysis the incident at the PEMEX plant in Mexico City in 1984 has been used as a case of study. The comparison of these methods is motivated with the purpose of reducing overestimation in calculations in order to lower the area and cost of land that LPG industries will have to isolate in order to enhance safety in their facilities.

---

\* Degree work

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering Department. Advisor: PhD. M. Sam Mannan; Texas A&M University and PhD. Humberto Escalante; Universidad Industrial de Santander.

## INTRODUCCIÓN

Las facilidades de almacenamiento, distribución y suministro del gas licuado de petróleo (GLP), junto con sus características caloríficas y económicas competitivas frente a otros energéticos disponibles, hacen del producto y su mercado una alternativa importante y en crecimiento.

Sin embargo, el número de fatalidades y daños de instalaciones dejadas por incidentes de explosiones relacionados con tanques de transporte y almacenamiento del GLP a lo largo de la historia, presenta una preocupación constante. La comunidad científica ha respondido a esta preocupación por medio del estudio del fenómeno explosivo, sus causas, su severidad y sus consecuencias, en busca de la generación de estrategias de protección por las cuales se logra una práctica más confiable en el manejo del producto, permitiendo el aprovechamiento continuo de sus ventajas.

Una de las estrategias recomendadas para la mitigación de daños a la población humana en terminales de almacenamiento es la inversión o compra de un área moderada de terreno alrededor del terminal, o el aislamiento de este terreno recurriendo a la proclamación de leyes que no permitan desarrollo urbanístico en las zonas aledañas a este tipo de complejos industriales.

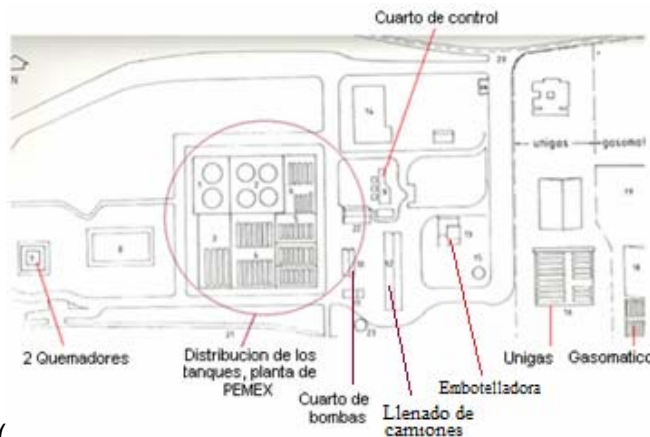
Este trabajo tiene como objetivo un mejor entendimiento de uno de los peores escenarios con probabilidad de ocurrencia en un terminal de almacenamiento de GLP. Presenta el análisis de consecuencias de una explosión de vapores en expansión y líquidos en ebullición (BLEVE) enfocada en dos de sus efectos más importantes, la onda de presión y la bola de fuego. Contiene el desarrollo de

métodos propuestos actualmente y el uso de un simulador comercial para la realización de una comparación con base a los fundamentos teóricos utilizados por cada método. Se realiza usando como modelo de estudio el accidente en la compañía de PEMEX del año 1984 y pretende evaluar las distancias de riesgo indagando en las metodologías de cálculo de efectos.

# 1. MARCO TEORICO

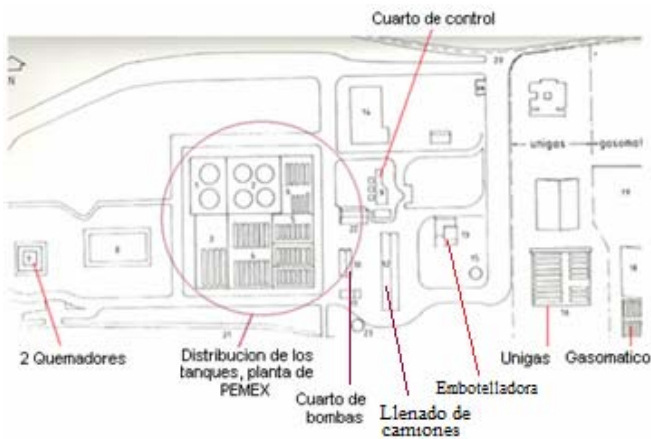
## 1.1 TERMINAL DE PEMEX.

La instalación fue propiedad de la compañía nacional de petróleos de México y operaba como un centro de almacenamiento y distribución de gas licuado de



petróleo (

Figura 1) Almacenaba principalmente GLP comercial de propano y GLP consistente de una mezcla de propano y butano de alta y baja volatilidad. Las instalaciones fueron construidas en 1962. En la ] Tabla 1 se nombran los tanques existentes en las instalaciones con sus respectivas capacidades. [1]



Cantidad de tanques	Tipo de tanques	Capacidad de cada tanque [m <sup>3</sup> ]
4	Esférico	1600
2	Esférico	2400
4	Cilíndrico	270
14	Cilíndrico	180
21	Cilíndrico	36
6	Cilíndrico	54
3	Cilíndrico	45

Figura 1. Instalaciones de la planta. [1]

Tabla 1. Tipos de tanques. [1]

La terminal es alimentada por tres tuberías subterráneas desde las refinerías de Minatlan, Poza Rica y Azcapotzalco y es distribuida por el mismo medio a dos compañías; Unigas y Gasomatico. El GLP es distribuido a otras 5 compañías usando camiones y botellas, por lo que sus instalaciones contaban con una estación de llenado de camiones, y una embotelladora en la planta. [1]

## **1.2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL DESASTRE.**

Mañana 19 de noviembre de 1984 en San Juan de Ixhuatepec, Ciudad de México. El accidente ocurre durante el llenado de los tanques de la terminal de PEMEX, con GLP proveniente de la refinería en Minatlan. Aunque la causa del incidente no se conoce con certeza, se sabe por reportes técnicos de la existencia de una caída de presión en la tubería de 8 pulgadas que conectaba una de las esferas con una serie de cilindros, provocada por una gotera de GLP en la línea. También fueron reportados algunos problemas con la instrumentación, más específicamente con los medidores de nivel, debida a un alto contenido de sulfuro en el GLP. De estas fallas, se intuye que el primero de los eventos del incidente, la nube inflamable, fue posiblemente causada debido a la descarga proveniente de la gotera en la tubería y/o el derramamiento por sobrellenado en el tanque, que además poseía problemas de corrosión y desgaste en sus paredes. Los tanques de almacenamiento contenían acerca de  $11000\text{m}^3$  del producto en el momento del desastre. [1]

Es un hecho que la descarga de GLP causante de la nube inflamable se mantuvo durante 5 a 10 min alcanzando dimensiones de 2m de altura con  $200\text{m} \times 150\text{m}$  de área. La nube se desplazó hasta llegar a una antorcha o quemador, momento en el cual se incendió produciendo después de un corto tiempo la primera BLEVE. Con esta explosión ocurrió el lanzamiento de fragmentos en direcciones aleatorias envueltos en GLP, provocando BLEVEs en tanques vecinos e incendios locales en zonas públicas, terminando en un efecto dominó; efecto en cadena causante de un incremento en daños y riesgos. Las cuatro esferas de GLP de  $1600\text{m}^3$  y varios pequeños cilindros con capacidades entre  $45\text{m}^3$  y  $270\text{m}^3$  sufrieron BLEVEs. [1]

Es importante mencionar que en el momento de construcción e inauguración de la planta, no existían residencias en la zona, los barrios afectados por las explosiones fueron construidos en el periodo comprendido entre el 1964 y 1984. La zona más afectada fue la zona sur donde las residencias se encontraban a 130m de los límites de la planta. [1]

El accidente dejó 500 muertos y más de 7000 heridos, siendo la gran cantidad de muertos y heridos consecuencia de la alta densidad de población en los alrededores de la instalación. El daño general se estimó en aproximadamente 31 millones de dólares y 200000 personas evacuadas. [1]

### **1.3. GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP).**

El GLP es una mezcla de propano ( $C_3H_8$ ) y butano ( $C_4H_{10}$ ) derivada del petróleo. A presión atmosférica y temperatura ambiente es un gas incoloro, inodoro y más pesado que el aire. La composición exacta del gas licuado de petróleo varía ligeramente entre los distintos países y diferentes refinerías. Una composición habitual del gas licuado de propano es; 90%, propano, 5 propileno, 2% butano, 1.5% de Iso-butano, 1.5% de metano.[2]

La combustión de GLP solo es posible cuando el triángulo de fuego está completo, en otras palabras, si existe disposición del combustible, de la sustancia comburente (Oxígeno) y del calor necesario para ignición. Los límites de inflamabilidad, superior e inferior, sobre y debajo de los cuales no ocurre propagación de la llama para los compuestos del GLP son; para el butano 1.86% -8.41% y para el propano 2.37% a 9.45%.[2][3] Los valores típicos de capacidad calorífica del GLP del propano comercial 50 MJ/kg y el butano comercial 49.3 MJ/kg [2][5]. El GLP es cubierto en la norma NFPA 58 como gas inflamable. NFPA (Asociación nacional de incendios)

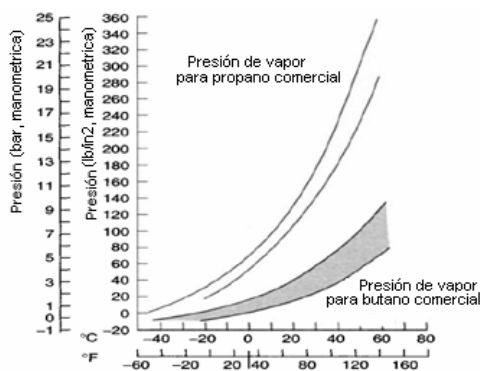
#### **1.3.1. Riesgos del GLP.**

- El GLP de propano es inodoro. Se adiciona etil mercaptano, para detección fugas

- Como líquido, en frío extremo, puede provocar una quemadura de tercer grado.
- Es un gas inflamable.
- En caso de falla de un tanque de almacenamiento, puede sufrir BLEVE.
- Debido a que es más pesado que el aire, en caso de escape, se acumula en un espacio reducido debajo del aire, donde puede encontrar un punto de ignición fácilmente sin el beneficio de dispersarse en la atmosfera.
- No es toxico, pero puede desplazar el oxigeno del aire provocando asfixia en humanos.[4]

### 1.3.2. Almacenamiento de GLP de propano.

El gas de propano tiene un punto de ebullición de  $-44^{\circ}\text{C}$ , con un moderado



aumento en su presión pasa a su forma licuada reduciendo el volumen 270 veces para facilidades de almacenamiento. La cantidad de presión requerida en el contenedor es regida por la temperatura ambiente fuera del contenedor y hace referencia a su presión de saturación. [5]

Figura 2.

**Figura 2.** Curva de Presión de Vapor/Temperatura para propano y butano comercial. [5]

### 1.4. BLEVE: Explosión de Vapores en Expansión y Líquidos en Ebullición:

**1.4.1. Definición.** Es una explosión que se presenta como resultado de la falla y rotura total de un tanque que contiene líquido a temperatura significativamente por encima del punto de ebullición a la presión atmosférica normal. Es uno de los peores accidentes que pueden ocurrir en la industria química o en el transporte

cuando se manejan sustancias como butano, propano, cloruro de vinilo, cloro, agua, etc. [6]

#### **1.4.2. Causas.**

- Fuego externo sobre la pared del tanque en la zona donde se encuentra el vapor.
- Fuego externo afectando la pared en contacto con el líquido en el tanque.
- Impacto de un fragmento o un objeto.
- Presencia de corrosión en las paredes del tanque.
- Defectos de manufactura del tanque. [6][7][8]

#### **1.4.3. Cuando una explosión califica como BLEVE.**

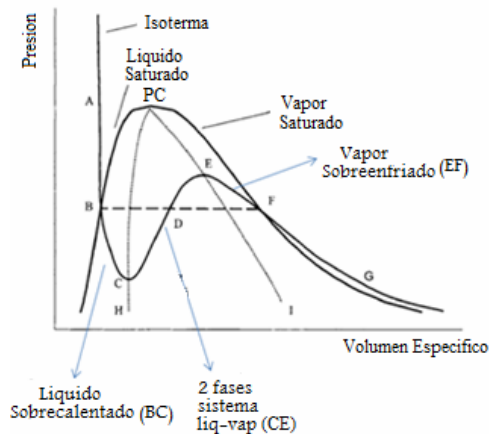
Un BLEVE sucede cuando durante la explosión se presencian dos factores:

1. Un significativo sobrecalentamiento sobre el líquido.[9]
2. Una despresurización instantánea.[8]

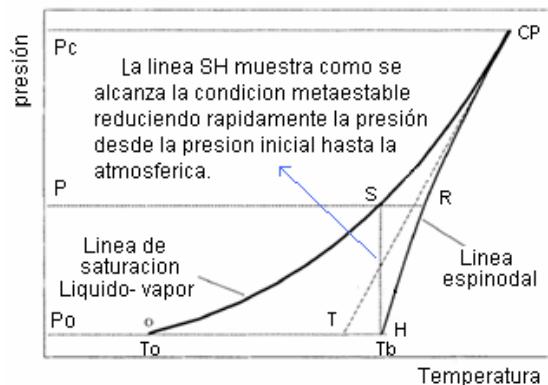
#### **1.4.4. Mecanismo de una BLEVE**

Al ocurrir la rotura total del tanque, se presenta una despresurización instantánea desde una presión mayor o igual que la presión de almacenamiento, hasta la atmosférica durante un proceso a temperatura supuesta constante. La mezcla líquido-vapor en equilibrio contenida en el tanque expuesta a la presión atmosférica, tendrá una temperatura mucho mayor que la correspondiente a la temperatura de saturación a éstas condiciones. El sistema se encontrará entonces en la sección de líquido sobrecalentado (Figura 3; Diagrama P-v)(Figura 4; Diagrama P-T), estado meta-estable, que tendrá una fuerte tendencia al equilibrio ante cualquier perturbación. Ésta tendencia se ve reflejada en la ocurrencia de una vaporización instantánea por parte de una fracción del líquido presente y una expansión por parte del vapor existente.[10][8]. Dependiendo del estado de sobrecalentamiento que tenga el sistema será la rapidez de su evaporación y la fracción de líquido que cambiará a fase vapor aumentando el volumen total del

sistema. El factor de aumento de volumen es perteneciente a la naturaleza de la sustancia.[10]



**Figura 3.** Diagrama P-v. [10] (R.C. Reid)



**Figura 4.** Diagrama P-T. [10] (R.C. Reid)

#### 1.4.5. Consecuencias de la BLEVE.

Los peligros inmediatos de una BLEVE son la onda de presión y la proyección balística de fragmentos pertenecientes al mismo tanque. Si el material contenido en el tanque es inflamable se producirá una bola de fuego, si es tóxico se producirá una dispersión de gas dando lugar a una nube nociva.[11]

Para el GPL los efectos serán tanto mecánicos como termal. En orden decreciente de importancia por daños al público está:(1) la radiación termal producida por la bola de fuego (efecto radial), (2) los fragmentos producidos por la falla del tanque (efecto puntual o direccional), y (3) la onda de presión causada por la expansión del vapor y el líquido contenidos en el tanque (efecto radial).[11][10]

#### 1.5. BOLA DE FUEGO.

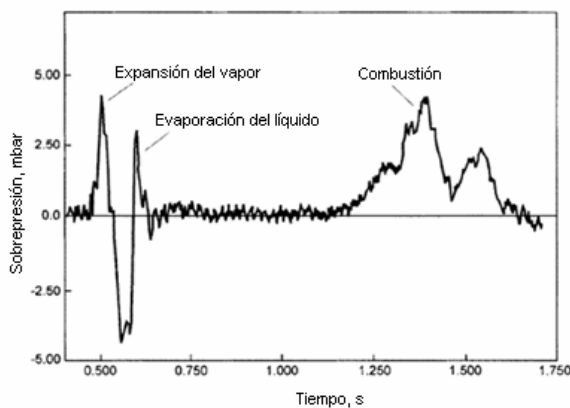
La bola de fuego es el resultado de una liberación instantánea de un gas licuado inflamable con ignición rápida en un área abierta, tiene una forma cercana a una esfera de vapor. La concentración de combustible en su interior se encuentra por encima del límite superior de inflamabilidad, y la combustión se desarrolla desde su superficie hacia su centro. Los vapores en llamas de la superficie crean flotabilidad, dando altura a la esfera e incrementando su volumen con el paso del

tiempo. La turbulencia aumenta haciendo que el aire ingrese al interior de la bola de fuego logrando mayor combustión de vapor. La bola de fuego se extingue dejando pequeñas agrupaciones de combustible, algunas de las cuales continuarán quemando. Este tipo de fuego es dañino a largas distancias y es fuente de ignición del combustible que encuentren en su camino. Su impacto se caracteriza por una radiación intensa liberada en un tiempo relativamente corto.[10]

### 1.6 ONDA DE SOBREPRESIÓN.

La onda de presión hace referencia a un cambio transitorio en las propiedades dinámicas del gas como son; la presión, la densidad, y la velocidad de la partícula. Cambios que generan fuerzas de viento de desplazamiento y sobrepresión con el potencial de aplastar objetos y estructuras. La onda explosiva se inicia en el tanque y viaja en el aire circundante disipando energía. Durante la explosión los valores de las propiedades dinámicas aumentan rápidamente, luego descienden a valores por debajo de los atmosféricos y finalmente evolucionan y se estabilizan en condiciones atmosféricas.[10]

En la onda producida por un BLEVE existen dos picos de sobrepresión; el primero



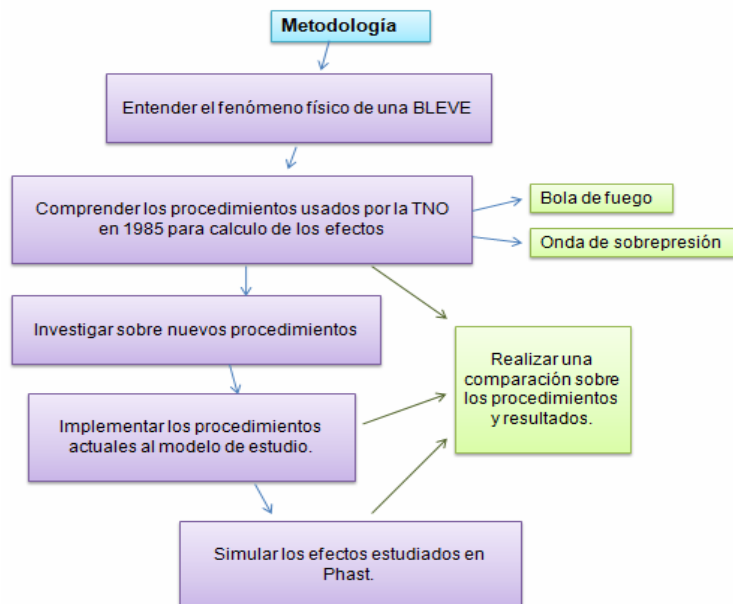
es causado por la expansión del vapor y el segundo por la vaporización del líquido, normalmente son considerados como uno solo por el corto tiempo entre ellos. Cuando la sustancia es inflamable existe un tercer pico creado por la ignición del combustible. (Figura 5).[10]

**Figura 5.** Onda de presión de un BLEVE (D.M. Johnson, J.M. Pritchard and M.J. Wickens)[10]

## 2 METODOLOGÍA

El siguiente diagrama (Figura 6) presenta metodología usada durante el desarrollo del proyecto.

- La TNO es la organización de la investigación aplicada de los Países Bajo
- Phast es un software diseñado por la DNV (Det Norske Veritas), fundación independiente que tiene como objetivo proteger la vida, la propiedad y el medio ambiente. La versión de Phast utilizada en este trabajo es la 6.53.
- Modelo de estudio: Terminal de PEMEX en San Juan de Ixhuatepec.



**Figura 6.** Metodología.

### 2.1 PROCEDIMIENTOS USADOS POR LA TNO (1985)

#### 2.1.1. Bola de fuego.

A partir de material fotográfico y de video fue estimado que se produjeron bolas de fuego de 200-300 metros de diámetro con duraciones aproximadas de 20 segundos. El daño directo del accidente fue reportado a una distancia de 300m. La bola de fuego de la segunda explosión, la más fuerte, no fue grabada en video, ni

capturada en fotografías. La TNO considera el radio de la bola de fuego como la distancia de mayor daño. Se considera también que las personas encontradas en la proyección de la bola de fuego no sobrevivirán al evento.[1]

Los parámetros de las correlaciones usadas para encontrar la duración y el diámetro de la bola de fuego, provienen de los valores promediados de seis correlaciones diferentes basadas en experimentos donde se usaron las ecuaciones 3 y 4(Tabla 6)[1].

El enfoque en los cálculos no incluye ascenso de la bola de fuego. El informe menciona que una cantidad de GLP no quemado fue arrojado a la zona residencial en el momento en el cual ocurrió la formación de la bola de fuego. La masa dispersa no fue tomada en cuenta en los cálculos. Se asumió como si todo el contenido del tanque hubiera participado de la bola de fuego.[1]

### ***Efectos sobre las personas consecuencia de las bolas de fuego***

La mayoría de personas que residían a una distancia de 300m muere en el fuego. Se menciona la dificultad que tuvo la TNO al realizar conclusiones respecto a los modelos usados de vulnerabilidad de las personas a la intensidad termal, debido a que los daños dejados por cada bola de fuego no eran muy claros, ni diferenciables.[1]

Los resultados de los efectos obtenidos por la TNO a partir de modelos de vulnerabilidad están en la Tabla 7. La TNO concluye que los modelos generan una sobreestimación en las distancias afectadas, éste comportamiento probablemente se da a que en modelos de vulnerabilidad no se incluyeron capas de protección.[1]

El informe utiliza un valor constante del poder emisor de 200 kW/m<sup>2</sup>, valor particular para las emisiones de energía provenientes de una bola de fuego de gas licuado de petróleo. De este valor es inferido que el modelo utilizado para los cálculos de la bola de fuego es el modelo de cuerpo sólido. Las distancias de daño de los tanques pequeños son superadas por los tanques de mayor

capacidad haciendo que los daños provocados por cada bola de fuego sean difíciles de diferenciar.[1]

### **2.1.2. Onda de presión.**

Los cálculos fueron realizados por la TNO asumiendo la onda de sobrepresión como el producto del fenómeno de expansión de vapor principalmente, y considerando el líquido en ebullición a la temperatura del evento, un factor poco relevante en la construcción de la onda. Esta suposición proviene de la teoría de Reid donde se explica que cuando la temperatura en el momento de la explosión se encuentra lejos del valor de la temperatura de sobrecalentamiento crítico (55°C para el propano), la evaporación de los líquidos sucede de manera lenta y produce poca sobrepresión. La explicación para la lejanía de la temperatura respecto al valor de sobrecalentamiento crítico es dada por la rapidez de la formación de la BLEVE en el incidente de México. Se aplican también suposiciones recomendadas por Van den Bosch [11], donde se deduce que el 40% de la energía total es usada en la formación de sobrepresión, siendo el resto para la proyección de fragmentos balísticos. El método de cálculo de la sobrepresión a cada distancia es mostrado en la Figura 21 resultados obtenidos vienen dados en la Tabla 8 por dos métodos diferentes con procedimiento similar; el propuesto por Baker et al y el propuesto por Van den Bosch [11]. En el reporte la sobrepresión también fue calculada para al fenómeno de ebullición del líquido para temperaturas superiores a la del evento, temperaturas más cercanas al valor de sobrecalentamiento crítico. Los resultados son mostrados en la Tabla 9. [1] (Pietersen, 1985)

## **2.2 PROCEDIMIENTOS ACTUALES.**

### **2.2.1. Bola de fuego.**

Los métodos que se aplicarán en este trabajo están basados en el modelo de fuente puntual, método que calcula el poder emisivo de la bola de fuego como una fracción de la energía producida por la combustión de la masa participante, dividida entre su superficie. Por el análisis realizado por Papazoglou y Aneziris

[12] la determinación de la dosis que recibe una persona expuesta al fenómeno es menos incierta cuando los cálculos son realizados por el modelo de fuente puntual. También en estos cálculos se incluye el levantamiento de la bola de fuego.

Los métodos usados son:

- Método A: Considerando parámetros constantes con el tiempo.[10]
- Método B: Considerando parámetros variables con el tiempo.[10]

También es realizada la simulación de la explosión en PHAST [13]

***Método A: Considerando parámetros constantes con el tiempo.***

Las correlaciones para este método son tomadas de un estudio comparativo realizado por Satyanarayana et al. (1991) [10][14] Utilizando ecuaciones de la 5 a la 20. Las correlaciones han sido desarrolladas a partir de experimentos de laboratorio y de accidentes históricos. Los parámetros básicos como el diámetro, la duración y la altura, son dependientes de la masa participante de la bola de fuego y se consideran constantes con el tiempo, lo que provee simplicidad a los cálculos.

La altura de la bola de fuego hace referencia a la distancia al centro de la bola de fuego desde el eje horizontal y aunque en este trabajo es solo dependiente de la masa y del diámetro, en la realidad, la altura es un parámetro que varía con la sustancia ya que depende de la volatilidad del combustible.[10]

El coeficiente de radiación es usado para la determinación del poder emisor; es la fracción de energía de combustión emitida en forma de radiación. Es un parámetro incierto, sin embargo se ha propuesto una correlación en función de la presión en el momento del estallido ha sido propuesta. Los valores del coeficiente de radiación se encuentran entre 0.2 y 0.4.[10]

La radiación termal se calcula a partir del poder emisivo, del factor geométrico y del coeficiente de transmisión atmosférica. El poder emisivo es la potencia irradiada por unidad de área en la superficie de la bola de fuego. El factor geométrico hace referencia a la energía proveniente de la bola de fuego que es interceptada por el receptor, retirando la radiación de aquellos puntos que no afectan al receptor [15]. La transmisividad atmosférica refleja la radiación absorbida por el vapor de agua encontrado en el aire proporcionada por la humedad.

Finalmente la dosis es el nivel de exposición nocivo para una persona, debido a la radiación térmica recibida en el tiempo total de duración de la bola de fuego.

***Método B: Considerando parámetros variables con el tiempo.***

En realidad los parámetros descritos en el enunciado anterior presentan un cambio continuo a lo largo de la duración del fenómeno (Figura 23. Crecimiento de la bola de fuego). Expertos estiman que la bola de fuego presenta un rápido crecimiento en el primer tercio del tiempo total de su duración y que a partir de ese momento su cambio es mínimo, por lo que puede considerarse constante hasta el momento en que se disipa, ver ecuaciones 21 a la 27.[10]

Es importante mantener en mente que en el momento del incidente una persona expuesta muestra reacción al fenómeno después de 5 segundos. La velocidad de escape es considerada entre 4 a 6 m/s. y el tiempo de exposición de la persona resulta siendo la suma del tiempo que le toma a la persona reaccionar más el tiempo que le toma encontrar refugio o alcanzar una distancia en la que no le ocurra daño por radiación termal, esta distancia es considerada cuando  $I \leq 1\text{Kw/m}^2$ . [10]

***Phast.***

Para los cálculos de la bola de fuego Phast utiliza dos métodos diferentes, el método propuesto por la DNV y el método propuesto por la TNO descritos en las

ecuaciones 28 a 42. [13]

### **2.2.2. Onda de sobrepresión.**

Existen dos tipos de métodos para cálculo de los efectos de la onda de presión.

1. Basados en la termodinámica del fenómeno.
2. Basados en la dinámica del fenómeno. [11]

#### ***Basados en la termodinámica del fenómeno.***

Los métodos termodinámicos ignoran las etapas intermedias. La energía disponible del sistema es calculada mediante la comparación de los estados final e inicial de los contenidos del tanque. El uso de fracciones empíricas es necesaria para la determinación de la cantidad de energía destinada a la generación de la onda de sobrepresión y de la energía dirigida a la proyección de fragmentos. Ésta energía es luego transformada a unidades energéticas relativas a otro material explosivo que posea un grado mayor de experimentación. Con ésta energía relativa, el análisis de las consecuencias es logrado por medio de cálculo de la sobrepresión a una distancia determinada y por datos referentes de las consecuencias obtenidas con el material explosivo mejor experimentado, las consecuencias a diferente sobrepresiones para el explosivo analizado son encontradas [11]

Algunos métodos para calcular la energía de la explosión son:

- El cálculo de la energía propuesta por Prugh. Quien considera un gas ideal que realiza un proceso isentrópico. [8][17]
- El S.V.E.E o el método volumen específico, entropía y entalpía de Baker et al. Quienes consideran expansión isentrópica, gas real.[8]
- El método Planas- Cuchi. Quienes considera proceso irreversible y adiabático. Comportamiento de gas real.[16][17]

- La estimación de la energía de sobrecalentamiento. Donde se considera un trabajo adiabático en la vaporización del líquido en el cual la expansión del vapor es considerada despreciable. Comportamiento gas real. [18]

El método Planas - Cuchi :

Ha sido previamente utilizado en la investigación de incidentes, como el mostrado por Bubbico R y Marchini M [17] en el cual se obtuvieron resultados comparables con los obtenidos directamente de las consecuencias del incidente. Este método considera la formación de un BLEVE como un proceso de un gas real que se realiza de forma no isentrópica o irreversible y adiabática, en el cual la consecuencia de la rápida evolución del proceso, impide el intercambio de calor con el medio ambiente. El método se basa en la definición del trabajo de expansión que es descrito como la variación de la energía interna del material contenido, siendo éste trabajo el producto entre la presión atmosférica y la variación total del volumen del sistema, desde el momento de su ruptura hasta su estado final. (Ecuación 1)[16]. **Ec. 1.**  $-P_0 * \Delta V = \Delta U$

Ésta relación puede resolverse ya sea gráficamente o de forma analítica. Analíticamente, el cálculo de la energía se realiza mediante la definición del trabajo de expansión y de la variación de la energía interna en términos de las propiedades de saturación del líquido y del vapor. (Ecuación 43 y 44) Reorganizando estas ecuaciones y solucionando para la fracción de vapor (Ecuación 45), la energía del sistema se calcula. La energía de la explosión es convertida a unidades de masa de T.N.T., con el fin de determinar la sobrepresión en función de la distancia y estimar los efectos en campo distante. (Ecuación 46) [16]

### ***Basados en la dinámica del fenómeno.***

La onda de presión generada por un BLEVE puede ser calculada por un enfoque no termodinámico, a través del estudio del comportamiento dinámico de las sustancias participantes en el fenómeno. Lo que es logrado mediante la solución de ecuaciones diferenciales propias del fenómeno.[19]

En este tipo de explosión por el momento existe incertidumbre sobre las condiciones en el origen de la explosión por las cuales el líquido presenta una evaporación explosiva, y sobre la tasa de evaporación del mismo. Para resolución de este problema Berg propone el modelo de expansión controlada de la evaporación, en el cual se asume que la evaporación del líquido sobrecalentado es infinitamente rápida, y puede ser totalmente determinada por la velocidad de liberación de los líquidos provenientes del tanque y la dinámica de la expansión del vapor en el aire a su alrededor. En otras palabras, la tasa de evaporación estará determinada por la velocidad en que la masa de vapor se podrá desplazar en el aire circundante.[19]

De la solución de la ecuación de onda en espacio abierto,(Ecuación 47).Berg determinó que el fenómeno de sobrepresión en el espacio libre era consecuencia del crecimiento de la tasa de liberación del líquido sobrecalentado al ambiente. Debido a que este modelo no es preciso cuando se trabajan altas presiones el problema es resuelto con ecuaciones dinámicas del vapor (Ecuación 48 a 50) en un simulador, usando una malla hemisférica y utilizando como condición de frontera la presión de vapor del líquido sobrecalentado.[19]

Este modelo fue validado con experimentos previamente realizados por Giesbrecht et al. con tanques donde la ruptura ha sucedido a temperaturas cerca del máximo nivel de sobrecalentamiento (Figura 26). La solución de las ecuaciones dinámicas de la expansión han sido recopiladas, en este caso, en gráficos de propano (Figura 27), que pueden ser utilizados conociendo la masa

existente en el tanque de entrada y la temperatura en el momento del estallido, para encontrar el valor de la sobrepresión en función de la distancia.[19]

***Phast:***

Para los cálculos de la onda de sobrepresión, Phast utiliza un enfoque termodinámico; calcula la energía de explosión considerando la expansión de vapor y la vaporización del líquido como procesos isentrópicos. Para el cálculo de los efectos el software usa las curvas de T.N.T. estimando la sobrepresión para cada distancia.[13]

**2.2.3. Respuestas de la población ante los incidentes.**

Las personas no responden de la misma manera a los efectos derivados de un accidente explosivo, como lo son la sobrepresión y la radiación térmica. La respuesta de la población puede ser descrita con la distribución normal de probabilidad (Figura 28)(Ecuación 51), en la cual se puede observar la probabilidad que puede tener una persona de sufrir un daño alto, moderado o bajo, al exponerse a una dosis en particular de alguno de los efectos mencionados.[10]

La respuesta promedio para cada dosis ha sido previamente investigada y es organizada en una grafica logarítmica, donde el eje x, hace referencia a los valores logarítmicos de las dosis y el eje y, hace referencia a la respuesta correspondiente a cada valor de dosis. La relación entre estas variables es lineal cuando la respuesta es dada en unidades de probit (Ecuación 52), varios expertos han propuesto valores para los parámetros que correlacionan estas variables, dependiendo del efecto analizado, dejando a disposición una poderosa herramienta para análisis de la vulnerabilidad de las poblaciones. Las unidades de probit pueden ser fácilmente convertidas a unidades de porcentajes de población para mención de consecuencias más entendibles.(Tabla 10).[10]

La dosis usada para evaluar los efectos de la bola de fuego, ha sido determinada para poblaciones vulnerables, esto es, poblaciones que incluyen personas que no responden efectivamente a procedimientos de emergencia durante evacuaciones como lo son ancianos y niños. [20]

### 3. CÁLCULOS Y RESULTADOS

#### 3.1. BOLA DE FUEGO

***Método A: Considerando parámetros constantes con el tiempo.***

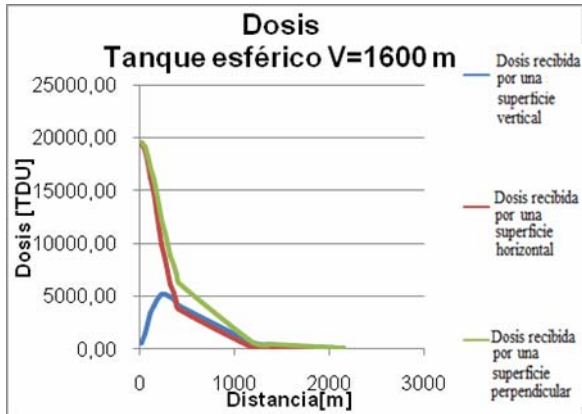
Los cálculos se realizaron para cada tamaño de tanque por separado, como si fueran eventos independientes, con el fin de analizar la capacidad de daño de cada sistema. Como suposiciones; se considera que los tanques están llenos al 90% de su capacidad [1], con el total de su contenido participante en la formación de la bola de fuego.

Debido a que las correlaciones usadas son tan dependientes de la masa, la densidad usada para los cálculos es la misma que la usada para el reporte considerando que la TNO tenía los datos reales de los productos de PEMEX y también con el objetivo de realizar una mejor comparación con los resultados de la TNO.(Tabla 11)

En el reporte de la TNO, se menciona que el contenido de la mayoría de tanques de GLP es propano comercial, teniendo en los tanques restantes una mezcla de propano-butano. Debido a que las composiciones de la mezcla no fueron publicadas, los cálculos en este informe se realizan considerando propano puro. El uso del propano es conveniente en éstos cálculos para encontrar el peor escenario que una mezcla propano-butano puede desarrollar, la razón, es que el propano por su menor punto de ebullición tenderá a realizar una vaporización más explosiva que el butano.

Las condiciones meteorológicas del día son reportadas en la Tabla 14. [21] Las presentes en la mañana del estadiillo están definidas como: temperatura de 7°C [22], velocidad del viento de 0.4 m/s, para una presión de almacenamiento en los tanques de 0.58469MPa (84.802 psig). Y las condiciones justo antes de la explosión en el interior de los tanques fueron consideradas como[11]: temperatura 309.141K (35.9°C) y presión 0.58469MPa (84.802 psig) [23] tomadas con base a la Tabla 15.

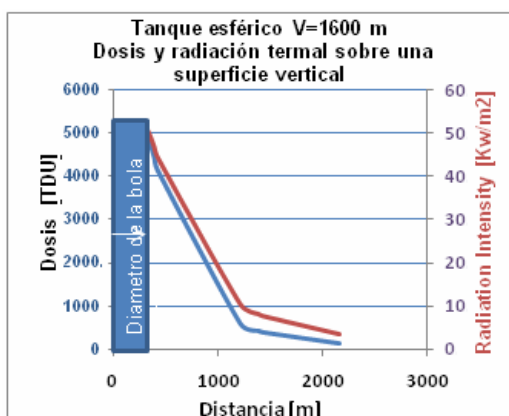
Resultados:



En la **Figura 7** se graficaron los resultados de la dosis recibida por las diferentes superficies del objetivo, se observa que la componente vertical del vector que afecta la superficie horizontal predomina en la cercanía de la bola de fuego, mientras la componente horizontal predomina en el campo lejano afectando la superficie vertical.

**Figura 7** Dosis recibida por las diferentes superficies del objetivo.

En el análisis de este trabajo se considera el objetivo como una persona en posición vertical con mayor área superficial en el mismo plano. Por las razones anteriores para asuntos de seguridad es importante recordar que las personas dentro de la proyección de la bola de fuego no sobrevivirán y los cálculos de distancias seguras pueden ser realizados por análisis de la componente vertical de la dosis y radiación termal.

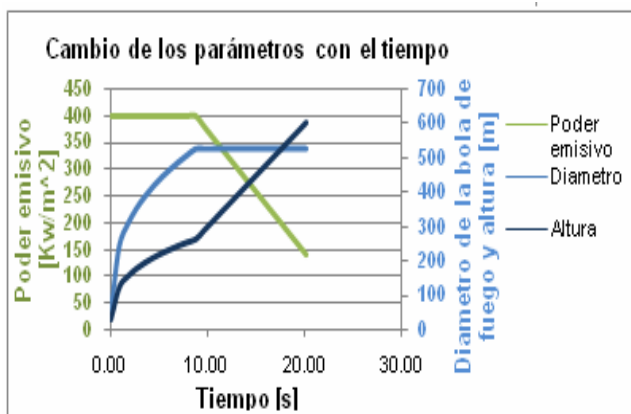


La **Figura 8** muestra una gráfica típica de la radiación y su dosis producida durante el tiempo total de una bola de fuego. De las gráficas obtenidas para las bolas de fuego producidas por los diferentes tamaños de tanque se puede resaltar: entre menos material participante en la bola de fuego el valor de la radiación y la dosis tendrá su mayor efecto a menor distancia

**Figura 8.** Dosis y radiación termal sobre una superficie vertical.

La dosis y la radiación presentan el mismo comportamiento en cada bola de fuego y el efecto de la bola de fuego producida por el tanque de mayor capacidad ( $1600\text{m}^3$ ) cubrirá las consecuencias de los otros tanques, haciendo que para este incidente el estudio de sus efectos sea de mayor importancia.

**Método B: Considerando parámetros variables con el tiempo.**



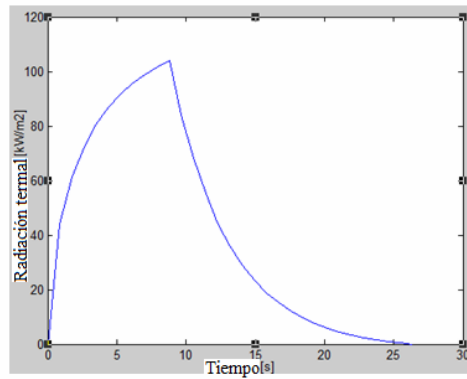
Como se puede observar en la Figura 9, el cambio en los parámetros se realiza de manera que la altura crezca continuamente, mientras el diámetro solo crece hasta cumplido el primer tercio del tiempo de duración total de la bola de fuego. desde donde permanece constante.

**Figura 9.** Cambio de los parámetros con el tiempo.

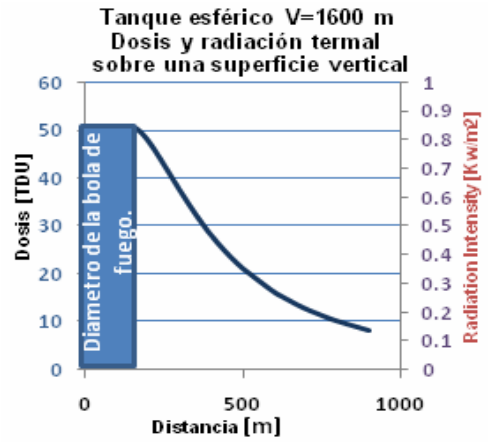
El poder emisorio decrece desde el principio hasta el desvanecimiento de la bola de fuego y en caso de tener un valor máximo mayor a  $400\text{kW/m}^2$ , el método requiere que sea ajustado.

En la **Figura 10** se reporta la variación resultante de la radiación termal con el tiempo, a una distancia de 300m para el tanque de capacidad  $1600\text{m}^3$ .

En la **Figura 11** se observan las radiaciones termales promedio de cada distancia con motivo de comparación con graficas del método A.



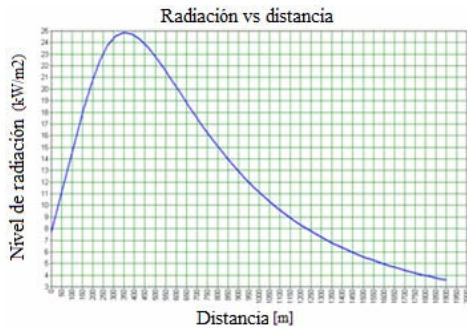
**Figura 10.** Radiación a  $x=300m$ ,  $f(t)$ .



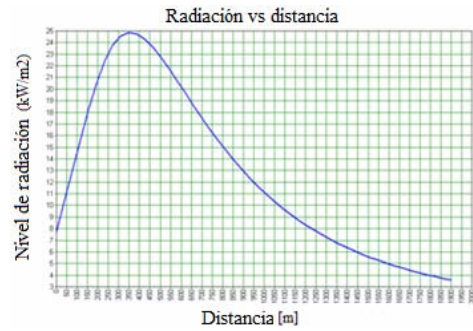
**Figura 11.** Radiación promedio,  $f(x)$

**Phast.**

La simulación en Phast fue hecha para el tanque de  $1600m^3$ , con dos métodos diferentes; el propuesto por la TNO y el propuesto por la DNV. Los resultados son mostrados en la Figura 12 y la Figura 13, la dosis criterio es de: 421.998 TDU para 1% de mortandad.



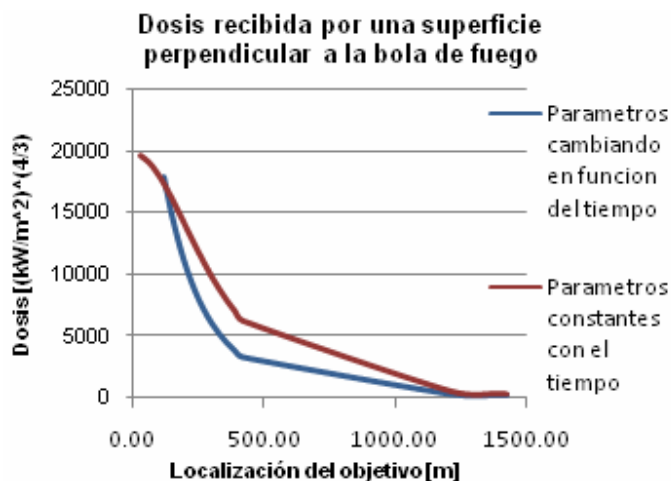
**Figura 12.** Resultado, método TNO [13]



**Figura 13.** Resultado, método DNV.[13]

### 3.1.1. Comparación de los métodos.

#### *Método A vs. Método B.*



**Figura 14.** Comparación del valor de la dosis para cada método.

Cuando se incluye el cambio en los principales parámetros de la bola de fuego en los cálculos, se desarrolla un adelanto en la descripción del fenómeno. En la

Figura 14 la dosis obtenida por los dos métodos sobre una superficie perpendicular a la bola de fuego. En esta gráfica se observa que al considerar el crecimiento de la bola de fuego la dosis obtenida actuante sobre el blanco analizado es considerablemente menor, afectando la predicción de la distancia de daños y haciéndola también menor. (Tabla 2, Tabla 3).

	Dosis [TDU]
Distancia con 1% de mortandad en la población [m]	421.95
Distancia con 1% de mortandad con ropa (utensilio protector) [m]	587.71
Distancia con 1% de población con quemadura de primer grado [m]	130.22
Distancia con 1% de población con quemaduras de segundo grado [m]	387.17

Capacidad de los tanques. [m3]	1% de mortandad en la población [m] Reporte 1985	1% de mortandad en la población [m]	1% de mortandad con ropa (utensilio protector [m]	1% de población con quemaduras de primer grado [m] Reporte 1985	1% de población con quemaduras de primer grado [m]	1% de población con quemadura de segundo grado [m]
1600	925	1380	1209	1550	2152	1423
270	450	614	533.00	725	973	634
180	375	508	439	600	810	525
54	220	289.50	247.50	340	471	300
45	200	260.50	221.80	310	425.80	270
36	190	234.2	198.3	290	385	243

**Tabla 2.** Distancias resultantes del reporte vs distancias resultantes método A.

***Método A y Método B con el reporte.***

Los resultados de las distancias de daño obtenidas por el reporte de la TNO son similares a las obtenidas por el método B (Tabla 2) esto nos lleva a la conclusión que las suposiciones hechas por la TNO respecto al valor del poder emisor del GLP no están muy alejadas de la descripción del fenómeno, ni desactualizadas a los cálculos desarrollados a la fecha.

Capacidad de los tanques. [m3]	1% de mortandad en la población [m] Reporte 1985	1% de mortandad en la población [m]	1% de mortandad con ropa (utensilio protector [m]	1% de población con quemaduras de primer grado [m] Reporte 1985	1% de población con quemaduras de primer grado [m]	1% de población con quemaduras de segundo grado [m]
1600	925	980	853.5	1550	1552	2152
270	450	469.5	406.3	725	753	487
180	375	396	342	600	637	411
54	220	239.5	205	340	389	248.5
45	200	217.5	186.79	310	355	226
36	190	198	168.5	290	324	205.5

**Tabla 3.** Distancias resultantes del reporte vs distancias resultantes método B.

### ***Comparación con los resultados obtenidos con Phast.***

Como se muestra en el Anexo 2 Phast realiza los cálculos de la bola de fuego considerando sus parámetros constantes con respecto al tiempo, al igual que el método A, la diferencia radica en las correlaciones usadas y el cálculo del factor geométrico. En Phast el factor geométrico tiene en cuenta la división de una esfera en nueve planos circulares, mientras el método A usa una ecuación más básica. Esta condición se refleja en el valor máximo de la radiación termal producida en el diámetro de la bola de fuego, siendo en Phast  $25\text{kW/m}^2$  y en el método A  $52\text{kW/m}^2$ . Otra diferencia entre los métodos A, B y Phast es el cálculo de la transmisividad atmosférica donde se toma en cuenta además de la radiación absorbida por el vapor de agua, la radiación reflejada en las partículas de dióxido de carbono presente en el aire.

Aun con estas diferencias el simulador y el método A (Tabla 2), tienen distancias de daños más cercanas que el simulador y el método B, (Tabla 3). Por lo que se deduce que el uso de la ecuación básica del factor geométrico da buenos resultados en un campo lejano aun cuando calcula máximos mayores en el diámetro de la bola de fuego. Los métodos que usan parámetros constantes con el tiempo son buenos cuando se requieren resultados conservativos, pero los resultados del reporte de la TNO y del método B son menos sobreestimados representando con mayor entendimiento del fenómeno físico.

### ***Comparación con los resultados obtenidos por la HSE.***

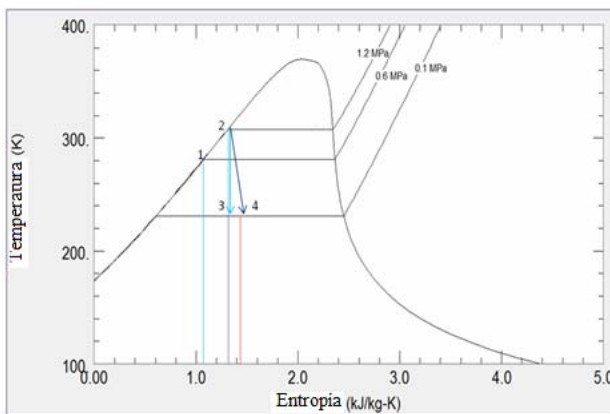
La HSE es la entidad de salud y seguridad del Reino Unido, su responsabilidad reposa en la regulación e implementación de la seguridad en el lugar de trabajo, además se encarga de la investigación de la misma área. La distancia encontrada por esta entidad sobre el desastre de México (850m con 1% de mortandad [13]) es similar a la encontrada con el método B para el criterio del 1% de mortandad para la población contando la ropa como una capa de protección. De la referencia [26] se conoce que el criterio de la dosis usada para 1% de mortandad en el 2000 era

de 500kW/m<sup>2</sup>, la crítica de este reporte [20] sugiere que se realice el cambio a 600Kw/m<sup>2</sup> en la dosis para poblaciones vulnerables.

### 3.2. ONDA DE SOBREPRESIÓN

Debido a que otros expertos como Vernant, Sollws, Rutledge propusieron que no era necesario que la temperatura llegara al sobrecalentamiento crítico para obtener evaporación explosiva como Reid anunciaba se consideraron en la realización de los cálculos utilizar los siguientes métodos.

#### **Método Planas-Cuchi**



Los cálculos se realizaron para el tanque de capacidad de 1600m<sup>3</sup>. La caracterización de los cuatro estados propuestos por Planas-Cuchi se describe en la Tabla 16. La vaporización conseguida durante un proceso irreversible y adiabático es de 0.45 del líquido existente.

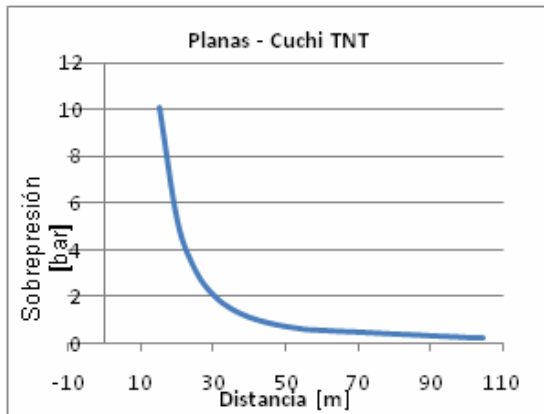
**Figura 15.** Diagrama de propano, localización de los cuatro estados. Refprop

En la figura 16 se dibujan los cuatro estados con ayuda del software Refprop, la variación de la entropía se muestra claramente en el diagrama de los estados 2 al 4. Los resultados de la energía de explosión son; para el proceso irreversible y adiabático:15523.37MJ y para el proceso isentrópico de 31923.03MJ

La fracción de líquido evaporado se puede hallar también por el balance de masa del líquido, método propuesto por Berg [19], donde se indica que un decrecimiento en la temperatura del líquido, desde el estado de sobrecalentamiento hasta el estado hipotético final, es proporcional al decrecimiento de la masa del líquido causada por el proceso de evaporación (Ecuación 2), Ec. 2.

$$M_L * C_L * dT = L * dM_L, \text{ Por este método la fracción encontrada es muy similar a la}$$

calculada con Planas-Cuchi (Ecuación 63) dando un resultado de  $x=044$ , indicando que la suposición de proceso irreversible y adiabático del sistema es una suposición adecuada a realizar en caso de un BLEVE.



Como se ha descrito en la referencia [16] el uso de curvas TNT es apropiado siempre y cuando se use para estimar efectos en el campo lejano. (Figura 16)

**Figura 16.** Sobrepresión usando curvas de TNT y el método Planas-Cuchi.

### 3.2.1. Comparación.

#### Phast y el método Planas-Cuchi

Como se menciona anteriormente, los cálculos en Phast son realizados siguiendo un procedimiento termodinámico, considerando un proceso isentropico, razón por la cual los resultados obtenidos para la energía de explosión con el método Planas-Cuchi de los estados 2 al 3 presentan un valor similar al obtenido con phast (Energía de explosión 33749.9 MJ)(Tabla 18). Hay dos métodos que Phast simula; uno para estallido en el aire y el otro para estallido en el suelo. Para

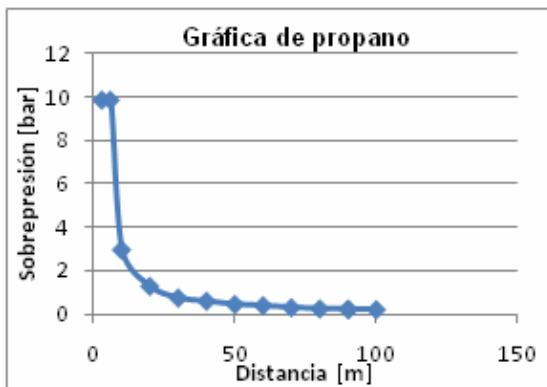


cálculo del estallido en el suelo la energía es duplicada con el fin de contabilizar las ondas reflejadas en el suelo (Tabla 18). Pero en éste trabajo nos enfocaremos al estallido en el aire.

**Figura 17.** Contornos de sobrepresión sobre las instalaciones de PEMEX.

En la Figura 18 se evalúan ciertos valores de presión en donde ocurren; (1) daño a maquinaria pesada, (2) movimiento de las paredes de concreto y (3) donde se puede considerar como distancia segura.

**Gráficas de propano.** Los resultados de este método son mostrados en la Figura 19. Como la temperatura antes del estallido para éste caso de estudio es de 309K, y no es encontrada en las gráficas, se realiza una aproximación para obtener resultados. Los valores de la distancia escalada son analizados en la Tabla 4, con el fin de verificar en la Figura 25, si en la zona donde se encuentran existe



correspondencia entre el modelo con los experimentos o si hay alguna sobreestimación por parte del método. Con este desarrollo se observa que los dos primeros datos de la Tabla 5 podrían presentar sobrestimación, aspecto que sería conveniente investigar en otros estudios.

**Figura 19.** Sobrepresión calculada de las graficas de propano.

<b>Gráficas de propano</b>		
<b>Distancia [m]</b>	<b>Sobrepresión [bar]</b>	<b><math>R/(2M)^{(1/3)}</math></b>
90.24	0.2068	0.797
117.32	0.1379	1.03
496	0.0268	4.36

**Tabla 4.** Verificación de la zona de validación.

**Comparación de los métodos.**

Las distancias de los daños resultantes obtenidos por los métodos previamente mencionados se muestran en la Tabla 5. Estos valores son comparados con el objetivo de evaluar estos métodos para mejor cálculo de los efectos de la onda de presión. Lo primero a resaltar es que Phast con la simulación de estallido en el

suelo presenta la distancia más alta dado a su mayor energía de explosión (Tabla 18). Se deduce que cuando se hace uso de métodos termodinámicos las distancias son más largas entre mayor la energía de explosión y viceversa.

Los resultados de las distancias son menores cuando se usan las tablas de propano. El hecho de que este método ha sido validado previamente con experimentos, se deduce que es el más cercano a la realidad del fenómeno, de aquí que se puede concluir que los métodos termodinámicos son sobreestimados cuando se requieren cálculos de los efectos de las ondas de presión causadas por evaporación de líquido y de expansión del vapor.

	Maquinaria pesada (3000 lb) en edificios industriales sufre un daño pequeño. El marco de hierro del edificio se distorsiona y se suelta de sus fundaciones. (0.2068 bar).	Movimiento de las paredes de concreto. Colapso parcial de las paredes y el techo de las casas (0.1379 bar)	'Distancia segura' (Probabilidad de 0.95 que los daños no sean serios), leve daño en los techos, 10% del vidrio se partirá. (0.0268 bar)
<b>Planas-Cuchi TNT (Irreversible)</b>	104.4m	143.7m	668.5m
<b>PHAST (estallido en el aire)</b>	124.79m	159.01m	617.77m
<b>PHAST (estallido en el piso)</b>	170m	220m	845m
<b>Gráficas de propano</b>	90.24m	117.32	496m

**Tabla 5.** Distancia del daño por sobrepresión.

## CONCLUSIONES

- Tomando como punto de referencia los cálculos hechos por el cuerpo de salud y seguridad (HSE) del Reino Unido sobre el desastre de México de 1984 en la compañía de PEMEX, los resultados y métodos de la TNO de 1985 son un buen enfoque a la determinación de los efectos de la bola de fuego, debido a que su sobrestimación es producto no del método como tal, sino de la falta de inclusión en el análisis de vulnerabilidad de la tasa de mortandad considerando un nivel elemental de protección, la ropa para poblaciones vulnerables.
- El método B es el más recomendable para el cálculo de la bola de fuego debido a que representa mejor el fenómeno al considerar del crecimiento de la bola de fuego. El factor de vista usado en el método B, tiene buenos resultados en un campo lejano, pero si la cuestión es evaluar efectos a distancias más cortas el factor debe ser revisado e investigado. En el cálculo de la transmisividad, el dióxido de carbono debe ser incluido por su crecimiento en el porcentaje de composición en el aire.
- El método que describe mejor el fenómeno de formación de la onda de presión es el método propuesto por Berg con el modelo de la expansión controlada, sus resultados, agrupados en las gráficas de propano, confieren una poderosa herramienta para evaluación de otros métodos o utilización directa.

- De los métodos termodinámicos, el método Planas-Cuchi con su suposición de proceso adiabático e irreversible es un paso adelante en el cálculo de la onda de presión, disminuyendo la sobreestimación de los efectos notoria en este tipo de métodos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pietersen, I.C.M., 1985. Analysis of the LPG Incident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, 19 November 1984. Netherlands organization for applied scientific research.
- [2] Alternate Fuels Technologies, Inc, 2009. Propane & Natural Gas Conversions. Disponible en internet: <http://www.propanecarbs.com/propane.html>
- [3] Crowl, D. A., Louvar, J. F, 2002. Chemical process safety: fundamentals with applications. Prentice Hall: 445
- [4] Jimenez, F., 2005. La Seguridad en la Distribución y Manipulación del G.L.P:23 Disponible en internet: [http://www.ffii.es/f2i2/publicaciones/libro\\_seguridad\\_industrial/LSI\\_Cap15.pdf](http://www.ffii.es/f2i2/publicaciones/libro_seguridad_industrial/LSI_Cap15.pdf)
- [5] Mobley, R. K., 2001. Plant Engineer's Handbook. Chapter, 20:1159. Disponible en internet: [http://books.google.com/books?id=9YkqH5HgSgwC&dq=plant+engineer's+handbook&printsec=frontcover&source=bl&ots=UBETjexip1&sig=sCThhgedydSiAuBVPNI1kZPmk6l&hl=en&ei=b53SSef4OZewtAOfv4zwAw&sa=X&oi=book\\_result&resnum=8&ct=result#PPA15993,M1](http://books.google.com/books?id=9YkqH5HgSgwC&dq=plant+engineer's+handbook&printsec=frontcover&source=bl&ots=UBETjexip1&sig=sCThhgedydSiAuBVPNI1kZPmk6l&hl=en&ei=b53SSef4OZewtAOfv4zwAw&sa=X&oi=book_result&resnum=8&ct=result#PPA15993,M1)
- [6] Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1999. Guidelines for Consequences Analysis of Chemical Release, , American Institute of Chemical Engineers, New York.
- [7] Shaluf, I. M., 2007. An Overview on BLEVE. Disaster prevention and management. 16 (5) 740-754.
- [8] Abbasi, T. and Abbasi, S.A., 2007. The boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): mechanism, consequences, assessment, management. Journal of

Hazardous Materials 141 (2007) 489-519. Available online, January 8 of 2009, Science direct.

[9] School of oceanography. Pressure test vessel operation guidelines. Quantitative Measures of Risk. The BLEVE effect. University of Washington. Disponible en internet: <http://runt.ocean.washington.edu/swift/PTV-manual/node9.html>

[10] Casal, J., 2007. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. Industrial Safety Series. Elviesier 8:378.

[11] Van den Bosch, C.J.H. and Wetering, R.A.P.M., 1996. Methods for the Calculation of Physical Effects. Due to Releases of Hazardous Materials (liquids and gases) 'Yellow Book'. Third edition.

[12] Papazoglou, I.A. and Aneziris, O.N., 1997. Uncertainty quantification in the health consequences of the BLEVE phenomenon. Advances in safety and reliability. Pergamon Guedes Soares C.

[13] Det Norske Veritas.(DNV), 2007. Software Phast 6.53.1,

[14] Satyanarayana K., Borah M. and Rao P.G. 1991. Prediction of thermal hazards from fireballs. Journal Loss Prev. Process Ind. 1991.4(5):344-347

[15] Quintiere J.G. 1998 Principles of fire behavior. 1998. Delmar publishers:255. Disponible en internet: [http://books.google.com/books?id=9Yv\\_KII1QMC&dq=principle+of+fire+behavior&printsec=frontcover&source=bn&hl=en&ei=Dp3SScnZI4eKtAPw953kCQ&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=4](http://books.google.com/books?id=9Yv_KII1QMC&dq=principle+of+fire+behavior&printsec=frontcover&source=bn&hl=en&ei=Dp3SScnZI4eKtAPw953kCQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=4)

[16] Planas-Cuchi E., Salla J.M. and Casal J. 2004. Calculating Overpressure from BLEVE Explosions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 17:431-436.

- [17] Bubbico R. and Marchini M., 2008. Assessment of an explosive LPG release accident: A case of study. *Journal of Hazardous Materials*, 155:558-565.
- [18] Casal J. and Salla J.M., 2006 Using liquid superheating energy for a quick estimation of overpressure in BLEVEs and similar explosions. *Journal of Hazardous Materials A*, 137: 1321-1327.
- [19] Van der Berg A.C., Van der Voort M.M., Weerheijm J., and Versloot N.H.A., 2006. BLEVE blast by expansion-controlled evaporation. *Process Safety Progress*. 25(1):44-51.
- [20] Daycock J. and Reid P.J., 2000. Thermal radiation criteria for vulnerable populations. Report 285, WS Atkins Consultants Ltd:83
- [21] Mohan M., Singh M.P., and Panwar T. S., 1991. Atmospheric Dispersion of Inflammable Substances for Estimating Vulnerable Zones in Hydrocarbon Industry. *Risk analysis and International Journal*. 11(3):419-423.
- [23] Perry, R.H.; Green, D.W., 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill. Thermodynamic Properties of Propane.
- [24] Grupo universitario de investigación analítica de riesgos Universidad de Zaragoza CPS. Disponible en internet. <http://www.unizar.es/guiar/Imagen/GUIAR/Fotos/Mex6.gif>.,
- [25] Tu tiempo.net, clima de ciudad de mexico durante noviembre de 1984. Disponible en internet: [http://www.tutiempo.net/en/Climate/MEXICO\\_CITY/19-11-1984/766800.htm](http://www.tutiempo.net/en/Climate/MEXICO_CITY/19-11-1984/766800.htm).
- [27] Franks A., 2004. A review of HSE's Risk Analysis and Protection- Based Analysis Approaches for Land-Use Planning. Final Report:108.

## Anexo 1- Procedimientos usados por la TNO.

- **Bola de fuego:**

**Ec. 3.**  $D = 6.48 * M^{0.325} (m)$

**Ec. 4.**  $t = 0.852 * M^{0.26} (sec)$

M = material inflamable presente en la bola de fuego (kg).

D [m]: Diámetro.

t [s]: Tiempo de total de duración de la bola de fuego.

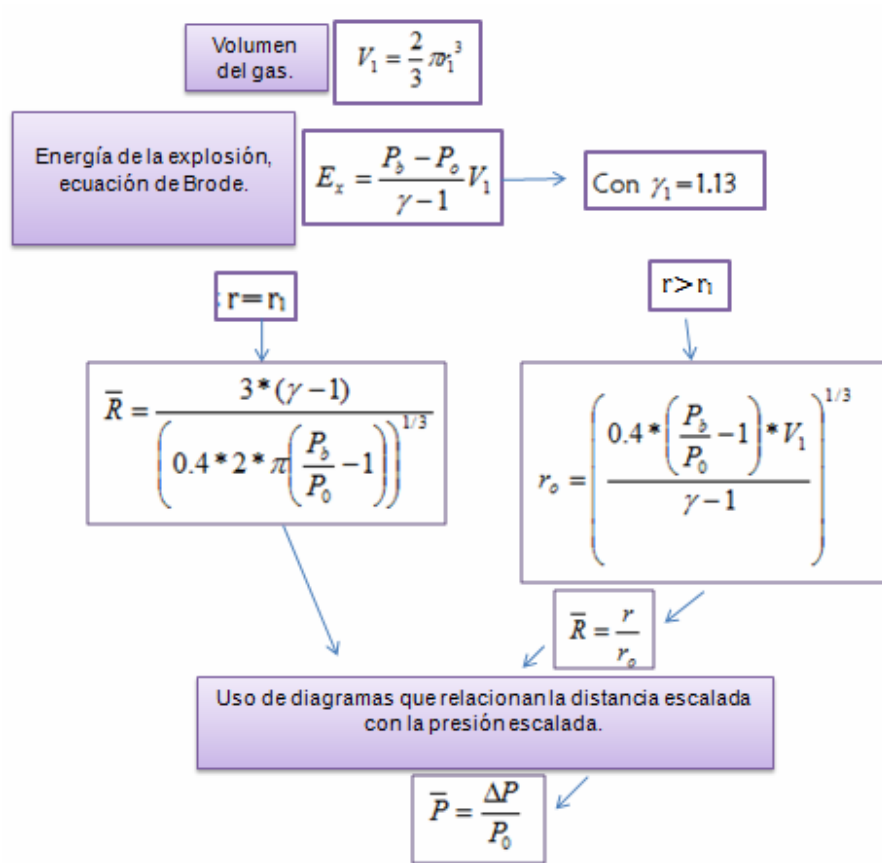
Capacidad del tanque [m <sup>3</sup> ]	M [10 <sup>3</sup> kg]	Diámetro [m]	Tiempo de duración [m]
1600	735	520	29
270	125	300	18
180	83	260	16
54	25	170	12
45	20	160	11
36	16	150	11

**Tabla 6.** Características de la bola de fuego [1]

Capacidad del tanque	Distancia 1% de mortalidad [m]	Distancia del 1% en quemaduras de primer grado.[m]
1600	925	1550
270	450	725
180	375	600
54	220	340
45	200	310
36	190	290

**Tabla 7.** Efectos de la bola de fuego [1]

- Onda de presión:



**Figura 20.** Método usado por la TNO en el reporte de 1985.[1]

$\bar{P}$  : Presión escalada.

$P_0$  : Presión atmosférica.

$\gamma$  : Coeficiente de capacidades caloríficas del gas en las condiciones previas al estallido.

$\bar{R}$  : Distancia escalada.

$\Delta P$  : sobrepresión.

$V_1$  [m<sup>3</sup>]: volumen del gas en el tanque.

$E_x$  : Energía de explosión.

$r_1$  [m]: radio del tanque.

Distancia [m]	Espacio ocupado por el volumen (m3)					
	20	100		800	1200	
	[3]	[2]	[3]	[3]	[2]	[3]
10	0.44	0.7	1	2.3	2	2.6
50	0.04	0.08	0.08	0.23	0.2	0.29
100	0.018	0.03	0.033	0.09	0.09	0.1
200	0.0075	0.015	0.012	0.033	0.04	0.04

**Tabla 8.** Sobrepresion causada por la expansion del vapor [3]

[2] Método propuesto por la referencia [11]

[3]Método propuesto por Baker et al.

Temperatura de sobrecalentamiento		Sobrepresión (bar)					
80C		3	1	0.3	0.1	0.03	0.01
50C		2	0.6	0.15	0.05	0.015	0.003
Capacidad del tanque (m <sup>3</sup> )	Contenido líquido (m <sup>3</sup> )	Distancia (m)					
2400	1200	30	64	140	300	640	1100
1600	800	26	56	120	260	560	940
270	135	15	31	68	150	310	520
180	90	13	27	58	130	270	450
54	27	8.5	18	39	85	180	300
45	23	8	17	36	80	170	280
36	18	7.3	16	34	73	160	260

**Tabla 9.** Sobrepresión calculada por la evaporación del líquido [1]

## Anexo 2. Procedimientos actuales.

### BOLA DE FUEGO

- **Parámetros constantes con el tiempo**

**Ec. 5.**  $D = 5.8 * M^{1/3}$ ; Robert and CCPS.

**Ec. 6.**  $t = 0.9 * M^{0.25}$ ; Martisen and Marx.

**Ec. 7.**  $H = 0.75 * D$ ; Sugerida por el grupo de Seguridad de Procesos Químicos. (CCPS).

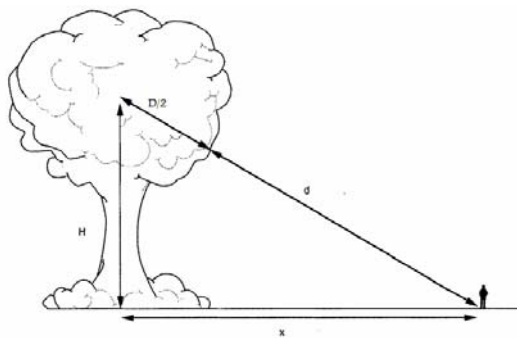
**Ec. 8.**  $\eta_{rad} = 0.00325 * P_b^{0.32}$

$\eta_{rad}$ : Coeficiente de radiación

**Ec. 9.** 
$$E = \frac{\eta_{rad} * M * \Delta H_c}{\pi * D^2 * t}$$

$E$  [kW/m<sup>2</sup>]: Poder emisor.

$\Delta H_C$  [kJ\*kg]: Calor de combustión.



**Figura 21.** Dimensiones de la bola de fuego. [10]

**Ec. 10.** 
$$d = \sqrt{H^2 + x^2} - \frac{D}{2}$$

$$\text{Ec. 11. } F_{\max} = \frac{4 * \pi * (D^2 / 4)}{4\pi * \left[\frac{D}{2} + d\right]^2} = \frac{D^2}{4\left[\frac{D}{2} + d\right]^2} \quad [\text{CCPS, 1999}].$$

$F$  : Factor de vista o factor geométrico.

$$\text{Ec. 12. } \ln P_{wa} [Nm^2] = 23.18986 - \frac{3816.42}{T[K] - 46.13}$$

$$\text{Ec. 13. } P_w = P_{wa} * \frac{H_R}{100}$$

$P_{wa}$  [N/m<sup>2</sup>]: Presión de saturación del vapor de agua a condiciones atmosféricas.

$H_R$  [%]: Humedad relativa.

$$\text{Ec. 14. } \tau = 1.53 * (P_w * d)^{-0.06} \text{ for } P_w * d < 10^4 [Nm^{-1}]$$

$$\text{Ec. 15. } \tau = 2.02 * (P_w * d)^{-0.09} \text{ for } 10^4 < P_w * d < 10^5 [Nm^{-1}]$$

$$\text{Ec. 16. } \tau = 2.85 * (P_w * d)^{-0.12} \text{ for } P_w * d < 10^5 [Nm^{-1}]$$

$d$  [m]: distancia desde la superficie de la bola de fuego hasta el objeto.

$\tau$  : Coeficiente de transmisión atmosférica.

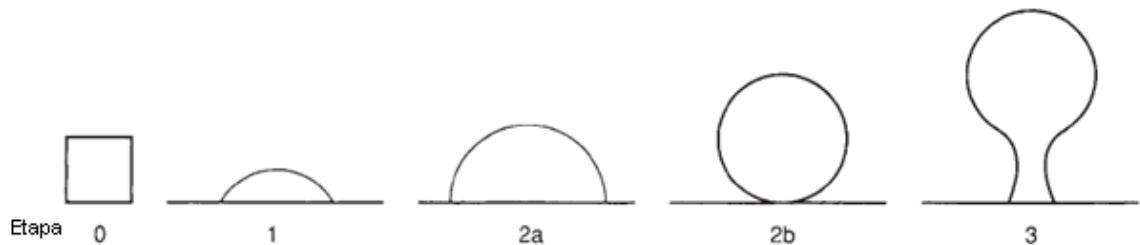
$$\text{Ec. 17. } I = \tau * F * E_p$$

$I$  [kW/m<sup>2</sup>]: Radiación térmica

$$\text{Ec. 18. Radiación termal sobre una superficie vertical: } I_v = I * \cos \alpha$$

$$\text{Ec. 19. Radiación termal sobre una superficie horizontal: } I_h = I * \sin \alpha$$

$$\text{Ec. 20. } Dosis = t * I^{4/3}$$



**Figura 22.** Crecimiento de la bola de fuego [10]

- **Parámetros cambiando con el tiempo:**

**Ec. 21.**  $D = 8.664 * M^{0.25} * t_i^{1/3}$  for  $0 \leq t_i \leq t/3$

**Ec. 22.**  $D_{\max} = 5.8 * M^{1/3}$  for  $t/3 < t_i \leq t$

**Ec. 23.**  $H = 0.5 * D$  for  $0 \leq t_i \leq t/3$

**Ec. 24.**  $H = \frac{3 * D_{\max} * t_i}{2 * t}$  for  $t/3 < t_i \leq t$

**Ec. 25.**  $E_{\max} = 0.0133 * \eta_{\text{rad}} * \Delta H_C * M^{1/12}$  for  $0 \leq t_i \leq t/3$

**Ec. 26.**  $E = E_{\max} \left[ \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{t_i}{t} \right) \right]$  for  $t/3 < t_i \leq t$

$E$  [kW/m<sup>2</sup>]: Poder emisor.

**Ec. 27.**  $Dosis = \int I_v * t^{4/3} dt$

- **Phast**

**Ec. 28.**  $M_{\text{inf lamable}} = f_{\text{correccion}} \cdot f_{\text{vapor}} \cdot M_{\text{dato\_entrada}}$

$f_{\text{correccion}}$  :1 ; Significa que toda la masa del tanque es participe de la bola de fuego.

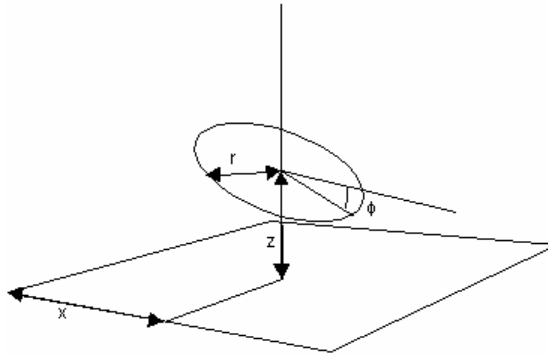
Modelo de la TNO (Yellow Book) y Modelo recomendado por la DNV .

**Ec. 29.**  $r_{\text{bola de fuego}} = 3.24 \cdot M_{\text{inf lamable}}^{0.325}$

**Ec. 30.**  $H_{\text{Bola de fuego}} = 2 \cdot r_{\text{Bola de fuego}}$

La bola de fuego es determinada en 10 planos circulares.

**Ec. 31.**  $x_i = 0$        $z_i = H_{\text{Bola de fuego}} - r_{\text{Bola de fuego}} \cdot \cos \phi$        $r_i = r_{\text{Bola de fuego}} \cdot \sin \phi$   
 $\phi = \frac{\pi(i-1)}{N-1}$



**Figura 23.** Dimensiones de uno de los planos circulares [13]

**Ec. 32.**  $t_{Bola\ de\ fuego} = 0.852 \cdot M_{Bola\ de\ fuego}^{0.26}$

**Ec. 33.** 
$$E = \frac{\eta_{rad} \cdot M_{Inflamable} \cdot \Delta H_c}{4 \cdot \pi \cdot r_{bola\ de\ fuego}^2 \cdot t_{Bola\ de\ fuego}}$$

**Ec. 34.** 
$$\eta_{rad} = 0.27 \cdot \left( \frac{P_{sat}}{10^6} \right)^{0.32}$$

Modelo recomendado por la DNV:

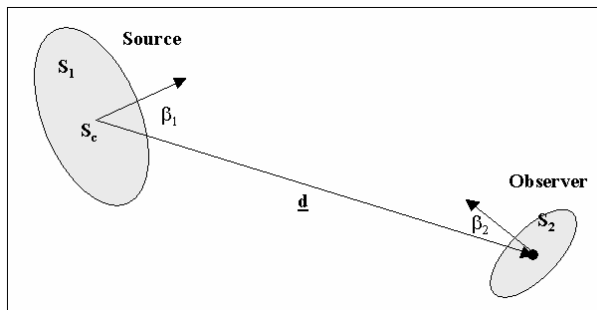
**Ec. 35.**  $\Delta H_c = \Delta H_{Comb}$

Modelo de la TNO (Yellow book):

**Ec. 36.**  $\Delta H_c = \Delta H_{Comb} - [\min(1, f_{vapor} \cdot f_{correccion}) - f_{vapor}] \cdot [\Delta H_{vap} + C_{P,Lig} (T_{Bola\ de\ fuego} - T_{Amb})]$

**Ec. 37.** If  $E > E_{MAX}$ : E is set as  $E_{MAX}$

Como hay nueve círculos definiendo la bola de fuego, los cálculos de radiación son realizados considerando volumen cónicos entre cada par de planos circulares



**Ec. 38.** 
$$F = \iint_{S_1} \frac{\tau \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)}{\pi \cdot d^2} dS_1$$

**Figura 24.** Parámetros usados para cálculo del factor geométrico.[13]

Transmisividad atmosférica: incluye la radiación absorbida por el agua y el dióxido de carbono en el aire.

$$\text{Ec. 39. } \tau = 1.006 - 0.01171 \cdot \log_{10} X(H_2O) - 0.02368 \cdot [\log_{10} X(H_2O)]^2 - 0.03118 \cdot \log_{10} X(CO_2) + 0.001164 \cdot [\log_{10} X(CO_2)]^2$$

$$\text{Ec. 40. } X(H_2O) = \frac{2.165 \cdot P_w \cdot d}{T}$$

$$\text{Ec. 41. } X(CO_2) = \frac{273 \cdot d}{T}$$

$$\text{Ec. 42. } I = F \cdot E$$

• o Planas-Cuchi.

$$\text{Ec. 43. } -\Delta U = (u_L - u_G) * m_T * x - m_T * u_L + U_i$$

$$\text{Ec. 44. } P_0 * \Delta V = P_0 * [(v_G - v_L) * m_T * x + m_T * v_L - V_i] \text{ (Planas-Cuchi)}$$

$$\text{Ec. 45. } x = \frac{m_T * P_0 * v_L - V_i * P_0 + m_r * u_L - U_i}{[(u_L - u_G) - (v_G - v_L) * P_0] * m_T}$$

$$\text{Ec. 46. } W_{TNT} = \beta * 0.214 * \Delta U \text{ (Planas-Cuchi)}$$

• Graficas de propano.

$$\text{Ec. 47. } \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\gamma}{2 * \pi * R * c_0^2} \frac{d\phi}{dt} \text{ Solución de la ecuación de onda en espacio abierto.}$$

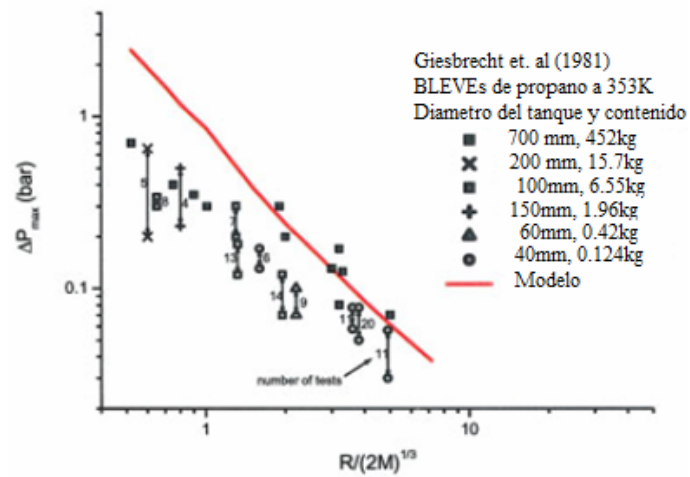
$c_0$ : Velocidad del sonido.

$\phi$ : cantidad de combustible liberado [ $m^3/s$ ].

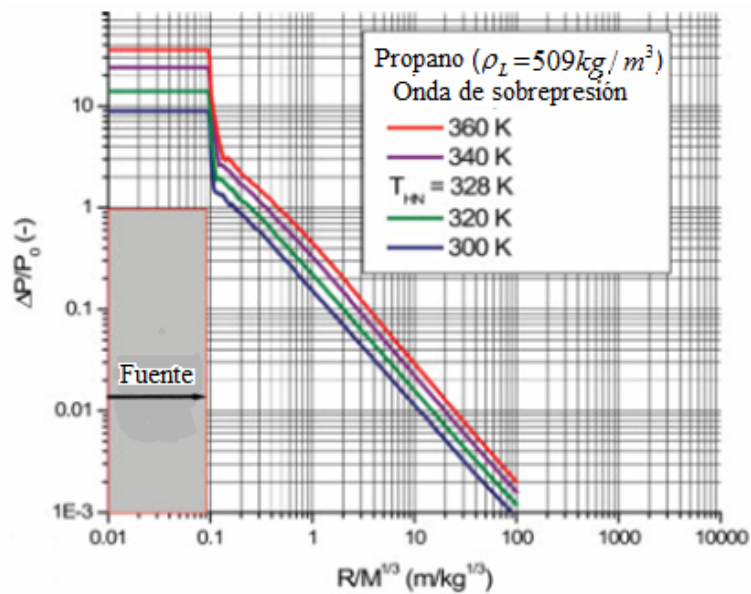
$$\text{Ec. 48. } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad \text{Ecuaciones dinámicas del vapor.}$$

$$\text{Ec. 49. } \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) + \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

**Ec. 50.** 
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

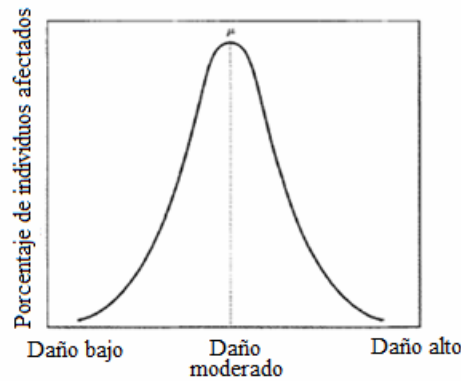


**Figura 25.** Validación del método propuesto por A.C. Berg. [19]



**Figura 26.** Gráfico para propano propuesto por A.C. Berg.[19]

- **Respuestas de la población ante los incidentes.**



**Figura 27.** Distribución normal. [10]

**Ec. 51.**  $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$

**Ec. 52.**  $Y = a + b \ln V$

**Ec. 53.**  $P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y-5} \exp\left[-\frac{V^2}{2}\right] dV$

Conversión de unidades de probit a porcentajes										
%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.5	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.8	4.82	4.85	4.87	4.9	4.92	4.95	4.97
50	5	5.03	5.05	5.08	5.1	5.13	5.15	5.18	5.2	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.5
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.7	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

**Tabla 10.** Conversión de unidades de probit a porcentajes.[3]

### Anexo 3. Cálculos y resultados.

Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad usada en el reporte de la TNO. [Kg/m <sup>3</sup> ]
1600	510.42
270	514.40
180	512.35
54	514.4
45	493.83
36	493.83

Tabla 11. Densidad del GLP.

Tanques	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Porcentaje del líquido en los tanques	Líquido total [m <sup>3</sup> ]	Masa total de líquido [Kg]	Diámetro [m]	Tiempo de duración [s]	Altura de la bola de fuego [m]
Esférico	1600	0.9	1440	735000	523.43	26.35	392.57
Cilíndrico	270	0.9	243	125000	290	16.92	217.5
Cilíndrico	180	0.9	162	83000	253	15.27	189.75
Cilíndrico	54	0.9	48.6	25000	169.60	11.31	127.19
Cilíndrico	45	0.9	40.5	20000	157.44	10.70	118.07
Cilíndrico	36	0.9	32.4	16000	146.15	10.12	109.61

Tabla 12. Características de la bola de fuego\_1.

Volumen [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente de radiación [rad]	Poder emisor [kW/m <sup>2</sup> ]	Ln (Pwa)	Pwa [N/m <sup>2</sup> ]	Humedad relativa [Hr] %	Pw [N/m <sup>2</sup> ]
1600	0.29	436.99	6.88	974.35	57	555.38
270	0.29	377.01	6.88	974.35	57	555.38
180	0.29	364.37	6.88	974.35	57	555.38
54	0.29	329.69	6.88	974.35	57	555.38
45	0.29	323.62	6.88	974.35	57	555.38
36	0.29	317.66	6.88	974.35	57	555.38

**Tabla 13.** Características de la bola de fuego\_2.

Extender Data November 19, 1984	Values	Nº
Mean temperature:	13.2 °C	5
Mean dew point:	4.9 °C	5
Maximum temperature:	23.3 °C	
Minimum temperature:	6.8 °C	
Mean sea level pressure:	1009.3 mb	5
Mean station pressure:	774.3 mb	5
Mean humidity:	57 %	
Mean visibility:	4.8 Km	5

**Tabla 14.** Condiciones meteorológicas, Noviembre 19, 1984. [25]

Situación	Presión de falla	Temperatura de falla
Fuego externo	1.21 * Presión de abertura de la válvula de escape	Determinada con el uso de las tablas termodinámicas.

**Tabla 15.** Tomada de la tabla de presiones de falla para diferentes situaciones.[11]

### **Phast.**

La mayoría de los datos de entrada ya han sido descritos en éste trabajo, el tiempo de exposición, dato de entrada aun no especificado, es considerado como

el tiempo de duración de la bola de fuego. Esto es debido a que la radiación termal de  $1 \text{ kW/m}^2$  en los cálculos hechos por los métodos anteriores se encuentra a una distancia superior de 1900m y resaltando la distancia mayor a la que una persona

Capacidad de los tanques. [m3]	1% de mortandad en la población [m] Reporte 1985	1% de mortandad en la población [m]	1% de mortandad con ropa (utensilio protector [m]	1% de población con quemaduras de primer grado [m] Reporte 1985	1% de población con quemaduras de primer grado [m]	1% de población con quemadura de segundo grado [m]
1600	<b>925</b>	1380	1209	<b>1550</b>	2152	1423
270	<b>450</b>	614	533.00	<b>725</b>	973	634
180	<b>375</b>	508	439	<b>600</b>	810	525
54	<b>220</b>	289.50	247.50	<b>340</b>	471	300
45	<b>200</b>	260.50	221.80	<b>310</b>	425.80	270
36	<b>190</b>	234.2	198.3	<b>290</b>	385	243

tiene probabilidad de morir es igual 1380m (Método A.

Tabla 2), una persona tardaría 130s en escapar y 5s más en reaccionar, tiempo de exposición que carece de sentido cuando la duración de la bola de fuego es 28s. (Ecuaciones 51 a la 53). En las condiciones meteorológicas la estabilidad escogida fue la E; moderadamente estable con velocidad lenta del viento y en la noche, pues las primeras explosiones sucedieron antes del amanecer y se cree que la segunda explosión, que fue la más fuerte fue la causada por el tanque de  $1600\text{m}^3$ .

$$\text{Ec. 54. } t_{\text{escape}} = \frac{1900 - 1380}{4} = 130s$$

$$\text{Ec. 55. } t_{\text{exp}} = 5 + 130 = 135s$$

$$\text{Ec. 56. } t_{\text{bola\_de\_fuego}} < t_{\text{exp}} ; t_{\text{exp}} = t_{\text{bola\_de\_fuego}}$$

$$\text{Ec. 57. } t_{\text{exp}} = 28.58s$$

***Ecuaciones de probit para efectos en las personas.***

Quemaduras de primer grado.

**Ec. 58.**  $y = -39.83 + 3.0186 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$

Quemaduras de segundo grado.

**Ec. 59.**  $y = -43.14 + 3.0186 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$

Mortandad.

**Ec. 60.**  $y = -36.38 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$

Mortandad considerando ropa (utensilio protector)

**Ec. 61.**  $y = -37.23 + 2.56 \cdot \ln(t \cdot I^{4/3})$

## Método Planas- Cuchi.

Planas-Cuchi: método para encontrar la energía disponible en el tanque				
Propiedades	1. Estado inicial(a)	2. Estado de la explosión (b)	3. Estado final hipotético (Proceso isentropico)	4. Estado final hipotético (Proceso adiabático e irreversible) con $W=-Po(\Delta V)$
Presión [kPa]	<b>584.693</b>	<b>1251.398</b>	<b>101.3</b>	<b>101.3</b>
Temperatura [K]	<b>280.15</b>	<b>309.141</b>	<b>230.227</b>	<b>230.227</b>
Densidad del líquido [Kg/m <sup>3</sup> ]	517.88	473.334	580.536	580.536
Densidad del vapor [Kg/m <sup>3</sup> ]	12.646	27.016	2.4024	2.4024
Masa total [Kg]	<b>747770.56</b>	<b>747770.56</b>	<b>747770.56</b>	<b>747770.56</b>
Masa del líquido [Kg]	745747.2	747340.59	450868.26	408361.3594
Masa del vapor [Kg]	2023.36	429.97	296902.30	339409.2006
Volumen específico del vapor [m <sup>3</sup> /kg]	0.07921	0.03691	0.4541	0.4541
Volumen específico del líquido [m <sup>3</sup> /kg]	0.00193	0.00212	0.0017	0.0017
Volumen específico del sistema [m <sup>3</sup> /kg]	<b>0.00214</b>	<b>0.00214</b>	0.18135	0.20707
Volumen total del vapor [m <sup>3</sup> ]	160	15.87	123585.71	141279.22
Volumen total del líquido [m <sup>3</sup> ]	1440	1583.50	776.64	703.42
Volumen total [m <sup>3</sup> ]	<b>1600</b>	<b>1600</b>	124362.35	141982.64
Fracción de vapor	<b>0.00271</b>	<b>0.000575</b>	<b>0.39705</b>	<b>0.45389</b>
Energía interna específica del vapor [kJ/kg]	537.623	566.819	484.137	484.137

Propiedades	1. Estado inicial(a)	2. Estado de la explosión (b)	3. Estado final hipotético (Proceso isentropico)	4. Estado final hipotético (Proceso adiabático e irreversible) con $W=-P_0(\Delta V)$
Energía interna específica del líquido [kJ/kg]	217.044	294.046	98.325	98.325
Energía interna específica del sistema [kJ/kg]	217.91	294.203	251.51	273.44
Energía interna total del vapor [MJ]	1087.81	243.71	143741.37	164320.53
Energía interna total del líquido [MJ]	161860.07	219752.37	44331.67	40152.18
Energía interna total del sistema [MJ]	162947.88	219996.08	188073.05	204472.71
Entropía específica del vapor [kJ/(Kg*K)]	2.37137	2.34955	2.45841	2.45841
Entropía específica del líquido [kJ/(Kg*K)]	1.06568	1.33637	0.59846	0.59846
Entropía específica del sistema [kJ/(Kg*K)]	1.06922	<b>1.33695</b>	<b>1.33695</b>	<b>1.44268</b>

**Tabla 16.** Caracterización de los cuatro estados.

En azul se muestra la fracción de vapor, la cual da una idea de la vaporización sucedida a esta temperatura.

Estado inicial (a); estado de almacenamiento. Nivel de llenado del 90%
Estado inicial (b); estado justo en el momento de fallo, la masa y el volumen no cambian, todos los contenidos participan de la onda de presión.
Estado final hipotético (por un proceso isentropico); es calculado usando la misma entropía del estado inicial (b)
Estado final hipotético (por un proceso adiabático) es calculado con las ecuaciones propuestas por Planas- Cuchi.

**Tabla 17.** Descripción de los cuatro estados.

**Ec. 62.**  $M_L * C_L * dT = L * dM_L$

**Ec. 63.**  $F = 1 - \exp\left(\frac{-C_L * \Delta T}{L}\right)$

<i>PHAST</i>	<i>Energía de la explosión</i>
<i>Estallido en el aire</i>	<i>33749.9MJ</i>
<i>Estallido en el piso</i>	<i>67499.73MJ</i>

**Tabla 18.** Energía de explosión. Phast.

Propiedades	1. Estado inicial(a)	2. Estado de la explosión (b)	3. Estado final hipotético (Proceso isentropico)	4. Estado final hipotético (Proceso adiabático e irreversible) con $W=-P_0(\Delta V)$
Energía interna específica del líquido [kJ/kg]	217.044	294.046	98.325	98.325
Energía interna específica del sistema [kJ/kg]	217.91	294.203	251.51	273.44
Energía interna total del vapor [MJ]	1087.81	243.71	143741.37	164320.53
Energía interna total del líquido [MJ]	161860.07	219752.37	44331.67	40152.18
Energía interna total del sistema [MJ]	162947.88	219996.08	188073.05	204472.71
Entropía específica del vapor [kJ/(Kg*K)]	2.37137	2.34955	2.45841	2.45841
Entropía específica del líquido [kJ/(Kg*K)]	1.06568	1.33637	0.59846	0.59846
Entropía específica del sistema [kJ/(Kg*K)]	1.06922	<b>1.33695</b>	<b>1.33695</b>	<b>1.44268</b>

**Tabla 16.** Caracterización de los cuatro estados.

En azul se muestra la fracción de vapor, la cual da una idea de la vaporización sucedida a esta temperatura.

Estado inicial (a); estado de almacenamiento. Nivel de llenado del 90%
Estado inicial (b); estado justo en el momento de fallo, la masa y el volumen no cambian, todos los contenidos participan de la onda de presión.
Estado final hipotético (por un proceso isentropico); es calculado usando la misma entropía del estado inicial (b)
Estado final hipotético (por un proceso adiabático) es calculado con las ecuaciones propuestas por Planas- Cuchi.

**Tabla 17.** Descripción de los cuatro estados.

**Ec. 62.**  $M_L * C_L * dT = L * dM_L$

**Ec. 63.**  $F = 1 - \exp\left(\frac{-C_L * \Delta T}{L}\right)$

<i>PHAST</i>	<i>Energía de la explosión</i>
<i>Estallido en el aire</i>	<i>33749.9MJ</i>
<i>Estallido en el piso</i>	<i>67499.73MJ</i>

**Tabla 18.** Energía de explosión. Phast.

<i>PHAST</i>	<i>Energía de la explosión</i>
<i>Estallido en el aire</i>	<i>33749.9MJ</i>
<i>Estallido en el piso</i>	<i>67499.73MJ</i>

**Tabla 18.** Energía de explosión. Phast.