



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA
LA EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS POR
DERRAMES, FUGAS, EXPLOSIONES E INCENDIOS
PROVOCADOS POR DESASTRES QUÍMICOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

P R E S E N T A:

ING. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES



TUTOR:

M.C. VICENTE FUENTES GEA

2011

2011

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Óscar
Secretario: M. C. Audry Sánchez Javier
Vocal: M. C. Fuentes Gea Vicente
1er. Suplente: Dr. Jazcilevich Diamant Aron
2do. Suplente: Dr. César Valdez Enrique

Lugar donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

M. C. VICENTE FUENTES GEA

FIRMA

Índice

1	
1. Introducción	6
1.1. Objetivo principal	7
1.1.1. Objetivos específicos	7
1.2. Justificación	8

2	
2. Explosiones	10
2.1. Deflagración	12
2.1. Posibles escenarios ante la liberación	11
2.3. Detonación	13
2.4. Explosión de nube de vapor	14
2.4.1. Modelos matemáticos para el análisis de consecuencias por explosiones	15
2.4.1.1. Variables de interés	16
2.4.1.2. Modelos de carga equivalente	17
2.4.1.3. Modelo de multienergía	22
2.4.1.4. Modelo de Baker Strehlow	28
2.5. Explosión de líquido en ebullición expandiéndose a vapor (BLEVE)	33
2.5.1. Modelos matemáticos para predecir los efectos físicos de una explosión de líquido en ebullición expandiéndose a vapor	35
2.5.1.1. Análisis del fenómeno	36
2.5.1.2. Método de Baker	38
2.6 Modelos de fragmentación debida a una explosión de líquido en ebullición expandiéndose a vapor	48
2.6.1 Cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos para contenedores llenos de gas ideal	48
2.6.1.1. Cálculo basado en consideraciones teóricas	50
2.6.1.2. Cálculo basado en relaciones empíricas	53
2.6.2. Cálculo de la distancia de los proyectiles	56

3	
3 Incendios	59
3.1. Variables de interés	60
3.2. Métodos generales para determinar la radiación térmica	60
3.2.1. Modelo de punto fuente	61
3.2.2. Modelo de la flama sólida	62
3.3. Incendio flash	67
3.3.1. Modelos para la geometría	68
3.3.2. Modelos para la radiación	71
3.4. Bola de fuego	76
3.4.1. Modelos para la geometría	77
3.4.1.2. Modelos teóricos	79
3.4.2. Modelos para la radiación	84
3.5. Incendio de charco	91
3.5.1. Modelos para la geometría	91
3.5.2. Modelos para la radiación	96
3.6. Dardo de fuego	102
3.6.1. Modelos para la geometría	102

3.6.2. Modelos para la radiación 109

4

4. Dispersión atmosférica 113

4.1. Turbulencia atmosférica y dispersión 114

4.2. Estabilidad atmosférica 114

4.3. Elevación de chorro de gas 119

4.4. Elevación de la nube 119

4.5. Dispersión pasiva 120

4.5.1. La modelación de la dispersión pasiva 120

4.5.1.1. Modelo de Roberts 122

4.5.1.2. Modelo de Sutton 125

4.5.1.3. Modelo de Pasquill 126

4.5.1.4. Modelo de Pasquill-Gifford 131

4.6. Dispersión de gas denso 135

4.6.1. La modelación de la dispersión de un gas denso 136

4.6.2. Tipos de modelos de gas denso 139

4.6.2.1.1. Modelo de Boureau de Minas 139

4.6.2.1.2. Modelo de Clancey 140

4.6.2.1.3. Modelo de Germeles y Drake 140

4.6.2.2. Consideraciones de los modelos de caja 141

4.6.2.3. Modelo SLAB 142

5

5.0 Aplicación de los modelos matemáticos analizados a una industria con actividad altamente riesgosa 146

5.1. Descripción general de las actividades de la gasera 147

5.2. Elementos que integran a la gasera 147

5.3. Descripción de los procesos 147

5.3.1. Recepción del producto 149

5.3.2. Llenado de autotanques para la distribución 150

5.4. Características del gas LP 151

5.5. Posibles escenarios ante un evento extraordinario 155

5.6. Análisis de consecuencias 156

5.6.1. Análisis usando software libre 157

5.6.1.1. Descripción del software 157

5.6.1.2. Llenado de datos 158

5.6.1.2.1. Datos del sitio 159

5.6.1.2.2. Datos de fecha y hora 160

5.6.1.2.3. Datos de la sustancia 161

5.6.1.2.4. Características atmosféricas 163

5.6.1.3. Simulación 164

5.6.1.3.1. Escenario 1. Formación de nube tóxica 164

5.6.1.3.2. Escenario 2. Formación de nube inflamable 166

5.6.1.3.3. Escenario 3. Generación de incendio en la fuga 167

5.6.1.3.4. Escenario 4. Explosión BLEVE 169

5.6.2. Simulación mediante modelos matemáticos 170

5.6.2.1. Análisis 1. Incendio flash 170

5.6.2.2. Análisis 2. Explosión de nube de vapor 183

5.6.2.3. Análisis 3. Explosión BLEVE 190

5.6.3. Análisis mediante el uso del software PSC 202

2011

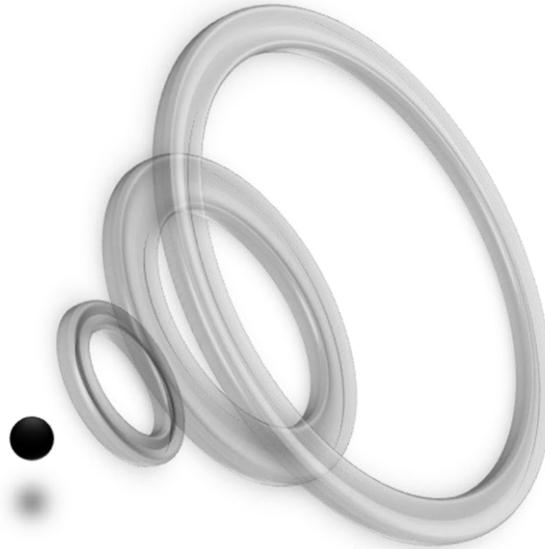
5.6.3.1. Descripción del software.....	202
5.6.3.1. Simulación de dispersión.....	203

6

6.0. Conclusiones.....	214
------------------------	-----

7

7.0 Bibliografía	215
------------------------	-----



I. INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales de transformación y comercialización es común el uso y manejo de sustancias que, por sus efectos negativos al ambiente y a los seres vivos, son consideradas como sustancias peligrosas. Estas sustancias suelen almacenarse y transportarse en cantidades grandes con el fin de optimizar el proceso en términos económicos, hecho que involucra un riesgo mayor.

La peligrosidad de una sustancia está en función de los posibles efectos físicos por su liberación o mal manejo. Los efectos físicos conllevan cambios en las condiciones físicas promedio, tales como presión, temperatura, presencia de sustancias tóxicas mezcladas con el aire, suelo y agua. Inclusive, algunas sustancias peligrosas suelen presentar más de un posible efecto físico.

Un evento extraordinario a consecuencia de una actividad altamente riesgosa se refiere a la ocurrencia de un accidente, generalmente debido a errores humanos durante los procesos, fallas mecánicas, o bien, a la negligencia durante la planeación. Este hecho afecta directamente al diseño de los procesos.

Así, durante el proceso de planeación de una planta industrial cuyas actividades sean consideradas como altamente riesgosas, es imperativo

conocer anticipadamente los posibles efectos físicos que se producirían en caso de un evento extraordinario.

1.1. OBJETIVOS PRINCIPALES

1. Analizar los modelos matemáticos utilizados para la predicción de consecuencias por incendio, explosión o dispersión ocasionada por la liberación instantánea de una sustancia peligrosa.
2. Desarrollar un programa de computadora para la simulación de efectos físicos.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. De los modelos analizados conocer los principios que los sustentan, las ecuaciones que los describen, sus alcances y limitaciones.
2. Generar resultados gráficos de calidad superior a los creados por los programas de dominio público, por ejemplo el software de la EPA, ALOHA.
3. Aplicar el simulador elaborado a un caso real de la industria en el que se realicen actividades que involucren el riesgo de ocurrencia de los distintos fenómenos objeto de este estudio.

I.2. JUSTIFICACIÓN

La Legislación Mexicana establece en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en su Capítulo V, Art. 145 que:

“Quienes realicen actividades altamente riesgosas, en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría (SEMARNAT) un estudio de riesgo ambiental, así como someter a la aprobación de dicha dependencia y de las Secretarías de Gobernación, de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos”

Así mismo, el reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, establece que:

“Quienes pretendan realizar actividades altamente riesgosas que requieran contar con autorización en materia de evaluación del impacto ambiental, conforme a lo previsto por la Ley, deberán incluir a la manifestación del impacto ambiental el estudio de riesgo respectivo, el cual deberá contener la información prevista en el artículo 12 de este Reglamento y se evaluará de acuerdo a las disposiciones del Reglamento de la Ley en materia de Evaluación del Impacto Ambiental”.

Debe de entenderse entonces, que el análisis de consecuencias es parte fundamental del análisis de riesgo. El riesgo puede clasificarse, primero conociendo la frecuencia de ocurrencia del evento extraordinario y posteriormente multiplicando dicha frecuencia por la magnitud de las consecuencias de dicho evento, tal como lo indica la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo} = (\text{Frecuencia de ocurrencia}) (\text{magnitud de las consecuencia})$$

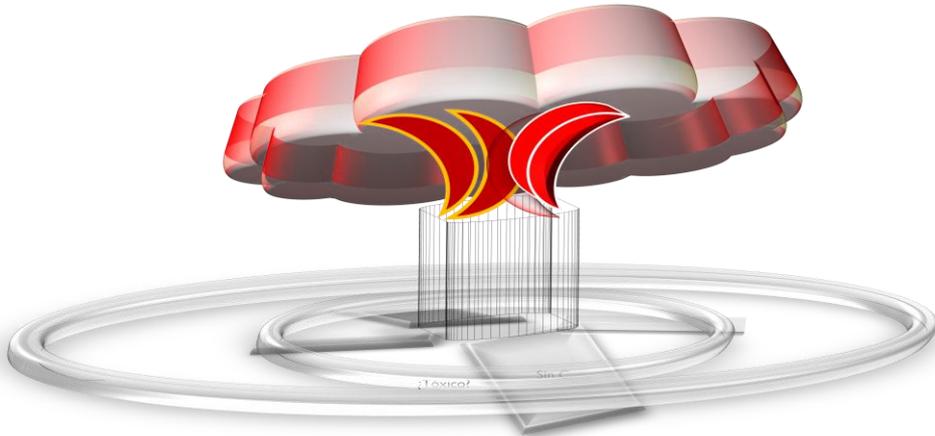
Así, puede decirse que si un evento extraordinario tiene una probabilidad de ocurrencia, en promedio, 1 cada 30 años y la magnitud de las consecuencias es de \$900,000 por daños a infraestructura, entonces puede decirse que el riesgo es de \$ 30,000 al año según la siguiente expresión.

$$\text{Riesgo} = 1/(30\text{años}) \times 900,000 \text{ pesos} = \$30,000 \text{ al año}$$

La predicción de dichos fenómenos puede hacerse mediante la consulta a expertos, comparación con datos históricos de instalaciones similares, o bien, mediante la aplicación de modelos matemáticos para la predicción de consecuencias, que es el propósito de este documento.

Los modelos de dominio público generados para la predicción de consecuencias, por ejemplo ALOHA, muestran resultados gráficos muy limitados, es decir, solo generan gráficos propios de un instante. En cambio el software producto de esta investigación, generará resultados gráficos no solo para un instante sino que podrán observarse, en el caso de dispersiones, concentraciones para distintos tiempos.

El generar resultados gráficos en función del tiempo representa una mejora con respecto a los programas existentes, sin embargo, es necesario complementar los resultados generados utilizando el concepto de dosis, es decir, que el programa no solo muestre resultados en función de la concentración para un instante, sino que genere áreas vulnerables, es decir, relacionar concentración con tiempo de exposición.



2. EXPLOSIONES

Una de las posibles consecuencias debidas al mal manejo de sustancias inflamables es una explosión, la cual es una liberación de energía que produce una onda expansiva que implica la variación súbita de la densidad, presión y velocidad del gas que rodea a la fuente de energía. La intensidad de la explosión depende de la velocidad con la que se libera la energía. No todas las explosiones producen los mismos efectos; la diferencia principal está, entre otras cosas, en la velocidad de propagación de la onda generada. Si la velocidad es alta, entonces la explosión es una detonación, y si la velocidad es baja se le llama deflagración. Un factor determinante para la velocidad de propagación de la onda es la densidad inicial de la sustancia explosiva.

Los tipos básicos de energía que pueden liberarse en forma de explosión, son: energía física, energía química y energía nuclear.

La energía física puede tomar muchas formas, tales como la presión en gases, la tensión en metales, o bien la energía eléctrica. Un ejemplo de la liberación de energía física es la liberación de gases sometidos a una presión alta a

causa de la ruptura de su contenedor. Otro ejemplo es la energía térmica. Por otra parte la energía química es aquella que se genera a partir de una reacción química. Un ejemplo es la explosión de un tanque que contiene gas inflamable, generándose la combustión.

Las explosiones debidas a la combustión de un gas inflamable son de dos tipos: deflagración y detonación.

Los apartados 2.2 y 2.3 contienen su descripción.

2.1. POSIBLES ESCENARIOS ANTE LA LIBERACIÓN

El punto de partida para determinar los efectos físicos es identificar los escenarios posibles ante la liberación de una sustancia peligrosa. Los distintos escenarios están en función de las características de la sustancia involucrada, además de las condiciones de contención. Esto es la temperatura del contenedor, la temperatura fuera del mismo, presión del almacenamiento y condiciones por las cuales se presenta la liberación de la sustancia peligrosa, es decir, por ruptura, exceso de presión, golpe o incendio externo.

Para la identificación del escenario más probable en función de las características descritas en el párrafo anterior se utiliza la figura 2.1, la cual muestra un árbol de eventos extraordinarios posterior a la liberación de una sustancia peligrosa.

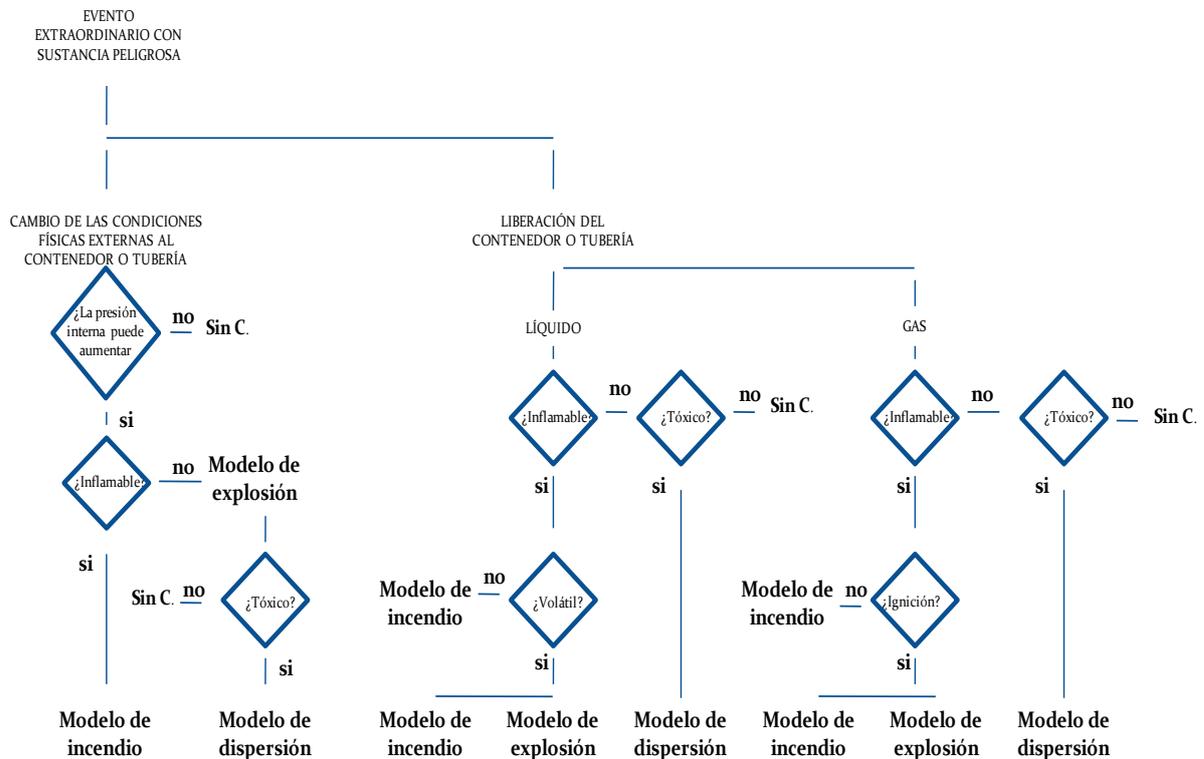


Fig. 2.1. Árbol de eventos extraordinarios

2.2. DEFLAGRACIÓN

Una deflagración es una explosión en la que la descomposición de los reactivos es provocada por la difusión molecular del calor provocado por las descomposiciones aledañas. Además, influye el mezclado turbulento de los reactivos y de los productos de combustión.

La propagación de la reacción química está limitada tanto por el transporte de sustancias como por la turbulencia dentro de las sustancias aun por reaccionar. La velocidad del frente de reacción es menor que la del sonido provocando sobrepresiones bajas que no superan 1 ó 2 atmósferas por encima de la presión local. Para mezclas de hidrocarburos con aire las velocidades de deflagración tienen valores en torno a 300 metros sobre segundo. Estas sobrepresiones bajas no conllevan un daño en estructuras. Sin embargo, si existen las condiciones adecuadas, una deflagración puede convertirse en una

detonación si el material explosivo se encuentra confinado y la onda inicial rebota en las paredes del contenedor y regresa al frente de reacción ocasionando una sobrepresión y una temperatura que provocarán una detonación inmediata.

2.3. DETONACIÓN

Una detonación es una reacción química en la que el frente de reacción se propaga debido a una fuerte onda de choque que aumenta la presión de la mezcla por encima de la temperatura de auto-ignición. Esto provoca que el frente de flama viaje como una onda de choque seguida de cerca por una onda de combustión que libera la energía para mantener a la misma, detonando de forma inmediata.

En la tabla 2.1 se muestran temperaturas de auto-ignición de las sustancias más comunes.

Tabla 2.1. Propiedades explosivas de gases inflamables en aire y en condiciones atmosféricas

sustancia	Límites de inflamabilidad (%vol)	Punto Flash (°C)	Temperatura de autoignición (°C)	Velocidad de quema laminar (m/s)
Metano	5.0–15.0	—	595	0.448
Etano	3.0–15.5	—	515	0.476
Propano	2.1–9.5	—	470	0.464
Etileno	2.7–34	—	425	0.735
Propileno	2.0–11.7	—	455	0.512
Hidrógeno	4.0–75.6	—	560	3.25
Acetona	2.5–13.0	-19	540	0.444
Dietil Eter	1.7–36	-20	170	0.486
Acetileno	1.5–100	—	305	1.55
Etanol	3.5–15	12	425	—
Tolueno	1.2–7.0	—	535	—
Ciclohexano	1.2–8.3	-18	260	—
Hexano	1.2–7.4	-15	240	—
Xileno	1.0–7.6	30	465	—

Una detonación está limitada únicamente por la reacción misma. Puede llegar a tener velocidades de reacción iguales o mayores a las del sonido. La descomposición del material explosivo sin detonar detonará en un tiempo mínimo de forma casi instantánea debido a la sobrepresión y las temperaturas generadas. En general una detonación, al conllevar una sobrepresión alta debida a la velocidad del frente de reacción, provocará daños mayores a los de una deflagración. Se puede decir que una detonación alcanza valores de sobrepresión del orden de cientos de kilopascales.

2.4. EXPLOSIÓN DE NUBE DE VAPOR

Uno de los fenómenos físicos que pueden ocurrir posteriores a la liberación de una sustancia peligrosa inflamable es una explosión de nube de vapor. Puede originarse por la evaporación de un líquido en el interior de un tanque roto, o bien, de un contenedor de gas que lo está liberando.

Para calcular las consecuencias debidas a la explosión de una nube de vapor es necesario, en principio, calcular el período de la fuente, es decir, el tiempo, cantidad de sustancia y la tasa de emisión, seguido de un análisis de dispersión. Posteriormente, efectuar el cálculo de las consecuencias de la explosión.

A nivel mundial se han suscitado varios accidentes que demuestran el impacto que pueden tener las explosiones de nube de vapor, como el ocurrido en la planta CAPROLACTAM de Nypro Ltd en Flixborough en el Reino Unido el 1 de Junio de 1974, o la explosión en Naphtha Cracking Unit of DSM en Beek en los Países Bajos en Septiembre 15 de 1975.

Como ya se mencionó en el capítulo 1 no todas las sustancias que provocan efectos físicos son inflamables. Algunas provocan afectaciones al ser humano por contacto con concentraciones tóxicas que generan daños agudos, entre otro tipo de consecuencias que se analizarán en capítulos posteriores. Sin embargo, si la nube generada a partir de la liberación es inflamable o por lo menos parte de la misma, entonces puede ocurrir una explosión de nube de vapor.

Para que una nube de vapor llegue a detonar se requieren condiciones específicas. En primer lugar el material liberado debe de ser inflamable y estar en condiciones adecuadas de presión y temperatura, la nube debe de estar formada antes de la explosión, finalmente la nube, o por lo menos parte de ella, debe de estar dentro del rango de inflamabilidad.

La predicción del modo de combustión es importante para determinar las consecuencias de la explosión de una nube de vapor. En general se presentarán deflagraciones, solo en condiciones extraordinarias ocurrirá una detonación.

Otra condición importante para que una explosión de nube de vapor produzca sobrepresión es la presencia de turbulencia atmosférica, hecho que mejora las condiciones de combustión.

2.4.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS POR EXPLOSIONES

Básicamente existen dos clases de modelos para la descripción del fenómeno de una explosión de nube de vapor. El primer grupo de modelos cuantifica la fuente como una cantidad equivalente de algún explosivo común, generalmente trinitrotolueno (TNT), con el fin de aplicar las características conocidas del explosivo en pruebas controladas. Históricamente este tipo de modelos han sido los más usados y aceptados por especialistas. Sin embargo, en la última década la determinación de la sobrepresión debido a la explosión de una nube de vapor ha sido objeto de investigación a nivel mundial, luego de descubrir las deficiencias de los métodos actuales disponibles. Tales investigaciones han dado como resultado modelos que toman en cuenta los distintos comportamientos de una explosión de nube de vapor. Este segundo grupo de modelos llamados de onda de choque debido a la carga combustible con aire, están siendo cada vez más usados aunque la falta de cierta información dificulta su aceptación total.

2.4.1.1. VARIABLES DE INTERÉS

En la figura 2.2 se observa que para cada tipo de explosión, es decir detonación o deflagración, existen diferentes formas de la onda de sobrepresión. Para poder definir la forma de la onda de sobrepresión en el tiempo y en el espacio, es necesario calcular algunos parámetros utilizando modelos matemáticos.

Uno de los parámetros que definen a la onda generada es el pico de sobrepresión, el cual indica el valor máximo de presión para cierto punto. Dicho valor es el más importante en el cálculo de consecuencias, ya que estas se definen en función de la sobrepresión experimentada. En la figura 2.2 se observa que en todos los casos la llegada de una onda de sobrepresión se caracteriza por un aumento súbito de la presión, seguido de un descenso de la misma hasta alcanzar valores por debajo de la presión atmosférica local. La presión generada es llamada sobrepresión y puede ser tanto negativa como positiva.

No solo basta conocer el valor máximo de sobrepresión, también es importante conocer el valor de la duración tanto en la fase positiva como en la negativa.

Un parámetro relacionado con los anteriores es el valor del impulso, el cual indica el valor del área bajo la curva de la onda de sobrepresión contra el tiempo en cualquiera de las fases. Se puede calcular como el área de un triángulo en el que la base es la duración de la fase y la altura el valor del pico de sobrepresión.

No es común que una nube de vapor detone, en general produce una deflagración, por ello la gráfica de sobrepresión contra el tiempo se parecerá más a la curva central de la figura 2.2. Dicho fenómeno producirá liberaciones de energía mucho más lentas, lo que conduce a picos de sobrepresión mucho más bajos, aunque la duración de la fase positiva sea mayor.

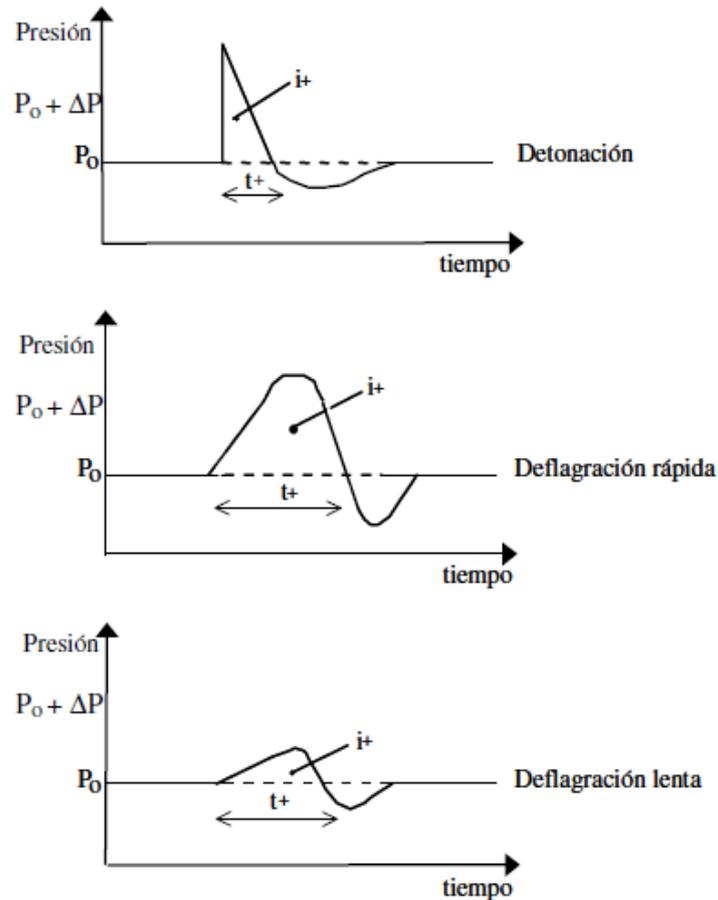


Fig. 2.2. Tipos de onda de choque para los diferentes tipos de explosión

2.4.1.2. MODELOS DE CARGA EQUIVALENTE

El TNT es un explosivo común. En cuestiones militares y de minería ha sido ampliamente utilizado y estudiado, por lo que se cuenta con información tabulada que permite crear patrones de daño relacionando las cantidades de TNT involucradas.

El método de TNT equivalente permite predecir de forma fácil los daños ocasionados por la explosión de una nube de vapor, haciendo una equivalencia entre la cantidad de sustancia explosiva liberada y la masa de TNT que provocaría los mismos efectos.

2011

La relación entre la masa de la sustancia inflamable en cuestión y la masa equivalente de TNT, está dada por la expresión:

$$W_{TNT} = \alpha W_C \frac{\Delta H_C}{\Delta H_{TNT}} \quad 1.1$$

donde:

W_C	Masa del explosivo de interés liberada a la atmósfera	[kg]
ΔH_C	Energía de combustión del combustible por unidad de masa	[J.kg ⁻¹]
ΔH_{TNT}	Energía de onda de choque del TNT por unidad de masa	[J.kg ⁻¹]
W_{TNT}	Masa de trinitrotolueno que equivale a la cantidad de explosivo de interés que provoca los efectos de la explosión	[kg]
α	factor adimensional de rendimiento de la explosión	[1]

El rendimiento α representa el porcentaje de la energía liberada que se invierte en la generación de la onda de sobrepresión. En un estudio realizado a 23 accidentes, se observó que para nubes de hidrocarburos el parámetro α se encuentra en un rango de valores entre 0.02% y 15.9%. Los valores propuestos por algunos autores son los siguientes:

Autor	Valor de α
Cugan	0.1
ACMH	0.042
Brasie y Simpson	0.03
Davenport	0.02

En general el valor de 0.1 es muy conservador, es decir genera resultados muy elevados, hecho que indica consecuencias sobradas. Valores de $\alpha = (0.03, 0.04)$ son los más recomendados.

Un hecho interesante es que el rendimiento mecánico de las explosiones de nubes de vapor de hidrocarburos es muy bajo, ya que una fracción muy pequeña de la energía liberada se convierte en energía mecánica. La mayor

parte se convierte en energía luminosa, lo que hace que las explosiones de nube de vapor no sean tan devastadoras.

Utilizando el gráfico mostrado en la figura 2.3, una vez conocida la masa de TNT equivalente, es posible determinar el valor del pico de sobrepresión generado en un punto a partir del cálculo de la distancia normalizada, misma que se calcula dividiendo el valor de la distancia entre el receptor y el centro de la nube entre la raíz cúbica de la cantidad de TNT calculado, como lo describe la ecuación 2.2.

$$dn = \frac{d}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad 2.2$$

donde:

dn distancia normalizada
d distancia entre receptor y centro de la nube
W_{TNT} masa de TNT equivalente

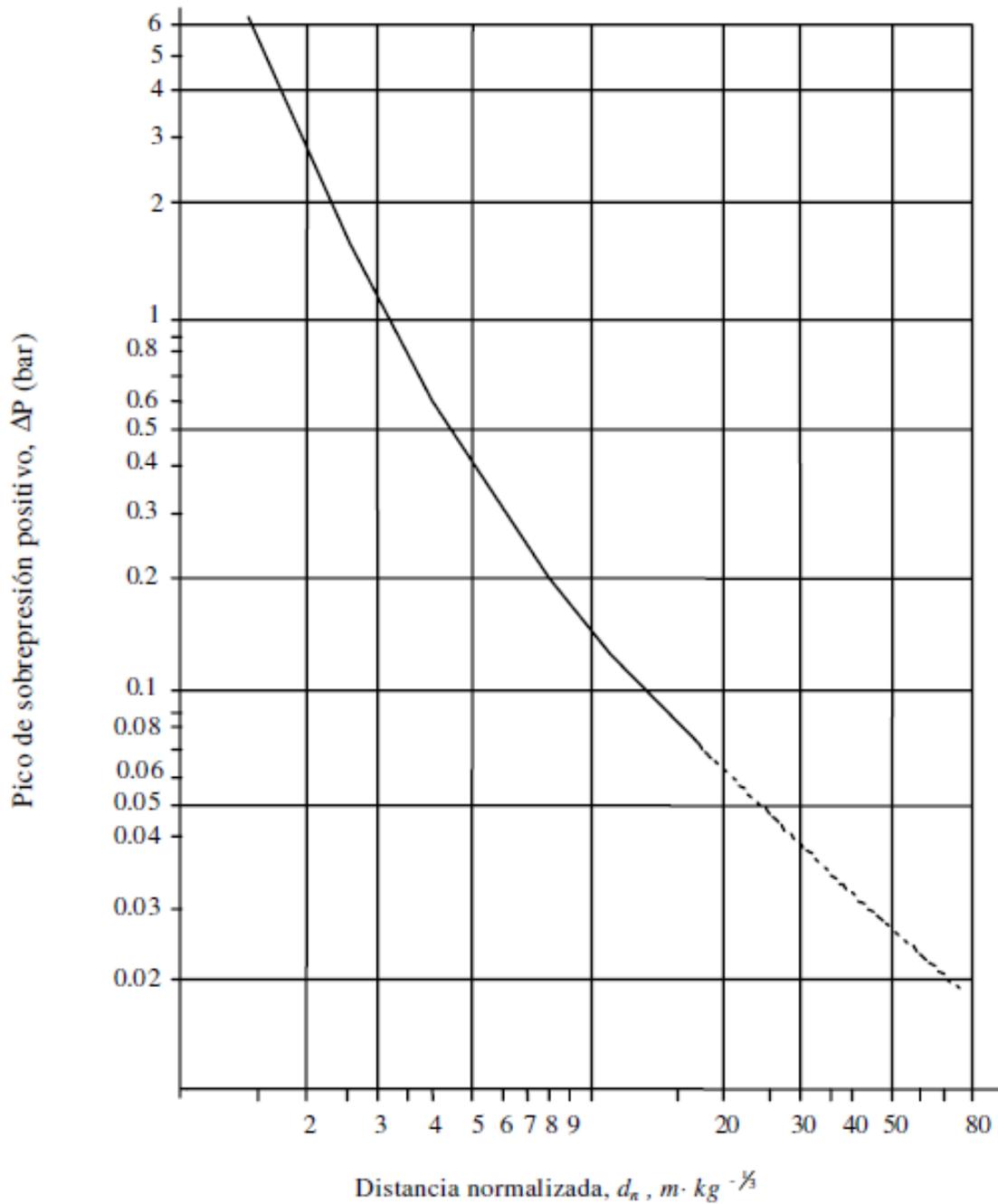


Fig. 2.3. Gráfico para la determinación del Pico de sobrepresión

Otro factor de interés en el cálculo de consecuencias es el impulso de la fase positiva. Este valor se calcula utilizando el gráfico mostrado en la figura 2.4 mediante la distancia normalizada.

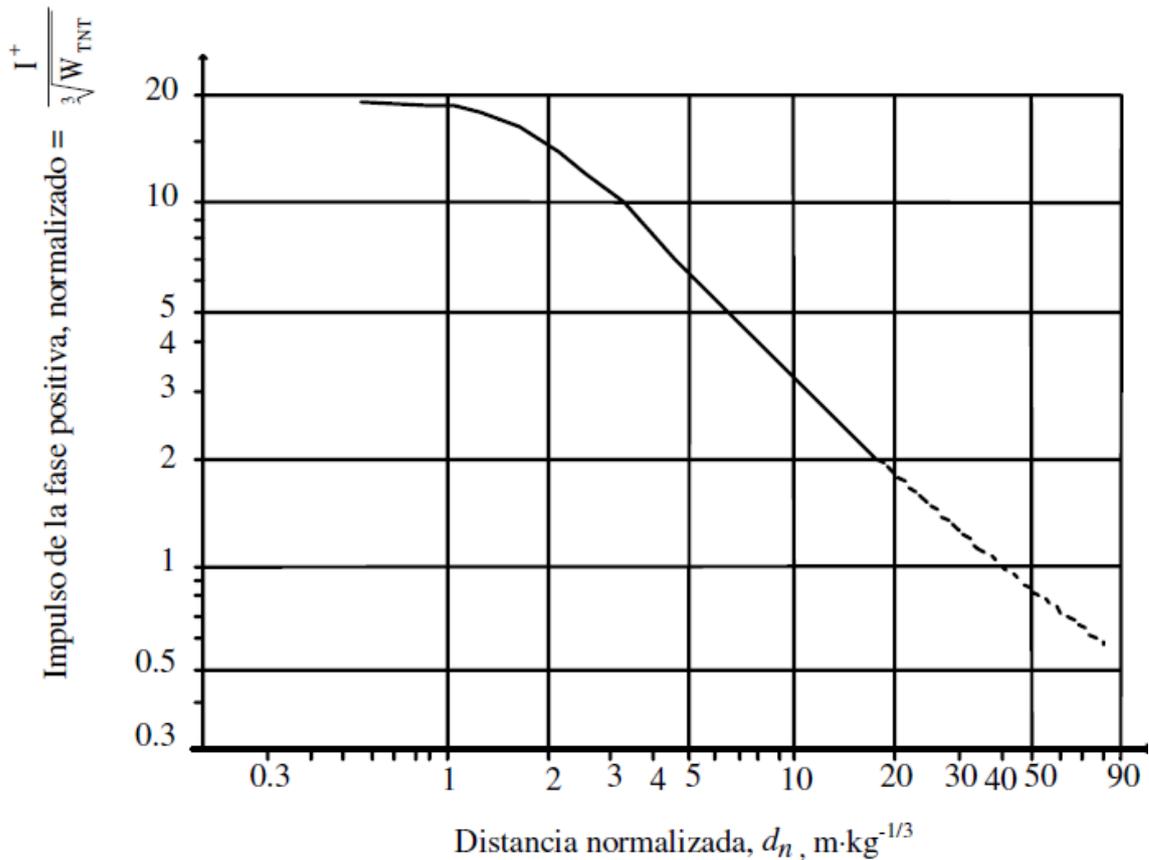


Fig. 2.4. Impulso de la fase positiva de la onda de choque en función de la distancia normalizada

Por último el valor de la duración de la fase positiva se calcula en función de la distancia normalizada utilizando el gráfico mostrado en la figura 2.5.

Los resultados obtenidos aplicando el método de TNT equivalente a las explosiones de nubes de vapor no son tan precisos, ya que existe una diferencia entre la curva generada por la detonación de una carga de TNT y la generada por la deflagración de nube de vapor.

A diferencia de una detonación en una deflagración la amplitud es menor y la duración mayor. Para la validación de los resultados obtenidos por el método de TNT equivalente es importante considerar que para puntos cercanos a la liberación (máximo 3 veces el diámetro promedio de la nube) los resultados son inexactos mientras que para distancias mayores (mínimo 10 veces el valor del diámetro promedio de la nube) los resultados son más cercanos a la realidad.

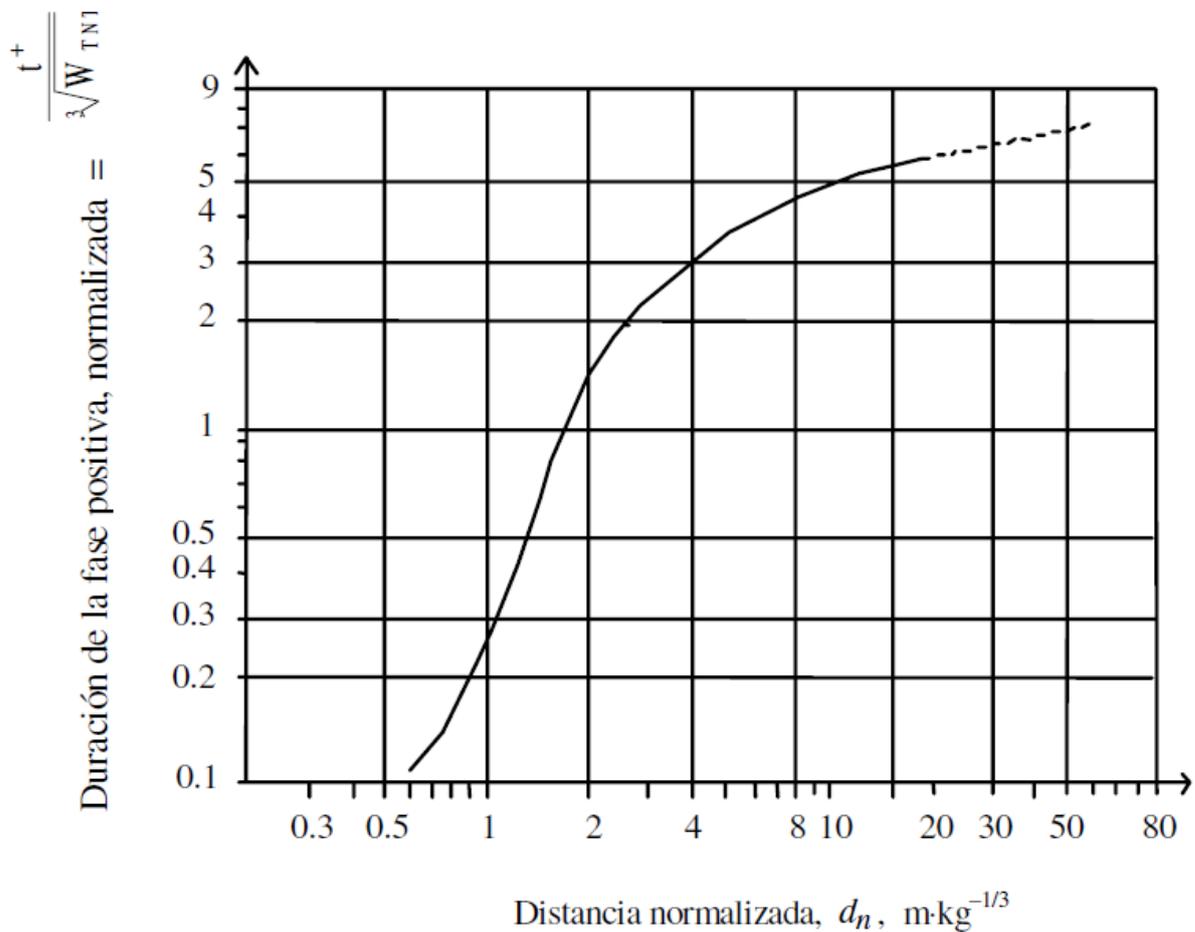


Fig. 2.5. Duración de la fase positiva en función de la distancia normalizada

En cualquier caso, si lo que interesa es determinar las consecuencias derivadas de la explosión de una nube de vapor, lo importante no es el valor puntual de la sobrepresión sino la evolución de esta en el tiempo; en estos casos es mejor utilizar el método de multienergía que se describe a continuación.

2.4.1.3. MODELO DE MULTIENERGÍA

Los resultados que genera el método de TNT equivalente presentan inconsistencias con respecto a los efectos físicos reales ya que es difícil identificar con certeza la cantidad de sustancia inflamable presente en la nube.

Los parámetros que definen la intensidad de la onda de choque son principalmente el tamaño y la naturaleza del confinamiento y obstrucción dentro de la nube. A diferencia del método de TNT equivalente estos principios son tomados en cuenta en el método de multienergía.

Existe una proposición cada vez más aceptada en el sentido de que es muy poco probable que se presente una detonación de una nube de mezcla aire-combustible. La poca homogeneidad en la mezcla inherente a la turbulencia ambiental, propicia una disminución en la probabilidad de la propagación de la detonación. Se debe asumir, en cualquier caso, que el tipo de explosión provocada por una nube de vapor será siempre una deflagración. Combustiones deflagrativas originan ondas de choque solo en aquellas porciones de nube que, en un estado de calma, se encuentran obstruidas o parcialmente confinadas.

Contrario a otros métodos, el método de multienergía define la explosión de nube de vapor como un número de subexplosiones que corresponden a varias fuentes de ondas de choque dentro de la nube.

Como lo ilustra la figura 2.6, los efectos de la onda de choque de cada una de las dos fuentes de combustible liberado cubiertas por una nube de vapor, tendrán que ser considerados por separado.

En el método de multienergía el riesgo de una explosión de una nube de vapor no es determinado únicamente por la mezcla aire-combustible, sino que considera el medio en el cual se desarrolla la dispersión. El medio representa las condiciones de frontera en el proceso de combustión. Es posible analizar el riesgo de explosión únicamente analizando el medio ambiente potencial generador de explosiones.



Fig. 2.6. Generación de dos explosiones producto de la misma nube

Los gráficos de las figuras 2.7 y 2.8 representan las características de la onda de choque de una carga hemisférica de radio R_0 derivada de una mezcla aire-combustible con una calor de combustión de $3.5 \text{ E}6 \text{ (J/m}^3\text{)}$, valor típico del calor de combustión considerado para una mezcla aire-combustible. Los gráficos representan solo los parámetros más significativos de una onda de choque, tales como:

- tamaño del pico de sobrepresión y
- duración de la fase positiva.

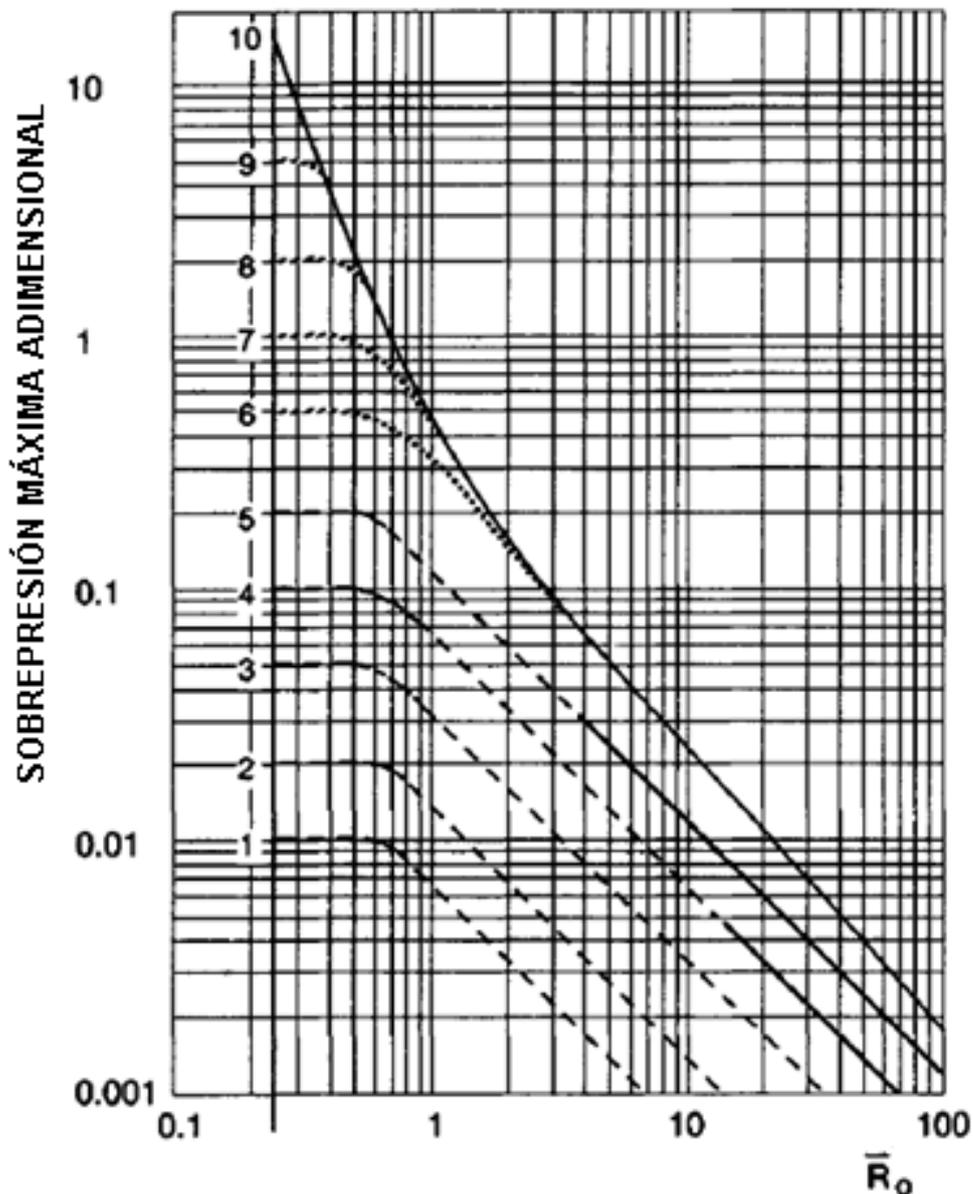


Fig. 2.7. Determinación de la sobrepresión máxima adimensional

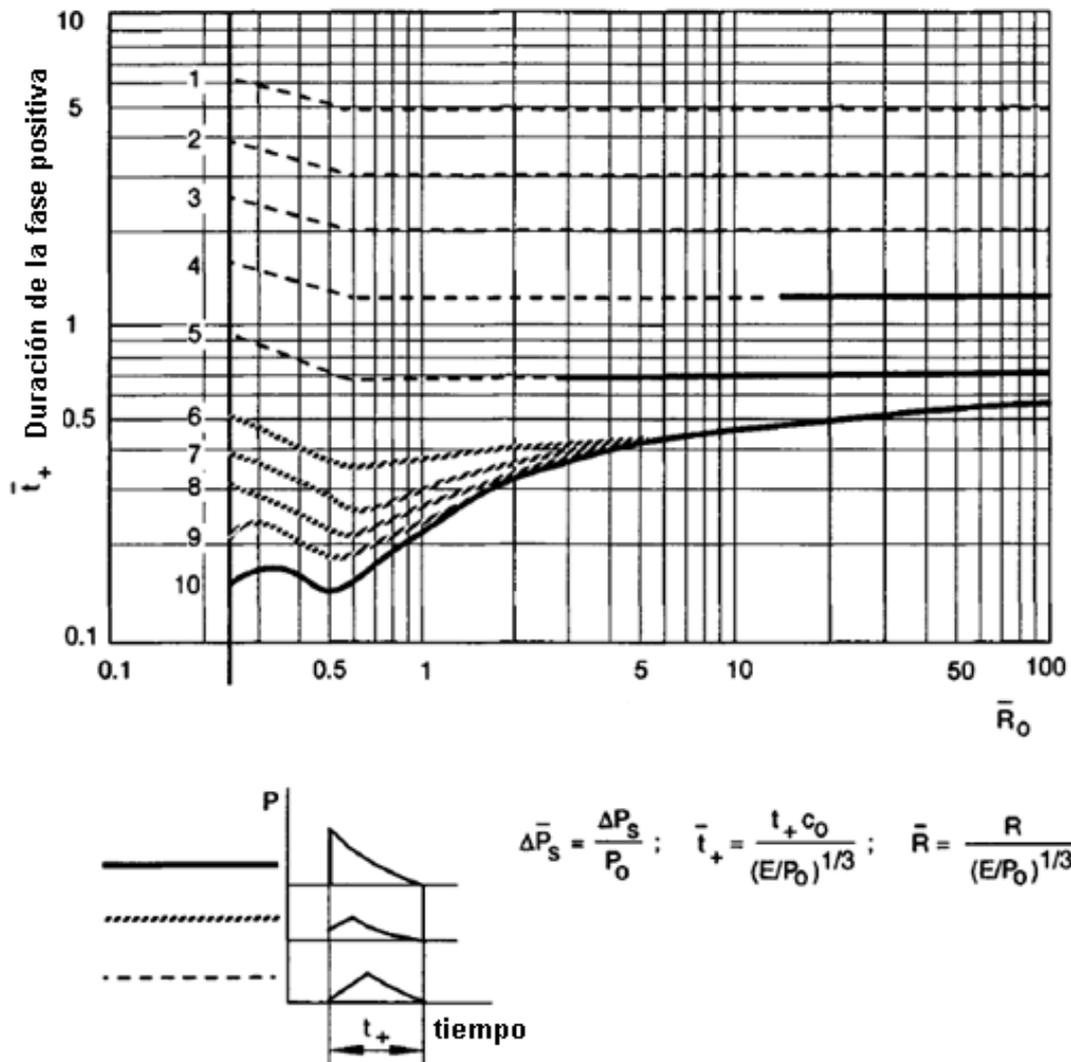


Fig. 2.8. Determinación de la duración de la fase positiva

Con los dos parámetros anteriores se puede obtener el impulso en función de la distancia al centro de la onda de choque (R_0 normalizada). Los datos están intrínsecamente relacionados con la energía de combustión (E) y parámetros que caracterizan a la atmósfera como la presión y la velocidad del sonido (C_0).

Como se observa en la figura 2.8, la fuerza de la onda de choque está representada por números en un rango desde el 1 hasta el 10, en donde 1 representa una fuerza de explosión muy baja y el 10 una fuerza detonante.

Al utilizar el método es importante considerar, que a distancias mayores a 10 veces el radio de la carga, la onda de choque es casi independiente de la fuerza inicial.

El procedimiento para la implementación del concepto de multienergía en la modelación de consecuencias por la explosión de una nube de vapor se describe a continuación:

1. Identificar las fuentes potenciales de ondas de choque dentro del área cubierta por la nube inflamable, tales como:

- configuraciones de objetos de procesos de plantas industriales o refinerías tales como pilas de válvulas o cajas,
- espacios grandes entre planos paralelos tales como estacionamientos,
- espacios grandes en forma tubular como túneles, pasillos, etc.,
- posibles fugas de tanques a presión que generen un flama jet

2. Calcular la energía de las cargas equivalentes de aire-combustible tomando las siguientes consideraciones:

- Cada fuente de onda de choque por separado.
- De manera conservadora, la totalidad de la mezcla combustible-aire, que se encuentra dentro de las fuentes identificadas en el punto anterior, contribuye con la onda de choque.
- Calcular los volúmenes de mezcla inflamable presentes en las fuentes. El cálculo se puede efectuar mediante la revisión de las áreas de las fuentes, o bien, de los jets. El material inflamable podría no llenar la totalidad del volumen, además el equipamiento puede ocupar parte del volumen.
- Calcular la energía de combustión (E) de cada una de las fuentes consideradas, multiplicando el volumen calculado por $3.5E6(J/m^3)$.

3. Calcular la fuerza de la onda de choque para cada una de las fuentes consideradas.

Una consideración segura y muy conservadora es que la fuerza de la onda de choque tenga un valor de 10. Sin embargo, un valor de 7 es muy acertado. Además, para presiones menores a 0.5 bares no parece haber diferencia significativa en el rango de poder de la fuente entre el 7 y el 10.

Para modelar los efectos de la onda de choque resultante de las partes de la nube no calculadas aún, se pueden considerar fuerzas de fuente bajas. Para partes extendidas y en calma, considerar una fuerza mínima de 1. Para otras

fuentes que se encuentran en movimiento turbulento bajo, se puede considerar una fuerza de fuente de 3.

Una vez que la energía y la fuerza de la onda de choque de las fuentes individuales han sido estimadas, se determina, a partir del uso de los gráficos de la figuras 2.7 y 2.8, el pico de sobrepresión y la duración de la fase positiva a cualquier distancia R desde del centro de la onda de choque. Para ello es necesario calcular la distancia normalizada que se obtiene con la ecuación 2.3.

$$Rn = \frac{R}{\sqrt[3]{\frac{E}{P_0}}} \quad 2.3$$

donde:

Rn	Distancia normalizada desde el centro de la onda de choque
R	Distancia real desde el centro de la onda de choque
E	Energía de combustión
P₀	Presión atmosférica local

Una vez obtenido el pico de sobrepresión y la duración de la fase positiva adimensionales, el pico de sobrepresión se obtiene multiplicando el resultado por la presión atmosférica local, como lo muestra la ecuación 2.4.

$$P_S = \Delta P_S * P_0 \quad 2.4$$

En el caso de la duración de la fase real, se obtiene con la siguiente ecuación

$$t_+ = t_+^- \left[\frac{\sqrt[3]{\frac{E}{P_0}}}{C_0} \right] \quad 2.5$$

donde:

P_s	Pico de sobrepresión provocado por la onda de choque	[Pa]
ΔP_s	Pico de presión sin dimensiones	[-]
P_0	Presión atmosférica local	[Pa]
t_+	Duración de la fase positiva	[s]
t_+^-	Duración de la fase positiva sin dimensiones	[-]
E	Energía de combustión de la fuente	[J]
C_0	Velocidad local del sonido	[m/s]

En el caso de que dos de las fuentes se encuentren muy cercanas entre sí, es muy posible que la combustión de éstas se lleve a cabo simultáneamente. Para definir los efectos de tales explosiones, éstas se superponen. Para la modelación se considera una fuerza de fuente de valor 10 y las energías de las dos fuentes se suman para así obtener un solo pico de sobrepresión y una sola duración de la fase positiva.

Por último, si las condiciones atmosféricas permiten tener una dispersión lenta y se puede presentar una ignición larga, se debe considerar la detonación de nube de vapor. En ese caso todo el material combustible que se encuentre en los límites de inflamabilidad deberá de considerarse con una intensidad de fuente de valor máximo 10.

2.4.1.4. MODELO DE BAKER-STREHLOW

Strehlow desarrolló un estudio numérico extenso acerca de la estructura de las ondas de choque generadas, tanto por flamas con velocidad constante como aceleradas en un sentido esférico. El resultado de esta investigación fue la generación de gráficos que representan el comportamiento de los parámetros adimensionales de sobrepresión e impulso positivo en función de la distancia escalada al centro de la nube. Tal estudio se enfocó en velocidades de flama que van desde bajas deflagraciones a altas detonaciones.

Baker comparó las gráficas de Strehlow con datos experimentales y después los aplicó a programas de investigación, investigación de accidentes y estudios de predicción.

Para la aplicación de este método en la predicción de efectos de una explosión de nube de vapor es necesario definir tanto la energía de combustión, como el cálculo de la distancia normalizada (R'), después leer en la gráfica los parámetros adimensionales: pico de sobrepresión (P_S') y el impulso específico (i_S'). Las ecuaciones 2.3 y 2.4 muestran las variables que intervienen en la modelación de efectos ante la explosión de una nube de vapor.

$$R' = \frac{r \cdot \sqrt[3]{P_0}}{\sqrt[3]{E}} \quad 2.3$$

donde:

R'	Distancia normalizada	[m]
r	Distancia desde el receptor hasta el centro de la nube de vapor	[m]
P_0	Presión atmosférica local	[Pa]
E	Energía de explosión	[J]

$$i_S' = \frac{i \cdot A_0}{P_0^{2/3} \cdot E^{1/3}} \quad 2.4$$

donde:

i_S'	Impulso normalizado	[-]
i	Impulso del incidente	[Pa-s]
A_0	Velocidad del sonido local	[m/s]
P_0	Presión atmosférica	[Pa]
E	Energía	[J]

El uso de las gráficas de las figuras 2.9 y 2.10, requiere la elección correcta de la curva que caracterice la velocidad máxima de la flama alcanzada. Algunos estudios realizados por Strehlow demuestran que se produce la misma onda de choque, independientemente de si es producida por una flama con velocidad constante o una flama con velocidad variable, siempre y cuando estas alcancen la misma velocidad máxima. Por ello, es posible que datos que son resultados de experimentos controlados e investigaciones de accidentes, sean usados objetivamente para seleccionar la curva adecuada.

Cada una de las curvas es caracterizada con dos velocidades de flama M_W y M_{SU} . La velocidad de flama M_W se relaciona con un sistema coordenado fijo, por ejemplo el terreno, mientras que M_{SU} representa la velocidad de la flama relativa a los gases moviéndose al frente de la flama. El cálculo de los números Mach M_W y M_{SU} de ambas velocidades son relativos a la velocidad del sonido local.

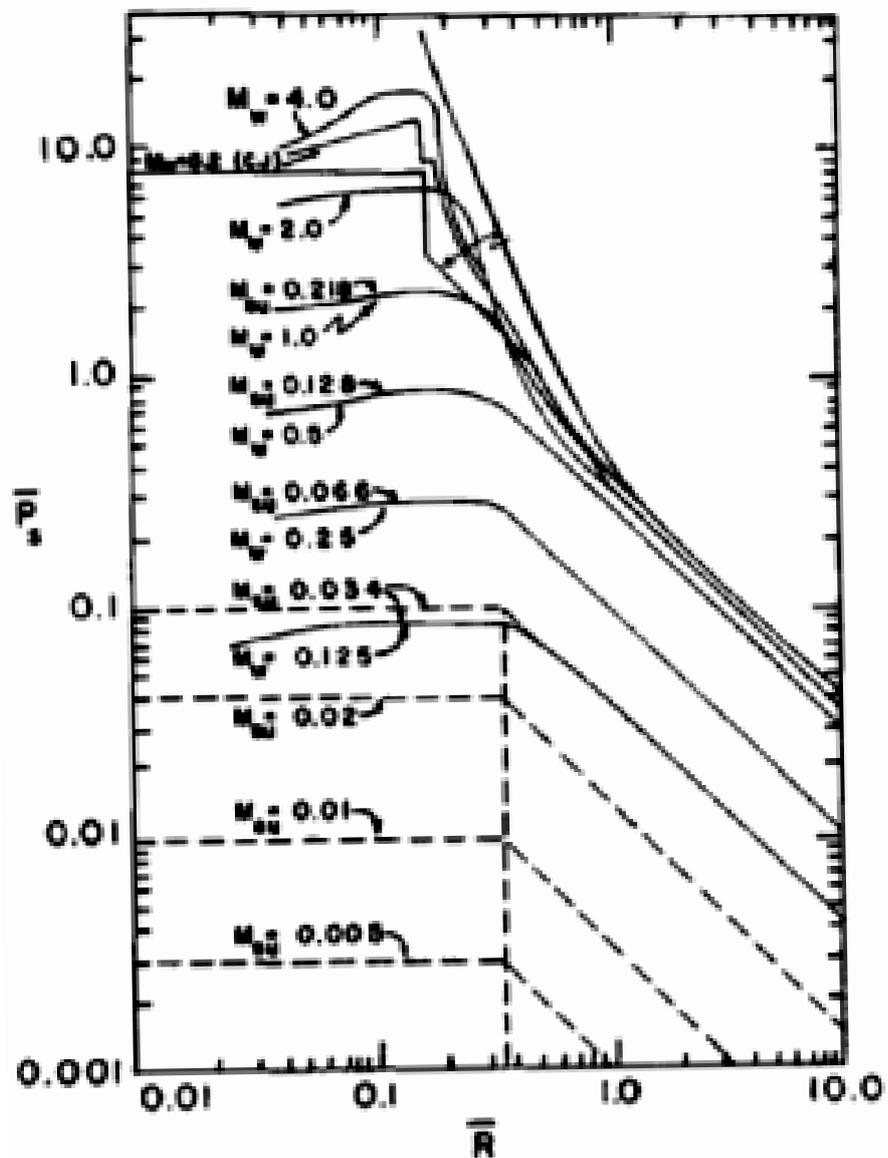


Fig. 2.9 Sobrepresión adimensional en función de la distancia escalada

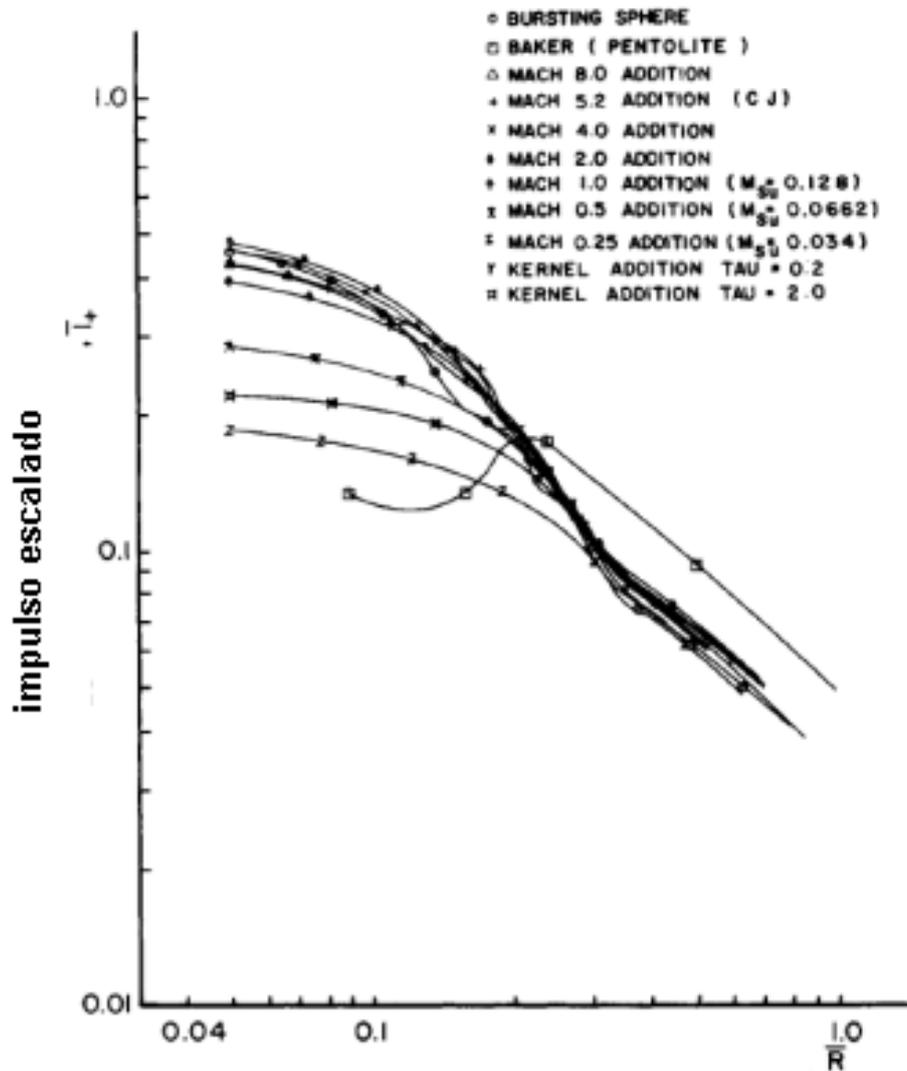


Fig. 2.10. Impulso escalado en función de la distancia escalada

La velocidad de la flama es función del confinamiento, así como de la densidad de los obstáculos, la reactividad del combustible y la intensidad de la detonación. La reactividad del combustible es un parámetro que se utiliza para categorizar la tendencia a acelerar la flama a altas velocidades. Se acepta en general que el hidrógeno, acetileno, óxido etileno y óxido de propileno son gases de alta reactividad, mientras que metano y monóxido de carbono son gases de baja reactividad; los demás gases tienen reactividad promedio.

Las fuentes de ignición pueden ser ligeras o fuertes. Chispas, superficies calientes o bien flamas abiertas son ejemplos de fuentes de ignición ligeras,

mientras que flamas jet o explosivos son categorizados como fuentes de ignición fuertes.

En el caso de la intensidad de la ignición, ésta no tiene un efecto significativo en la velocidad de la flama en comparación con las otras variables mencionadas anteriormente. Únicamente tendrá efecto cuando se encuentre presente una fuente de ignición fuerte.

En la literatura existen métodos para determinar la velocidad de la flama con base en la combinación de los parámetros anteriores.

Otro parámetro necesario para calcular los efectos de la onda de choque producida por la explosión de una nube de vapor es la energía. Esta representa el calor sensible que es liberado por la porción de la nube que contribuye a la generación de la onda de choque. Cualquier método de los aceptados para determinar la energía de explosión de una nube de vapor es potencialmente aplicable, tales métodos incluyen:

- Estimar el volumen dentro de cada región calculando la masa del combustible en una mezcla estequiométrica multiplicando la masa del combustible por el calor de combustión y tratando cada volumen dentro de la porción inflamable de la nube como fuentes de ondas de choque por separado.
- Estimar la cantidad de material dentro de los límites inflamables por medio de la modelación de la dispersión y multiplicando éste por el tiempo de calor de combustión y por un factor de eficiencia (generalmente más alto que el aplicado en el apartado anterior, del 5% al 20%).
- Una vez que la energía ha sido calculada, ésta se debe de modificar multiplicándola por un factor de reflexión sobre el suelo, por ejemplo un factor de corrección por expansión hemisférica. El factor de reflexión del suelo es generalmente 2 para nubes de vapor que están en contacto con el suelo. Si la liberación de vapor es elevada y no se dispersa hacia el nivel del suelo, es conveniente un factor entre 1 y 2.

2.5. EXPLOSIÓN DE LÍQUIDO EN EBULLICIÓN EXPANDIÉNDOSE A VAPOR (BLEVE)

Una explosión de líquido en ebullición expandiéndose a vapor que por sus siglas en inglés (*boiling liquid expanding vapor explosion*) se conoce como BLEVE. Es una explosión que resulta de la ruptura de un recipiente que en su interior contiene un líquido a una temperatura mayor a la temperatura de ebullición a presión atmosférica. A diferencia de una explosión de nube de vapor, o de un incendio flash, el líquido que produce la explosión no necesariamente tiene que ser inflamable para producir la explosión.

Los líquidos no inflamables que explotan como BLEVE, producen dos tipos de efectos físicos. Una onda de choque producida por el inmediato cambio de fase de líquido a vapor lo que conlleva una expansión repentina y la fragmentación del contenedor.

Las explosiones BLEVE son comúnmente asociadas a liberaciones de líquidos a causa del calentamiento del contenedor por un incendio externo. Si el líquido es inflamable, adicionalmente a los efectos ya mencionados, podría producirse la ignición de la nube de vapor formada y generarse una bola de fuego, la cual tiende a elevarse. Como se menciona en el apartado de incendios, las consecuencias de una bola de fuego incluyen las quemaduras de piel y el posible calentamiento de otros contenedores aledaños.

Si el líquido en el interior del contenedor es inflamable y este se rompe, para que ocurra la ignición debe existir la mezcla correcta combustible-aire. Efectos adicionales producidos por la ruptura pueden ser, por ejemplo, la explosión de una nube de vapor, una flama jet, o bien, un incendio flash.

Los efectos físicos de una explosión BLEVE están en función de las condiciones del líquido, de las paredes del contenedor en el momento de la ruptura y de las causas de la ruptura del contenedor, las cuales pueden ser:

- un incendio externo,
- impacto mecánico externo,
- corrosión,
- presión interna excesiva, o bien,
- falla mecánica del material.

La característica del líquido involucrada en la generación de la onda de choque y la fragmentación es la energía interna, misma que está en función de las propiedades termodinámicas y de la masa. Dicha energía es transformada en energía mecánica en forma de onda de choque y en la generación de proyectiles producto de la fragmentación del contenedor.

Antes de la ruptura, en el interior del contenedor se encuentra una mezcla de líquido y vapor en equilibrio. En el momento de la ruptura la presión a la cual está sometido el líquido baja bruscamente lo que provoca que el valor de la temperatura de ebullición baje. El líquido que se encuentra ahora a una temperatura mayor que la de ebullición cambia inmediatamente de fase, hecho que provoca la generación de la onda de choque propiciada por la expansión del líquido. Una vez ocurrida la pérdida de equilibrio, en las paredes del contenedor se produce el cambio de fase, aunque también podrían ocurrir en el líquido, esto dependiendo de la temperatura.

Es posible que ocurra, dependiendo de la temperatura del líquido, una transformación inmediata a vapor de todo el volumen de líquido. Comienzan a aparecer burbujas microscópicas de vapor. Debido a este proceso una cantidad considerable del líquido se vaporiza en milisegundos. La evaporación instantánea se producirá siempre y cuando la temperatura del líquido sea más alta que la temperatura de nucleación homogénea o la temperatura de calentamiento máxima.

La energía liberada es muy alta en estos casos, ocasionando ondas de choque de gran magnitud y proyectiles lanzados con gran velocidad a gran distancia. Si en el momento de la ruptura la temperatura en el interior se encuentra por debajo del límite de calentamiento, la energía utilizada para la generación de la onda de choque y la fragmentación es debida a la expansión del vapor por encima del líquido. En este caso se presenta el 10% de la energía que se libera cuando la temperatura está por encima del límite de sobrecalentamiento.

Las condiciones de presión y temperatura del líquido en el momento de la ruptura dependen de la causa de falla, por ejemplo, en un incendio externo la flama debilitará las paredes del contenedor. La presión a la cual el contenedor falla estará muy cercana a la presión a la cual la válvula de alivio de sobrepresión opera, en promedio 20% por encima de la presión de accionamiento. La temperatura del contenido estará muy por encima de la del ambiente, por acción de la flama.

Si la ruptura del contenedor es debida a una presión interna excesiva, es muy probable que la presión que originó la ruptura sea más alta que la presión de

diseño, sin embargo, si la ruptura es debida al deterioro del material del contenedor, es muy posible que la presión que originó la ruptura sea más baja que la presión de diseño.

La energía interna en el momento de la explosión afecta el número, forma y trayectoria de los fragmentos provenientes de las paredes del contenedor. Las rupturas originadas por una explosión BLEVE provocan pocos fragmentos, sin embargo pueden variar en forma y en velocidades iniciales. Fragmentos grandes, por ejemplo la mitad del contenedor y en forma de disco, pueden ser lanzados a grandes distancias.

Si la explosión BLEVE es provocada por fuego y la sustancia en cuestión es inflamable, se puede provocar un incendio. La salida de material del contenedor provocará la formación de una nube de vapor. Después de la ignición, la nube formada se comienza a incendiar en su superficie en donde se presentan las condiciones adecuadas de inflamabilidad.

Los efectos de la radiación debidos a una bola de fuego dependen de:

- a) El diámetro máximo de la bola de fuego, el cual está en función del tiempo.
- b) La altura del centro de la bola de fuego.
- c) La superficie emisiva de la bola de fuego
- d) La duración de la combustión

Las consecuencias de la radiación estarán en función de la distancia de la bola de fuego al receptor y de las condiciones atmosféricas. Los efectos de la radiación son de mayor interés que los efectos de la onda de choque.

2.5.1. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDECIR LOS EFECTOS FÍSICOS DE UNA EXPLOSIÓN DE LÍQUIDO EN EBULLICIÓN EXPANDIÉNDOSE A VAPOR

Aunque las consecuencias de una explosión de tipo BLEVE pueden ser, radiación, generación de onda de choque y fragmentación, en este apartado dedicado al análisis de explosiones se expondrán los modelos referentes a la generación de ondas de choque y de fragmentación. Lo referente a la radiación por la ignición de la nube formada después de la explosión se expone en el capítulo de incendios.

2.5.1.1. ANÁLISIS DEL FENÓMENO

Una explosión de líquido en ebullición expandiéndose a vapor se define como la pérdida repentina de la contención en un líquido que se encuentra a una temperatura mayor que la máxima posible en condiciones atmosféricas. Una explosión del tipo BLEVE provoca un cambio de fase de líquido a vapor repentino y fuerte que origina una onda de choque. Puede provocar, adicionalmente, la fragmentación del contenedor y, si la sustancia involucrada es inflamable, puede presentarse un incendio, ya sea bola de fuego, incendio flash, incendio de nube de vapor y, en su caso, explosión de nube de vapor.

En el caso de que el contenedor sea afectado por fuego provocado por un siniestro externo, cierta cantidad de calor de la flama se conduce hacia el fluido en el interior, incrementándose la temperatura. Cuando se alcanza el punto de ebullición de la sustancia, se forman

algunas burbujas de vapor en zonas donde el líquido y algunos sólidos están en contacto (zonas activas), o bien en zonas de nucleación que son las que se presentan en las fronteras de las impurezas, cristales o iones. En el caso de que no existan zonas de nucleación, y el líquido tenga una temperatura por encima de su punto de ebullición, no se presentará evaporación y el líquido se sobrecalentará. En este texto el término sobrecalentar se refiere a la situación en la que un líquido, dadas las condiciones de contención, se mantiene en el estado de agregación líquido con una temperatura por encima del punto de ebullición. Una vez que el líquido se sobrecalienta y sigue aumentando su temperatura, se llegará a un límite.

A una presión dada, existe un límite de temperatura que no puede excederse, inclusive cuando el calor siga aumentando. Dada esa situación, súbitamente se forman burbujas de vapor, aún en ausencia de zonas de nucleación. Dicha acción eleva repentinamente la presión interna del contenedor provocando que el dispositivo de alivio de sobrepresión se active iniciando el desfogue de material. La acción de disminuir la presión interna del contenedor, conlleva el abatimiento del punto de ebullición por debajo de la temperatura del líquido, provocando un cambio súbito de fase del líquido sobrecalentado, dando origen a la explosión.

La temperatura máxima de sobrecalentamiento de una sustancia sometida a cierta presión, puede encontrarse en un diagrama Presión-Volumen.

Varios autores, tales como Reid, Opschoor o Van der Waals, establecen la temperatura de sobrecalentamiento de ciertas sustancias sometidas a la presión atmosférica en función de la temperatura crítica (temperatura por encima de la cual un gas no puede ser licuado únicamente por presión). Dichos autores coinciden en que la temperatura máxima de sobrecalentamiento es aproximadamente 90% de la temperatura crítica.

En la tabla 2.2 se muestran algunos ejemplos de temperaturas críticas de algunos combustibles comúnmente usados.

Tabla 2.2. Límites de algunas características de combustibles industriales

Combustible	Crítica		Límite de sobrecalentamiento		Temp Ebullición normal K
	Temp. (K)	Presión (bar)	Temp. (K)	Press. (bar)	
Propano	370	43.6	326	18.3	231
nButano	426	36.5	377	16.6	272
Isobutano	407	37.5	361	15.5	261
1,3-Butadieno	425	37.6	377	18.5	269
Vinil Clorado	429	—	374	—	260
Etano	305	49.0	269	21.7	184
n-Pentano	469	33.4	421	15.4	309
n-Hexano	507	29.9	457	13.7	342
Agua	647	218	553	64.1	373

La figura 2.11 es un ejemplo de un diagrama Presión-Temperatura, que muestra la curva de presión de vapor del propano. Cuando el líquido es calentado por ejemplo del punto A a B, una liberación repentina de la presión hasta diez atmósferas (punto C) provocará que el líquido esté en zona de sobrecalentamiento, sin sobrepasar el límite. En este caso no se provocará una onda de choque por la vaporización. Cuando el líquido es llevado a una temperatura mayor, por ejemplo al punto D y súbitamente existe un descenso en la presión hasta llegar a la atmosférica (punto E), se provocará que el sobrecalentamiento esté por encima del límite y que la liberación provoque la explosión

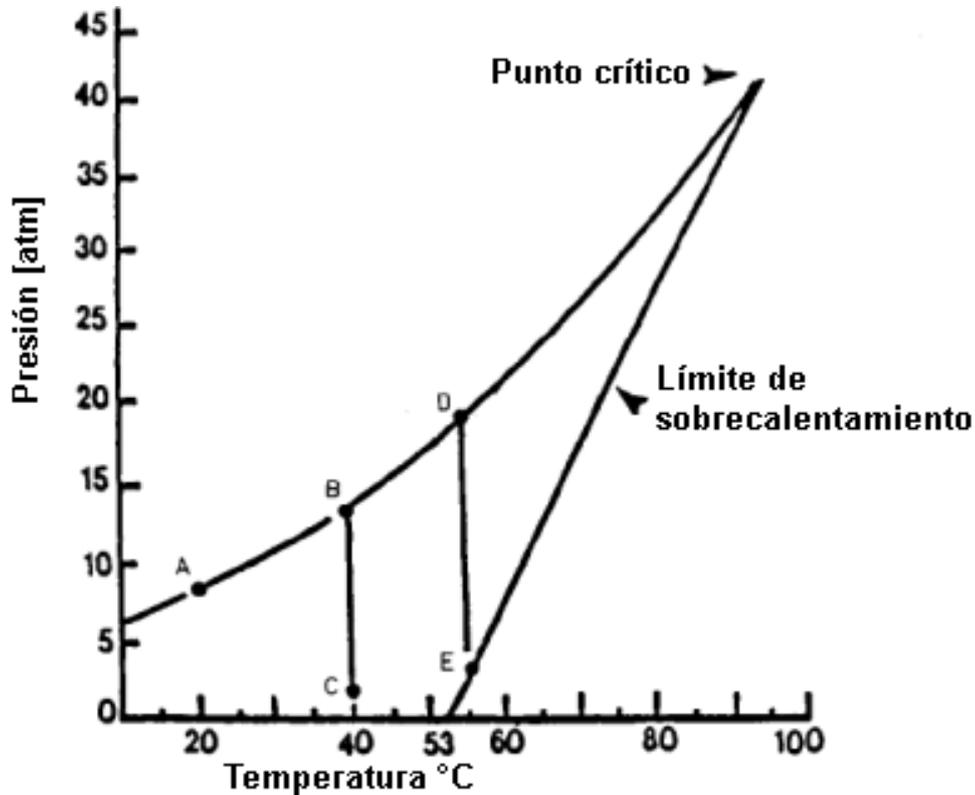


Fig. 2.11. Diagrama de Presión-Temperatura del Propano

2.5.1.2. MÉTODO DE BAKER

Baker desarrolló un método para predecir los efectos de una onda de sobrepresión provocada por la ruptura de un contenedor presurizado lleno de gas. La secuencia para el cálculo de los efectos físicos se muestra en el diagrama de flujo mostrado en la figura 2.12.

La decisión del método de cálculo de las consecuencias, depende del estado de agregación y punto de ebullición del contenido a la temperatura ambiente (T_b), la temperatura crítica (T_{si}), y la temperatura a la cual se encuentra el contenido (T). Con el propósito de elegir el método de cálculo, pueden considerarse tres distintas fases (líquido, vapor o gas no ideal y gas ideal). La temperatura determina si el líquido se evaporará en el momento de la despresurización.

El líquido no se evaporará si su temperatura está por debajo de la temperatura de ebullición a la presión local. Si la temperatura del líquido está por encima de la temperatura límite de sobrecalentamiento T_{si} ($T_{si} = 0.89 T_c$), este se evaporará explosivamente. Si el líquido está entre estas dos temperaturas, en el caso de una despresurización, sí ocurrirá una evaporación violenta pero no de forma rápida provocando ondas de choque no significativas.

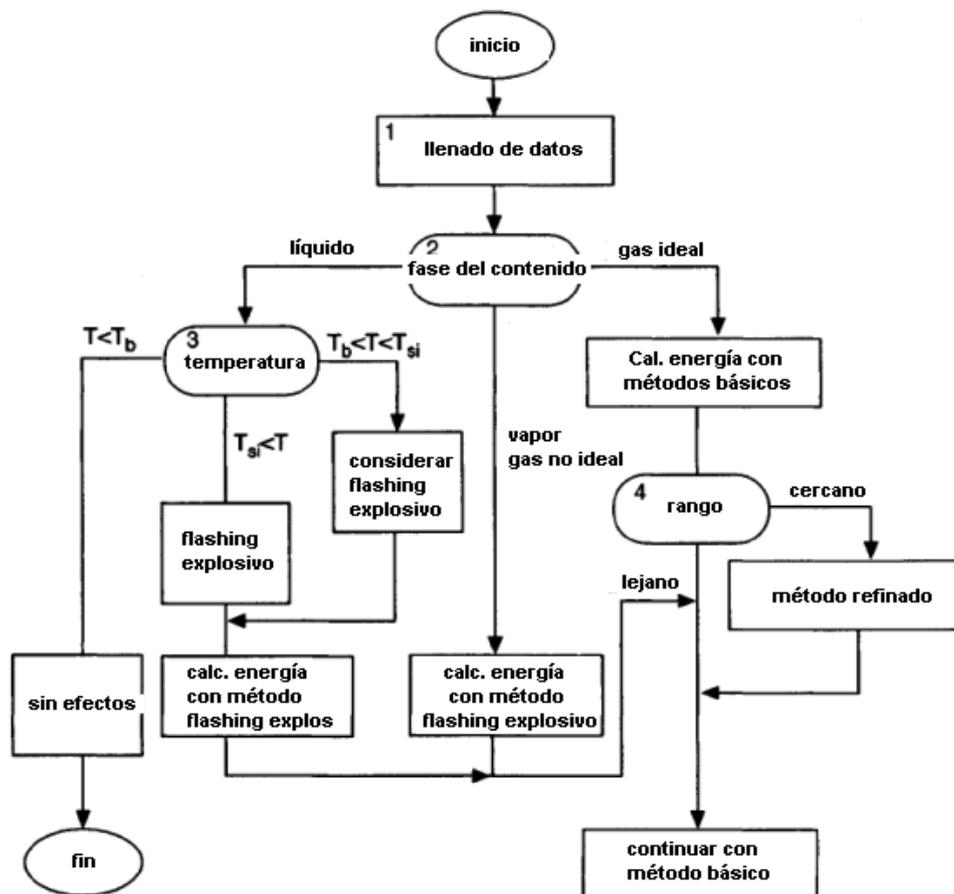


Fig. 2.12. Diagrama de flujo para la elección del método para el cálculo de efectos físicos

donde:

- T Temperatura del contenido
- T_b Temperatura de ebullición del contenido
- T_{si} Temperatura límite de sobrecalentamiento

Cuando las temperaturas y presiones generadas por una explosión del tipo BLEVE son altas, entonces las ondas generadas en la lejanía son similares a las generadas en la detonación de explosivos, dicha coincidencia es la base

para el método que se detalla a continuación. Este método considera inicialmente el cálculo de la energía almacenada del gas presurizado, después el impulso y la sobrepresión son leídos de gráficas las cuales fueron hechas con parámetros de onda de choque de detonaciones de explosivos que tienen la misma energía.

El procedimiento general para el método básico es mostrado en la figura 2.13, el cual es adecuado para el cálculo de efectos físicos provocados por el rompimiento de contenedores llenos de un gas ideal colocado sobre una superficie plana y alejado de ciertos obstáculos que generarían obstrucción.

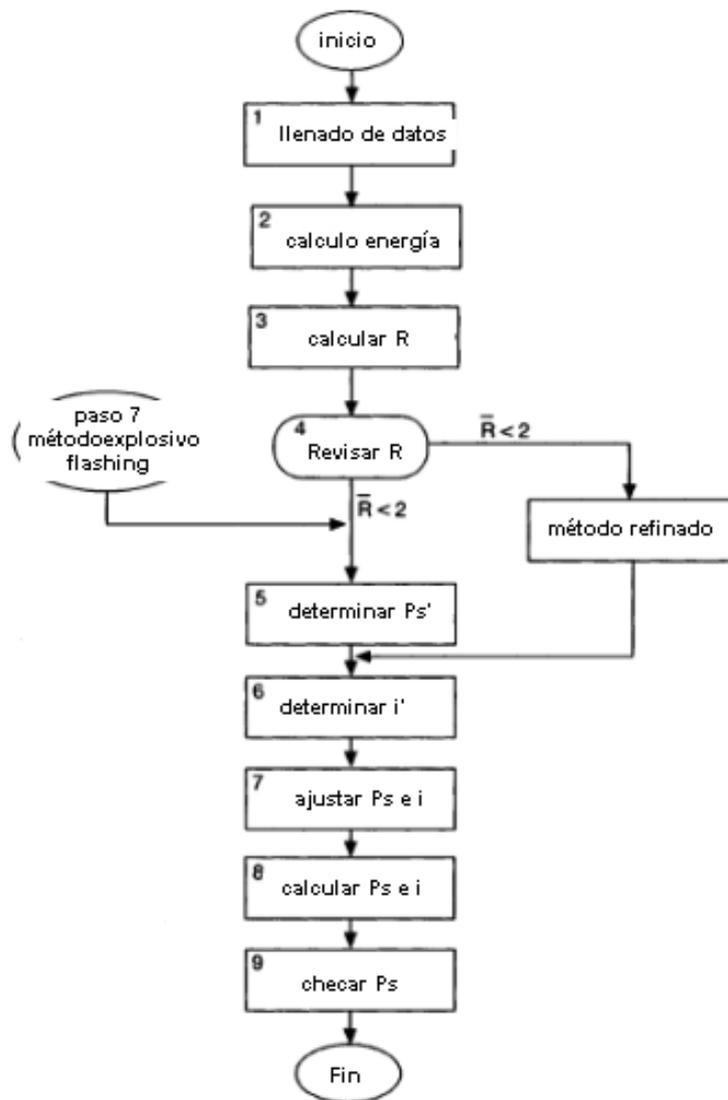


Fig. 2.13. Diagrama de flujo del método básico

Descripción del método

1. Obtener datos

Para la aplicación del método es necesario reunir la siguiente información:

-Presión absoluta interna del contenedor	p
-Presión atmosférica local	P_0
-Volumen dentro del contenedor lleno de gas	V_1
-La proporción de calores específicos del gas	γ_1
-Distancia entre el centro del contenedor al objetivo	r
-Forma del contenedor, esférica o cilíndrica	

2. Cálculo de la energía del gas comprimido

La energía de un gas comprimido puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$E_{ex} = \frac{(P_1 - P_0) * 2V_1}{\gamma - 1} \quad 2.6$$

donde:

E_{ex}	Energía del gas comprimido	[J]
P_1	Presión absoluta del gas	[N/m ²]
P_0	Presión atmosférica absoluta	[N/m ²]
V_1	Volumen del espacio lleno de gas	[m ³]
γ_1	Proporción de calores específicos del gas en el sistema	

3. Calcular la distancia al receptor

Se calcula con la expresión 2.7.

$$R = r \left[\frac{P_0}{E_{ex}} \right]^{1/3} \quad 2.7$$

Donde r es la distancia en metros en donde se ubica el receptor o el punto de la onda de choque de interés.

4. Cotejar la distancia

Para una distancia al receptor calculada menor a 2 (sin unidades), el método básico determina una sobrepresión muy alta, en tal caso, es necesario utilizar el método refinado, con el fin de obtener una estimación de la sobrepresión más precisa.

5. Determinar la sobrepresión

Con el fin de determinar el valor de la sobrepresión P_s , es necesario recurrir al diagrama que muestra la figura 2.14, o bien de la figura 2.15, según sea la distancia apropiada. Se recomienda usar la curva jerarquizada como “high explosive” si la figura 2.13 es la que se usa.

6. Determinar el impulso

Para obtener el valor adimensional del impulso I , se lee del gráfico mostrado en la figura 2.16, dependiendo del valor de R para el cual es necesario usar la curva caracterizada como “vessel burst” (ruptura de contenedor). Para valores de R en el rango entre 0.1 y 1.0, la curva mostrada en la figura 2.17 es más conveniente.

7. Ajustar la sobrepresión y el impulso para los efectos geométricos

Los pasos precedentes producen parámetros de la onda de choque que son aplicados para ondas completamente simétricas, tal como las que podrían resultar de la explosión proveniente de un contenedor de forma esférica colocado en el piso. En la práctica los contenedores son de forma cilíndrica y esférica y se encuentran colocados a cierta distancia del piso. La forma y la distancia al piso influyen en los parámetros de la onda de choque. Para ajustar de forma correcta los efectos geométricos, la sobrepresión y el impulso deben ser multiplicados por valores de ajuste producto de la experimentación con cargas explosivas de varias formas.

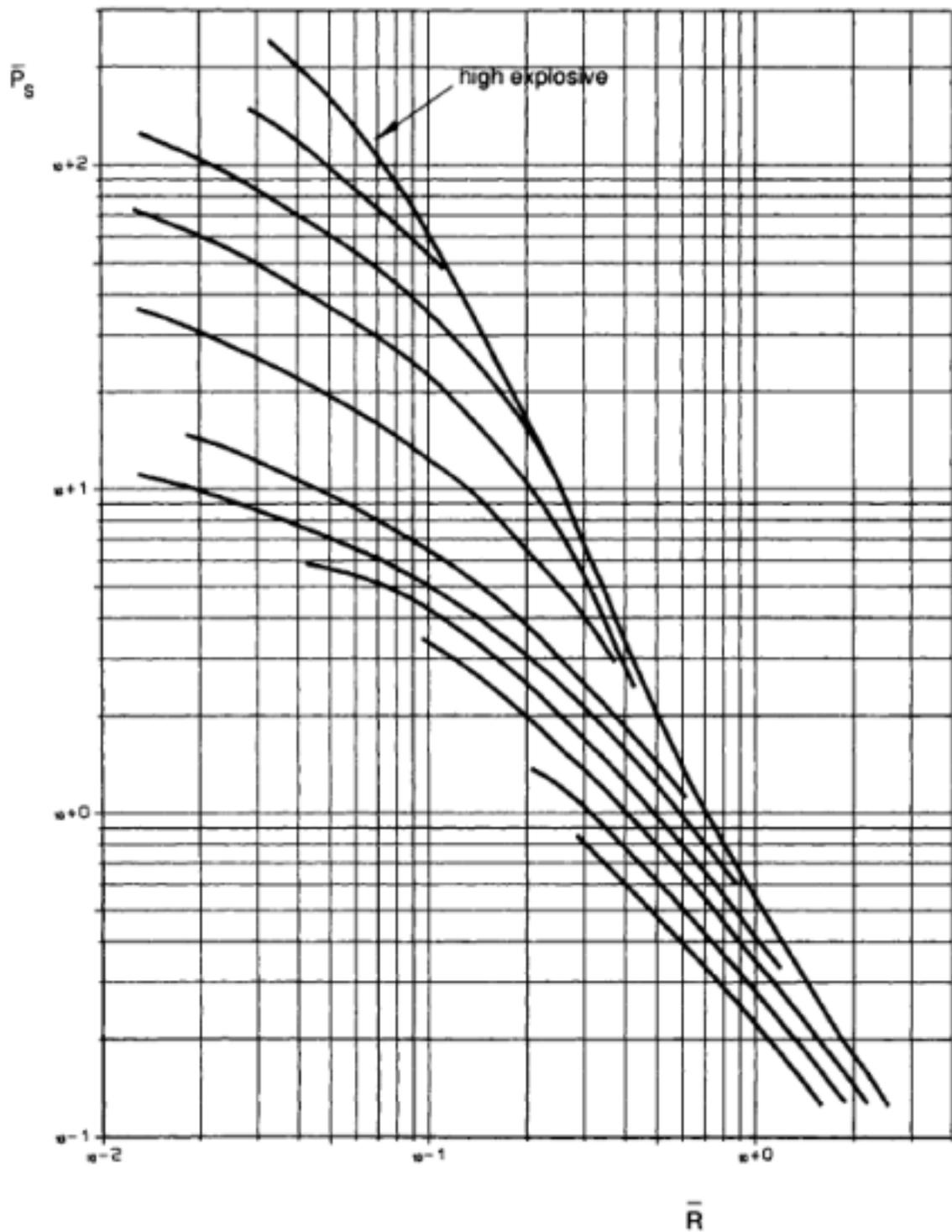


Fig. 2.14. Sobrepresión adimensional contra distancia adimensional para el cálculo de sobrepresiones

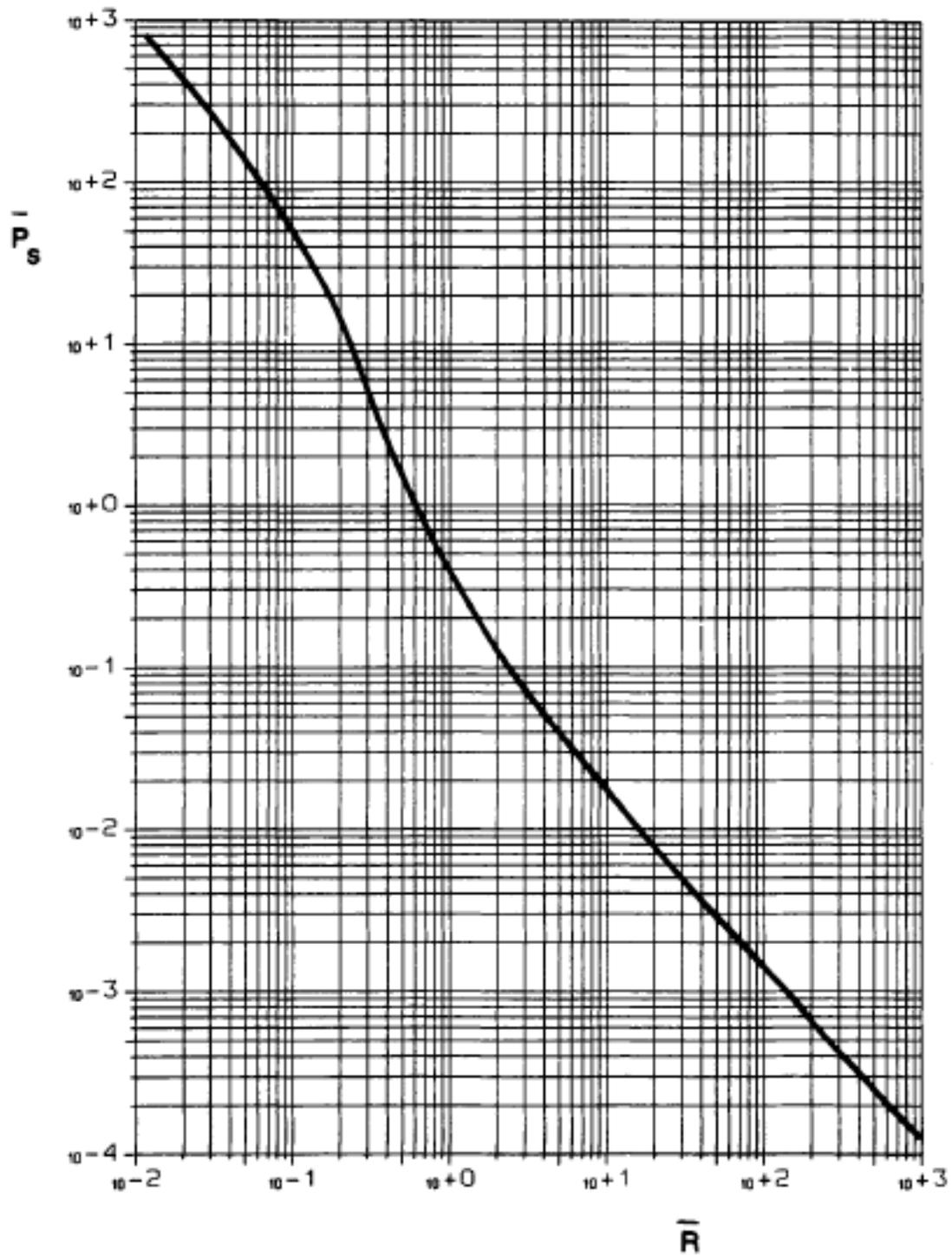


Fig. 2.15. Sobrepresión adimensional contra distancia adimensional para el cálculo de sobrepresiones

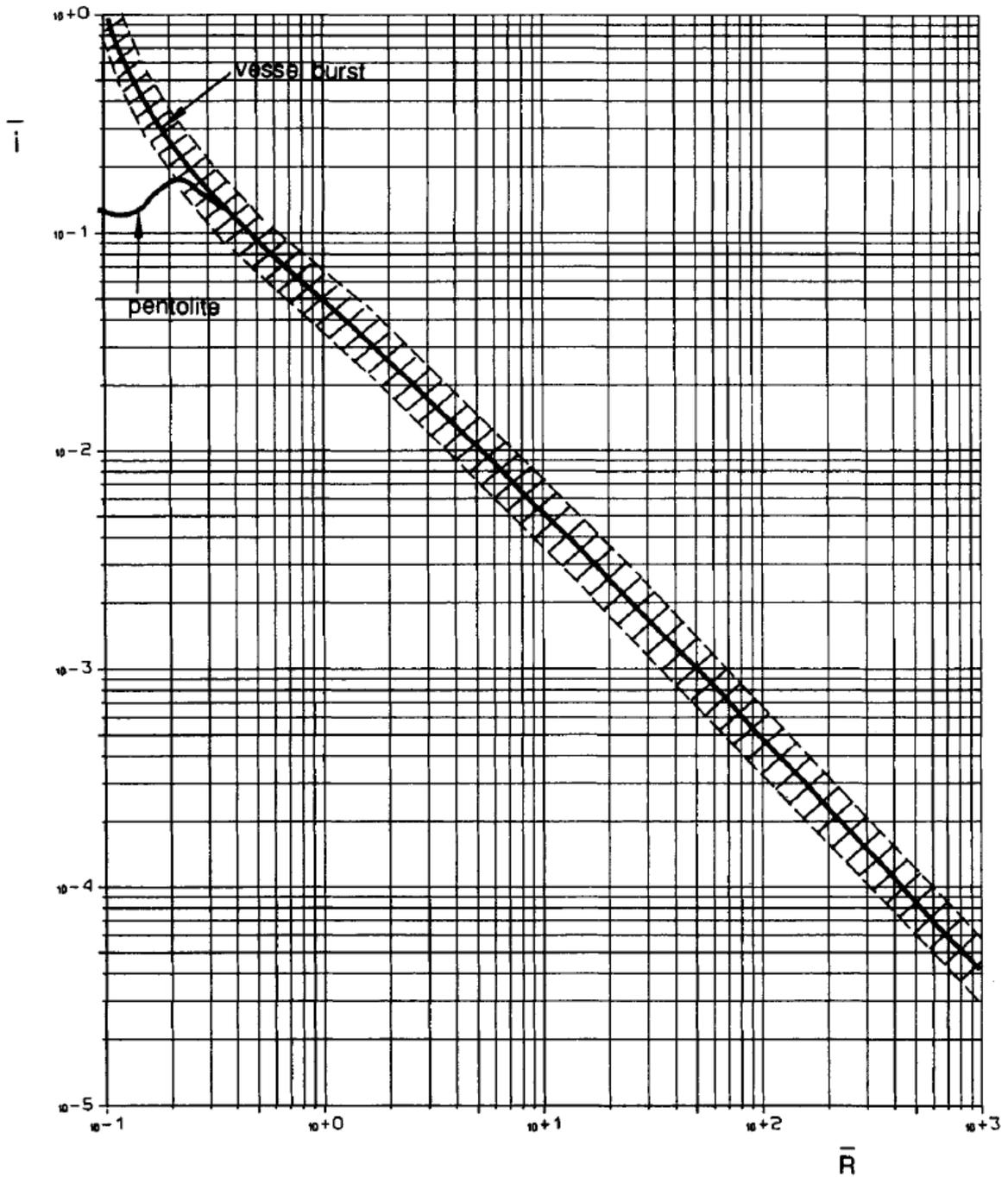


Fig. 2.16. Impulso contra distancia adimensional

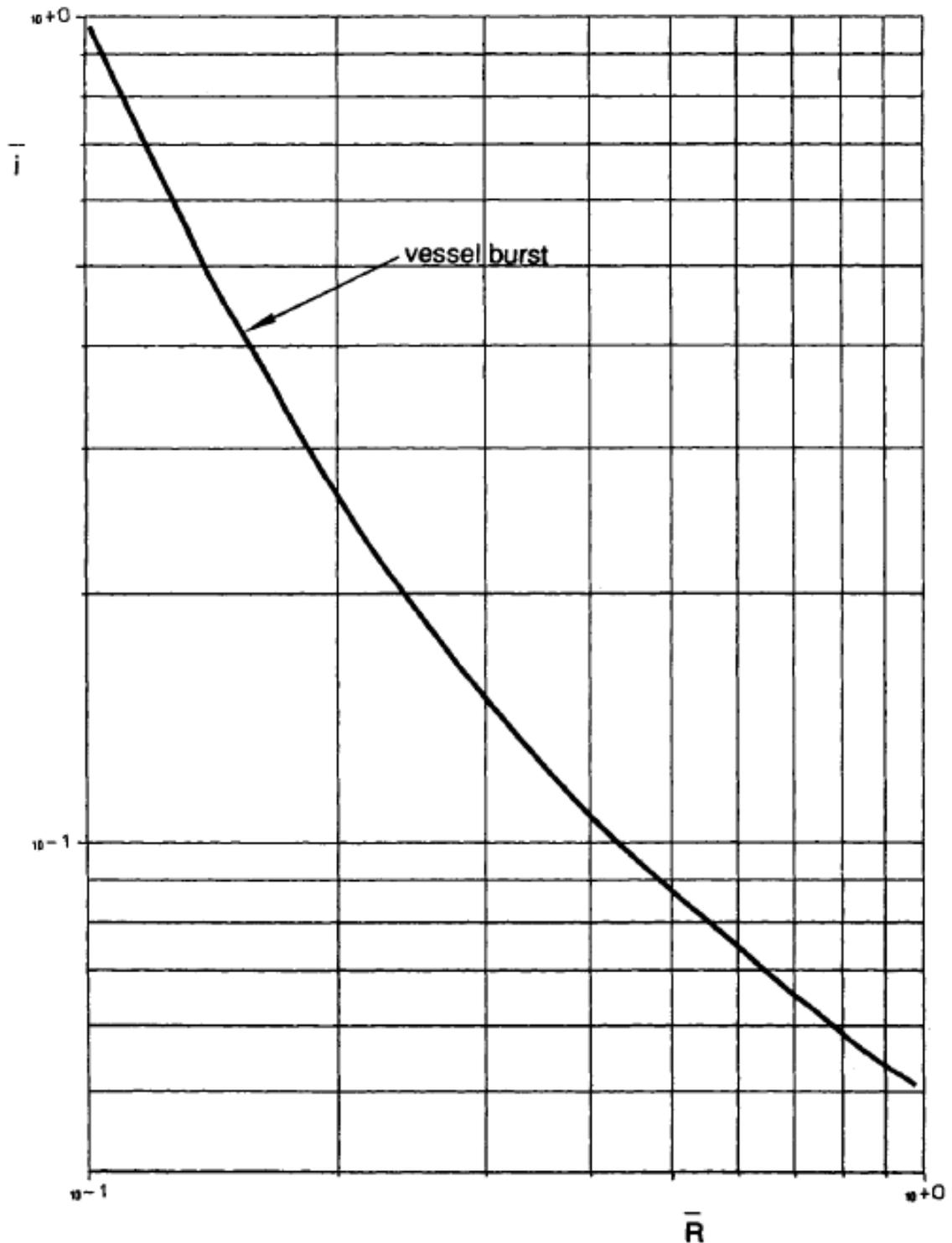


Fig. 2.17. Impulso contra distancia adimensional

Las tablas 2.3 y 2.4 muestran los factores de ajuste para contenedores cilíndricos para varios valores de R y para esferas colocadas a alturas bajas con respecto al piso, respectivamente.

Tabla 2.3. Factores de ajuste para formas cilíndricas de varios radios

\bar{R}	Multiplicar por	
	\bar{P}_s	\bar{i}
<0.3	4	2
$\geq 0.3 \leq 1.6$	1.6	1.1
$> 1.6 \leq 3.5$	1.6	1
>3.5	1.4	1

Tabla 2.4. Factores de ajuste para formas esféricas de varios radios, elevados ligeramente del suelo

\bar{R}	Multiplicar por	
	\bar{P}_s	\bar{i}
<1	2	1.6
>1	1.1	1

La onda de choque provocada por un contenedor cilíndrico es más débil a lo largo de su eje longitudinal. Así, la onda será asimétrica para contenedores colocados horizontalmente.

8. Cálculo del pico de sobrepresión y el impulso

Para determinar el impulso real y la sobrepresión, es necesario el uso de las ecuaciones 2.8 y 2.9 las cuales utilizan la sobrepresión y el impulso adimensionales obtenidos en pasos anteriores.

$$P_s - P_0 = {}^{\circ}P_s P_0 \quad 2.8$$

$$\dot{i}_s = \frac{IP_0^{2/3} E_{ex}^{1/3}}{a_0} \quad 2.9$$

Donde a_0 es la velocidad del sonido local en m/s

9. Cotejar el pico de sobrepresión

Este método tiene certeza limitada, especialmente en receptores cercanos al contenedor. Bajo ciertas circunstancias, la presión calculada P_s puede resultar más alta que la presión inicial en el contenedor, lo cual es físicamente imposible, si eso ocurre, se recomienda considerar a ésta como el pico de sobrepresión en lugar de la calculada.

2.6 MODELOS DE FRAGMENTACIÓN DEBIDA A UNA EXPLOSIÓN DE LÍQUIDO EN EBULLICIÓN EXPANDIÉNDOSE A VAPOR

Una explosión BLEVE puede producir fragmentos del contenedor y arrojarlos a cierta distancia de la fuente. Tales fragmentos, producto de las paredes del contenedor, al ser arrojados pueden ser peligrosos para las personas y bienes materiales. Los efectos físicos negativos están en función de la forma, velocidad, trayectoria y número de los fragmentos generados. Cuando sucede una explosión producto de materiales explosivos, se producen fragmentos de forma gruesa, en cambio cuando la fragmentación es debida a una BLEVE, son pocos los fragmentos producidos y las formas, tamaños y velocidades iniciales son variadas.

Los fragmentos producidos por una BLEVE pueden viajar grandes distancias, ya que pedazos grandes, mitades de contenedor, o bien fragmentos en forma de disco pueden girar y desplazarse en el aire.

2.6.1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD INICIAL DE LOS FRAGMENTOS PARA CONTENEDORES LLENOS DE GAS IDEAL

Cálculo basado en la energía cinética total.

El límite máximo de la velocidad inicial de un fragmento producto de una explosión debida a una BLEVE puede calcularse si se hace la consideración de

2011

que la energía cinética total en el interior de un contenedor es trasladada a energía cinética de los fragmentos de contenedor. La velocidad se obtiene de la ecuación 2.10.

$$v_i = \left[\frac{2E_k}{M} \right]^{1/2} \quad 2.10$$

donde:

v_i	Velocidad inicial máxima de los fragmentos	[m/s]
E_k	Energía cinética	[J]
M	Masa total del contenedor vacío	[kg]

La energía cinética (E_k) se calcula de la energía interna (E) la cual se calcula con la ecuación 2.11.

$$E = \frac{(p_1 - p_0)V}{\gamma - 1} \quad 2.11$$

donde:

P_1	Presión absoluta del contenedor en el momento de la falla	[Pa]
P_0	Presión atmosférica absoluta local en el exterior del contenedor	[Pa]
V	Volumen interno del contenedor	[m³]
γ	Relación de calores específicos	[1]

En realidad es poco probable que pueda conocerse la presión última en el momento de la explosión, sin embargo, es posible estimarla, con base en el origen de la ruptura, la presión última. Si la falla es provocada por un incremento en la presión en combinación con un funcionamiento incorrecto de la válvula de alivio de sobrepresión, la presión última será igual a la presión de falla (presión de diseño) del contenedor; si la falla es debida a una exposición a calor externo, la presión última alcanzará un valor de 1.21 veces la presión que causa la activación de la válvula de alivio de sobrepresión. Dicho valor es llamado presión acumulada; en el caso de que la falla sea debida a corrosión o

un impacto, entonces se puede estimar que la presión última será la presión de trabajo.

La aplicación de las ecuaciones 2.10 y 2.11 producen estimaciones de velocidades iniciales muy conservadoras, por tal motivo, se han desarrollado modelos refinados que precisan el cálculo de la energía interna (E).

Cuando ocurre una ruptura repentina de un contenedor lleno de un gas ideal, la expansión del gas ocurre tan rápidamente que el intercambio de calor con el medio es despreciable. Considerando una expansión adiabática, la fracción disponible de energía trasladable como energía cinética de los fragmentos, se puede calcular con la ecuación 2.12.

$$E = \frac{kp_1V}{(\gamma-1)} \quad 2.12$$

donde:

$$k = 1 - \left[\frac{p_0}{p_1}\right]^{(\gamma-1/\gamma)} + (\gamma - 1) \frac{p_0}{p_1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{-1/\gamma}\right] \quad 2.13$$

Tales mejoras a los modelos disminuyen el valor de la velocidad calculada aproximadamente 45%.

2.6.1.1. CÁLCULO BASADO EN CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Baker comparó los modelos matemáticos para predecir las velocidades de los fragmentos con una gran cantidad de piezas y de datos experimentales. Resultado de ese estudio es el diagrama que se muestra en la figura 2.18, el cual puede ser utilizado para calcular la velocidad inicial de fragmentos de contenedores presurizados con un gas ideal. Para su uso correcto es necesario conocer otras variables, tales como:

2011

a₀	Velocidad del sonido en el gas en el momento de la ruptura	[m/s]
M	Masa de contenedor	[kg]
K	Factor de desigualdad entre fragmentos	[1]
p*	Presión escalada	[1]

donde:

$$p^* = \frac{(p_1 - p_0)}{(Ma_0^2)} \quad 2.13$$

La velocidad del sonido (a_0) en el gas dentro del contenedor puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$a_0^2 = \frac{T\gamma R}{m} \quad 2.14$$

donde:

T	Temperatura en el momento de la falla del contenedor	[K]
γ	Relación de calores específicos	[1]
R	Constante de los gases ideales	[J/K mol]
m	Masa molecular del gas	[kg/mol]

Para el uso de la figura 2.18 para fragmentos iguales, el valor de K es 1. Para el caso de un cilindro que se fragmenta en dos partes diferentes perpendiculares al eje longitudinal del tanque, es necesario calcular el valor de K. El factor K se determina para un fragmento con masa M_f con la ayuda del gráfico de la figura 2.18. Las líneas punteadas limitan la zona de dispersión de la experimentación para obtener el modelo.

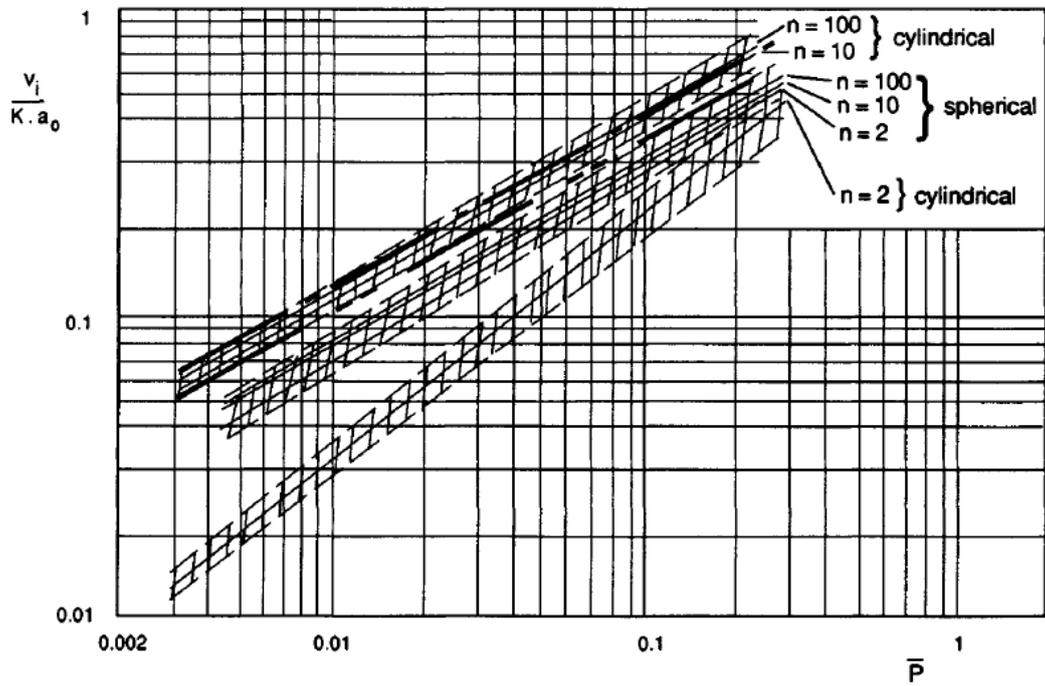


Fig. 2.18. Velocidad de los fragmentos en función de la presión y la forma del contenedor

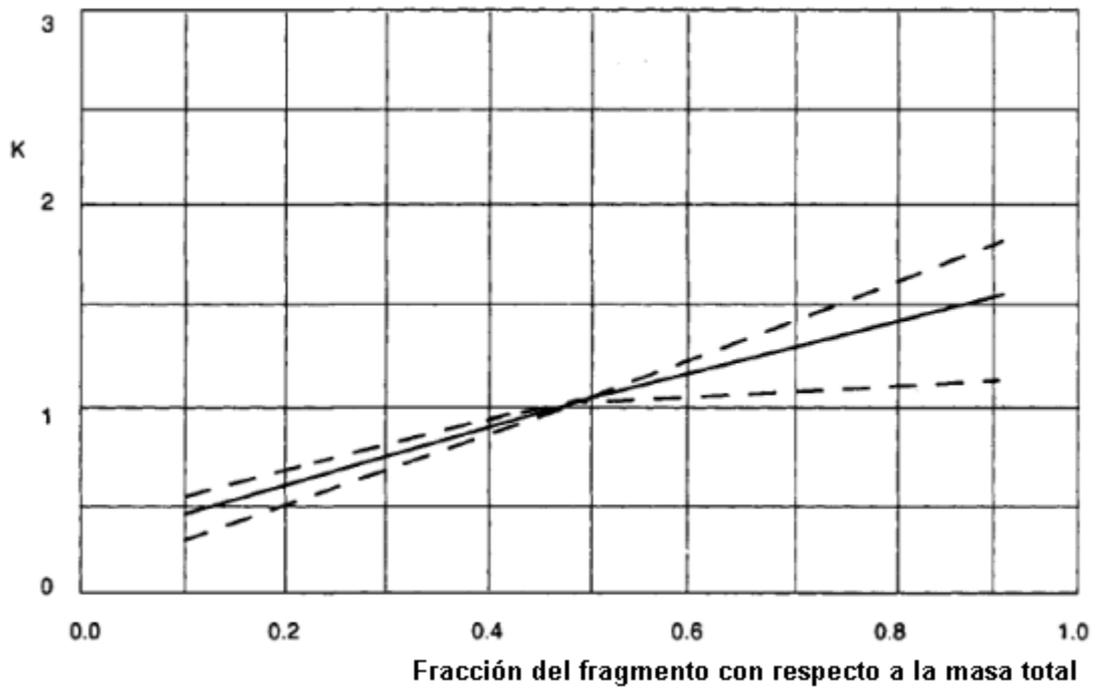


Fig. 2.19 Factor de ajuste para fragmentos no iguales

Se observa que para valores altos de proporción de la masa fraccionada, es decir, para fragmentos grandes, se obtienen valores altos de K. Valores altos de dicha variable se traducen en altas velocidades. Entre más grande es el fragmento mayor será su velocidad inicial.

2.6.1.2. CÁLCULO BASADO EN RELACIONES EMPÍRICAS

Modelo de Moore

Moore desarrolló una relación empírica de la velocidad inicial de fragmentos provenientes de un contenedor producto de una explosión (ecuación 2.15)

$$v_i = 1.092 \left[\frac{EG}{M} \right]^{0.5} \quad 2.15$$

En donde para contenedores esféricos la variable G se obtiene de la ecuación 2.16.

$$G = \frac{1}{1 + \frac{3C}{5M}} \quad 2.16$$

Si el contenedor es cilíndrico se emplea la ecuación 2.17.

$$G = \frac{1}{1 + \frac{C}{2M}} \quad 2.17$$

2011

donde:

C	Masa total del gas dentro del contenedor	[kg]
E	Energía	[J]
M	Masa del contenedor vacío	[kg]

Dicha relación se obtuvo de experimentación sobre fragmentos acelerados por explosivos colocados dentro del contenedor. La ecuación 2.15 predice velocidades de forma conservadora, particularmente para presiones bajas y pocos fragmentos generados, sin embargo, el modelo es confiable ya que predice velocidades similares a las que produce el modelo teórico.

Modelo de Baum

Baum desarrolló otro modelo empírico que predice la velocidad inicial de los fragmentos generados por la explosión de un gas ideal. Dicho modelo involucra la variable F, la cual se obtiene de la relación 2.18.

Para una gran cantidad de fragmentos generados:

$$F = \frac{(p_1 - p_0)r}{m a_0^2} \quad 2.18$$

Donde “m” es la masa por unidad de área de las paredes del contenedor y “r” es el radio del contenedor. Por otra parte, si la cantidad de fragmentos generados es pequeña, entonces la variable F se obtiene con la expresión 2.19.

$$F = \frac{(p_1 - p_0)Ar}{M_f a_0^2} \quad 2.19$$

donde:

A	Área de la porción desprendida	[m²]
M	Masa del fragmento	[kg]
R	Radio del fragmento	[m]

Finalmente, el valor de la velocidad inicial se calcula con la expresión 2.20 y 2.21, dadas las condiciones adecuadas.

Para el rompimiento de las tapas esféricas laterales de un contenedor cilíndrico:

$$v_i = 2a_0 F^{0.5} \quad 2.20$$

Para el rompimiento de un contenedor cilíndrico que se divide en dos partes iguales separadas por un plano que es perpendicular a su eje longitudinal:

$$v_i = 2.18a_0 \left[F \left(\frac{L}{R} \right)^{1/2} \right]^{2/3} \quad 2.21$$

Para este caso el valor de F se obtiene tomando como área, la total, es decir, la que se obtiene de multiplicar π por el radio de contenedor al cuadrado. L es el valor de la longitud del contenedor.

Para el rompimiento de un contenedor cilíndrico que produce pequeños fragmentos:

$$v_i = 2a_0 \left[\frac{FS}{r} \right]^{0.38} \quad 2.22$$

La ecuación 2.22 es aplicable siempre y cuando se cumpla con las siguientes condiciones:

$$20 < P_v/P_0 < 300 \quad ; \quad \gamma = 1.4 \quad ; \quad s < 1.3r$$

Finalmente, para una desintegración de los contenedores, tanto cilíndricos como esféricos se utiliza la ecuación 2.23.

$$v_i = 0.88 a_0 F^{0.55} \quad 2.23$$

2.6.2. CÁLCULO DE LA DISTANCIA DE LOS PROYECTILES

Una vez que ocurre la fragmentación, producto de una explosión, los fragmentos viajan a través de la atmósfera actuando en ellos fuerzas debidas a la gravedad, tales como el peso y las surgidas por el movimiento a través del aire como las fuerzas de sustentación y de fricción.

Si las fuerzas debidas al roce con el fluido envolvente son despreciadas, entonces las distancias máximas en el sentido vertical y la máxima en la trayectoria horizontal pueden determinarse por medio de un análisis de tipo tiro parabólico. Las ecuaciones que calculan las distancias máximas en el sentido vertical y horizontal son la 2.24 y 2.25.

$$H = \frac{v_i^2 \text{sen}(\alpha)^2}{2g} \quad 2.24$$

$$R = \frac{v_i^2 \text{sen}(2\alpha)}{g} \quad 2.25$$

donde:

α	Ángulo inicial entre la trayectoria y la superficie del terreno	[°]
H	Altura máxima alcanzada por los fragmentos	[m]
R	Distancia máxima alcanzada por los fragmentos	[m]
g	Valor de la aceleración de la gravedad local	[m/s ²]

El valor máximo del seno de un ángulo doble se alcanza cuando el ángulo tiene un valor de 45°, por ello el valor máximo de la distancia se presentará cuando la trayectoria presente dicha inclinación con respecto al terreno. En tal caso, la expresión del radio máximo es la 2.26.

$$R = \frac{v_i^2}{g} \quad 2.26$$

Si las fuerzas de sustentación y fricción son consideradas para tener una predicción más exacta de las distancias, es necesario introducir algunas variables a la ecuación diferencial. Baker trazó la solución de la ecuación diferencial y creó la gráfica que se muestra en la figura 2.20. Es notable que las variables de dicha gráfica son: la velocidad inicial escalada y la distancia horizontal escalada, mismas que se obtienen de las expresiones 2.27 y 2.28.

$$R' = \frac{\rho_0 C_D A_D R}{M_f} \quad 2.27$$

$$v_i'^2 = \frac{\rho_0 C_D A_D v_i^2}{M_f g} \quad 2.28$$

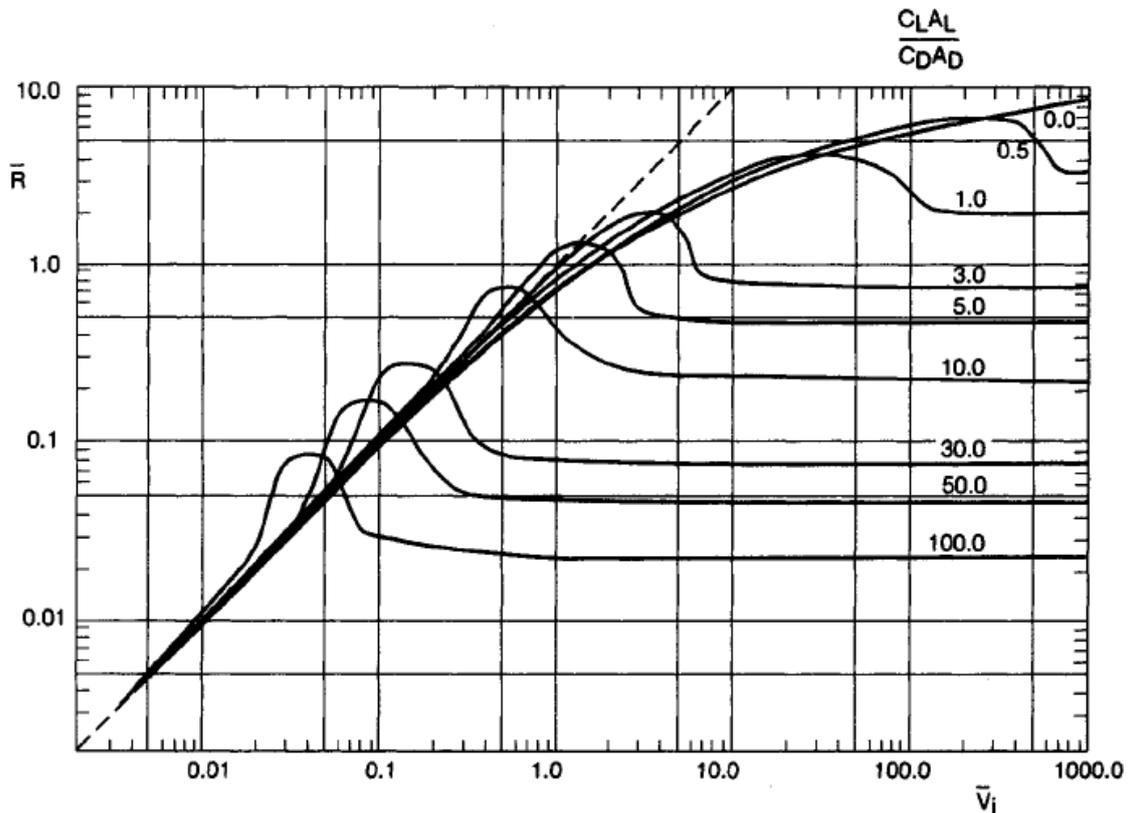
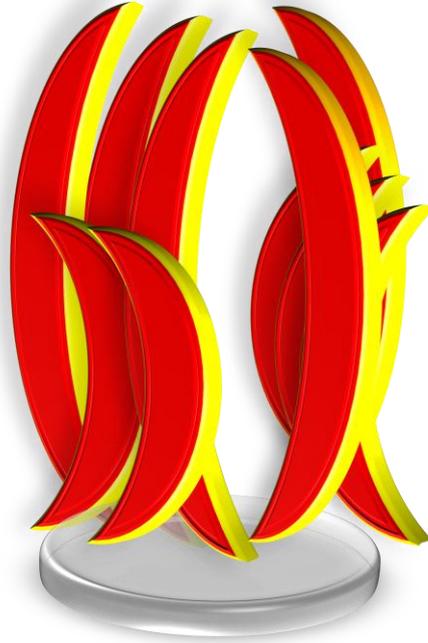


Fig. 2.20. Velocidad inicial escalada en función de la distancia escalada

donde:

R'	Componente horizontal de la trayectoria escalado	[m]
v_i'	Velocidad inicial escalada	[m/s]
ρ_0	Densidad de la atmosfera local	[kg/m ³]
C_D	Coefficiente de arrastre	[1]
A_D	Área expuesta perpendicular a la trayectoria	[m ²]
M_f	Masa del fragmento	[kg]
C_L	Coefficiente de sustentación	[1]
A_L	Área del fragmento paralela a la trayectoria	[m ²]

Una vez determinado el rango escalado es posible determinar el valor real del rango, que es la distancia a la cual llegará el fragmento en cuestión.



3 INCENDIOS

Un incendio es el efecto físico que resulta de la liberación de una sustancia inflamable que encuentra un punto de ignición. La determinación de los efectos físicos es evidente, no solo en el sentido de identificar las zonas involucradas, sino también en determinar la afectación que los elementos cercanos puedan tener.

Se debe de considerar que los incendios son los efectos físicos con menor radio de afectación con respecto al que ocurre en la dispersión de nubes, o los efectos de una explosión; sin embargo, su riesgo es mayor debido a que la probabilidad de ocurrencia es alta.

3.1. VARIABLES DE INTERÉS

Una de las variables de interés en el análisis de los efectos físicos provocados por un incendio es su geometría. La forma del incendio está estrechamente relacionada con el tipo de liberación (instantánea o continua), el tipo de ruptura del contenedor y las condiciones de presión y temperatura en el momento de la liberación. La geometría determina la cantidad de radiación incidente a la que estará expuesto un receptor ubicado en la vecindad del emisor. También son importantes otras variables involucradas con el desarrollo de la flama generada, tales como su temperatura, tamaño y dinámica. Este último término se refiere al posible cambio de posición y/o de orientación debido a la acción del viento. Es necesario fijar la posición del receptor e identificar la superficie vulnerable y su posición con respecto a la orientación de la flama.

La radiación térmica interceptada por un objeto cercano, es determinada por tres factores fundamentales; el primero es el poder emisor de la flama, el cual representa la cantidad total de energía que es radiada en forma de calor; esta variable es afectada por la atenuación provocada por la absorción de que efectúan los gases de la atmósfera, tal como el agua y el bióxido de carbono; y por último un factor de vista, el cual está determinado por la posición y orientación respectiva, tanto del emisor como del receptor.

3.2. MÉTODOS GENERALES PARA DETERMINAR LA RADIACIÓN TÉRMICA

La radiación térmica en un incendio es radiación electromagnética que abarca longitudes de onda que oscilan entre los 2 y 16 micrómetros (infrarrojo). Es el resultado de la radiación de sustancias tales como el H₂O, CO₂ y hollín, absorción de dichas sustancias y dispersión. En este apartado se presentan de forma general dos modelos matemáticos que describen los efectos físicos provocados por la radiación a cierta distancia de la fuente.

3.2.1. MODELO DE PUNTO FUENTE

Este modelo predice la cantidad de radiación por unidad de área y por unidad de tiempo que recibe un receptor localizado a cierta distancia de la fuente. Para poder utilizar este modelo es necesario conocer algunas características de la fuente y del medio.

Este modelo considera que cierta cantidad del calor generado por la combustión se libera en forma de radiación en todas las direcciones. La tasa de combustión depende directamente de la tasa de liberación. El receptor recibe la radiación máxima en la dirección de la fuente.

$$q = \frac{f\dot{m}H_c\tau_a}{4\pi x^2} \quad 3.1$$

donde:

q	Radiación por unidad de área por unidad de tiempo	[kcal/m²*s]
f	Cantidad de energía de combustión emitida como radiación	[-]
H_c	Calor de combustión por unidad de masa	[J/kg]
τ_a	Coeficiente de atenuación debido a las condiciones atmosféricas	[-]
\dot{m}	Velocidad de combustión en la fuente	[kg/s]
X	Distancia del receptor a la fuente	[m]

Velocidad de combustión

Para un incendio de charco de una sustancia que posee una temperatura de ebullición por encima de la temperatura ambiente, la velocidad de combustión puede estimarse con la relación empírica 3.2.

$$\dot{m} = \frac{0.0010H_cA}{H_v + C_v(T_b - T_a)} \quad 3.2$$

donde:

\dot{m}	Velocidad de combustión	[kg/s]
T_a	Temperatura ambiente	[K]
T_b	Temperatura de ebullición de la sustancia inflamable	[K]
H_v	Calor de vaporización	[J/kg]
A	Área del charco	[m ²]
C_v	Calor específico de la sustancia inflamable	[J/kg/K]
H_c	Calor de combustión por unidad de masa	[J/kg]

Un parámetro desconocido en este modelo es la fracción de la energía de combustión que es liberada como energía de radiación (f), dado que dicho parámetro será particular para el tipo de sustancia liberada y para la longitud de flama, algunos investigadores han determinado que en general dicho valor estará ubicado en el rango de 0.1 a 0.4. En el caso de un análisis de riesgo lo recomendable será tomar valores altos (cercanos a 0.4) con el fin de que, de forma conservadora, se sobrestime el valor de la radiación térmica.

3.2.2. MODELO DE LA FLAMA SÓLIDA

El objetivo que persigue este modelo, es predecir la cantidad de energía de emisión por unidad de área y por unidad de tiempo que se irradia por una sustancia en combustión. Es más exacto que el modelo de punto fuente, en parte porque involucra una cantidad mayor de variables.

Este modelo considera que la energía de radiación es emitida por la superficie de una figura geométrica bien definida que representa a la flama en cuestión.

Para asegurar que el volumen de la flama no se considere de forma incompleta, tanto la geometría de la flama como las posiciones del receptor y de la fuente deben de ser tomadas en cuenta en el desarrollo del modelo matemático.

La radiación incidente por unidad de área y de tiempo está dada por la expresión 3.3.

$$q = FE\tau_a \quad 3.3$$

donde:

q	Radiación	[W/m ²]
F	Factor de vista	[-]
E	Poder emisivo del fuego por unidad de superficie	[W/m ²]
τ _a	Coefficiente de atenuación debida a las condiciones atmosféricas	[-]

Poder emisivo

El poder emisivo (E) es el poder total de radiación que abandona el fuego por unidad de área y por unidad de tiempo. Para calcular el poder emisivo se hace uso de la Ley de Stefan, la cual establece el valor de la radiación que emite un cuerpo negro en función de su temperatura.

Dado que una flama no es cuerpo negro perfecto, la radiación real será una fracción (ε) de la radiación total del cuerpo negro.

El poder emisivo puede calcularse con la ecuación 3.4.

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad 3.4$$

donde:

E	Poder emisivo	[W/m ²]
ε	Emisividad	[-]
σ	Constante Stefan-Boltzmann = 5.67 x 10 ⁻⁸	[W/m ² /K ⁴]
T	Temperatura del fuego	[K]

a) Emisividad

La emisividad es la porción de la radiación de un cuerpo negro por medio de flamas. La emisividad se determina, en primer lugar, por la adsorción de la radiación, por los productos de la combustión (CO₂, H₂O y hollín) dentro de la flama, y en segundo lugar, por la radiación de la longitud de onda. La emisividad puede ser calculada con la ecuación 3.5.

$$\varepsilon = 1 - e^{-kx_f} \quad 3.5$$

donde:

ϵ	Emisividad	[-]
x_f	Longitud del haz de radiación en flamas	[m]
k	Coefficiente de extinción	[m⁻¹]

Para una bola de fuego el valor de la variable x_f puede reemplazarse por el valor del diámetro del incendio. Hardee et al indican que para incendios pequeños, un valor de $k= 0.18 \text{ m}^{-1}$ es apropiado. Por otra parte, la emisividad para incendios grandes es cercana a la unidad.

Coefficiente de atenuación debido a las condiciones atmosféricas

Siempre que un elemento esté radiando el medio será capaz de absorber cierta cantidad de la radiación. En el caso de la atmósfera, la absorción es llevada a cabo por el vapor de agua y en menor medida por el dióxido de carbono. La absorción de la radiación está en función de la temperatura del elemento radiante.

Duiser desarrolló un modelo matemático que predice la atenuación de la radiación por la absorción del medio.

$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad 3.6$$

donde:

τ_a	Coefficiente de atenuación	[-]
α_w	Factor de absorción de radiación por el agua	[-]
α_c	Factor de absorción de radiación por bióxido de carbono	[-]

Como se observa en la ecuación 3.6 la atenuación de la radiación por absorción de elementos en la atmósfera depende de la capacidad de absorción del agua y del bióxido de carbono, que a su vez depende de las presiones parciales de vapor de los dos componentes. La presión parcial de vapor del bióxido de carbono es de aproximadamente 30 Pa, sin embargo, en el caso de

la presión parcial de vapor en el agua, ésta varía en función del contenido de humedad del medio.

Para aproximar el valor de la atenuación de la radiación, Moorhouse and Pritchard desarrollaron un modelo matemático que predice la atenuación en función de la distancia entre el emisor y el receptor, sin embargo, este modelo tiene la limitante de ser válido únicamente para valores de distancia mayores a 300m.

$$\tau_a = 0.998^x \quad 3.7$$

donde:

τ_a	Coeficiente de atenuación	[-]
x	Distancia entre el emisor y el receptor	[m]

Por otro lado Raj desarrolló un modelo matemático que involucra, adicionalmente al anterior, la humedad relativa del medio. La ecuación es:

$$\tau_a = \log (14.1RH^{-0.108}x^{-0.13}) \quad 3.8$$

donde:

τ_a	Coeficiente de atenuación	[-]
x	Distancia entre el emisor y el receptor	[m]
RH	Humedad relativa	[%]

Dicho modelo presenta el inconveniente de no ser apto para humedades relativas menores al 20%. En cualquier caso, si se desea ser conservador con los resultados obtenidos, se recomienda tomar el valor de la atenuación debida a la absorción del medio igual a la unidad.

Factor de vista

El factor de vista es un coeficiente que afecta la cantidad real de radiación incidiendo directamente en el receptor, depende de la forma del fuego y de la del propio receptor, además de la distancia que hay entre ellos. En la medida que varíe el ángulo normal del área vulnerable del receptor con respecto a la normal al área radiante, será la variación de la radiación que reciba.

Como ya se mencionó, el factor de vista involucra el efecto que tienen las formas tanto del receptor como del emisor y la distancia que existe entre estos.

Al inicio de este apartado se estableció que la fuente emisora de radiación será representada por una figura geométrica bien definida, por ejemplo; en el caso de una bola de fuego, la figura geométrica adecuada para representarlo es una esfera; en el caso de un incendio flash, este será representado por un superficie plana; en tanto que para un incendio de charco, la figura más representativa es la de un cilindro vertical con diámetro igual al diámetro del charco. El factor de vista siempre será menor que la unidad, ya que el efecto de una desviación entre los ejes normales a las superficies emisoras y receptoras generará una disminución en la radiación recibida. Existe una ecuación que determina el factor de vista en función de los ángulos de desviación y la longitud entre ellos. La ecuación es:

$$F = \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi L^2} dA_1 \quad 3.9$$

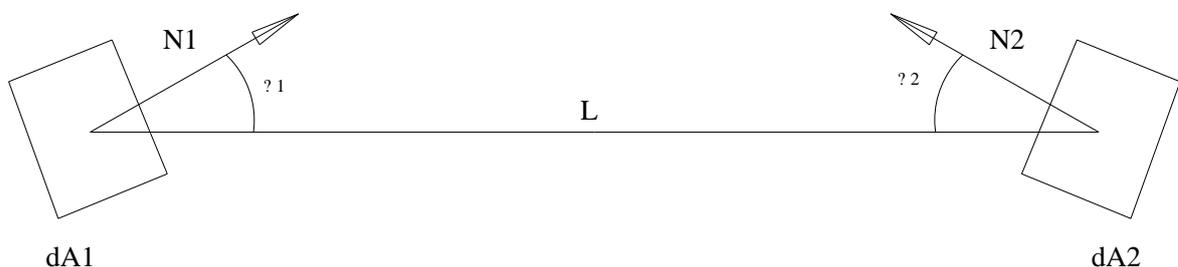


Fig. 3.1. Esquema de emisor receptor para el factor de vista

donde:

L	Longitud de la distancia más corta entre el emisor y receptor	[m]
Θ_1	Ángulo entre la línea L y la normal al emisor	[°]
Θ_2	Ángulo entre la línea L y la normal al receptor	[°]
A_1	Área frontal de la flama	[m²]
dA_2	Diferencial de área del receptor	[m²]

3.3. INCENDIO FLASH

Un incendio flash es el resultado de la ignición de una nube de gas formada de una sustancia inflamable. En esta ignición no se presenta una velocidad alta en el avance del frente de flama, es decir, se trata de una deflagración. Los tipos de combustión se detallan en el Capítulo 2. La velocidad de combustión en un incendio flash aumenta de forma lenta debido a condiciones del viento y de rugosidad del medio. La figura 3.2 muestra las condiciones necesarias para que la liberación de un vapor o gas de una sustancia inflamable ocasione un incendio flash.

La diferencia entre las consecuencias provocadas por un incendio flash y las que provoca una explosión de nube de vapor (ver apartado 2.4) se debe principalmente a la velocidad de combustión. En el caso de un incendio flash las consecuencias principales son debidas a la radiación térmica, en comparación a las consecuencias de una explosión de una nube de vapor, en la que la onda de choque, que provoca una sobrepresión, es el principal efecto físico.

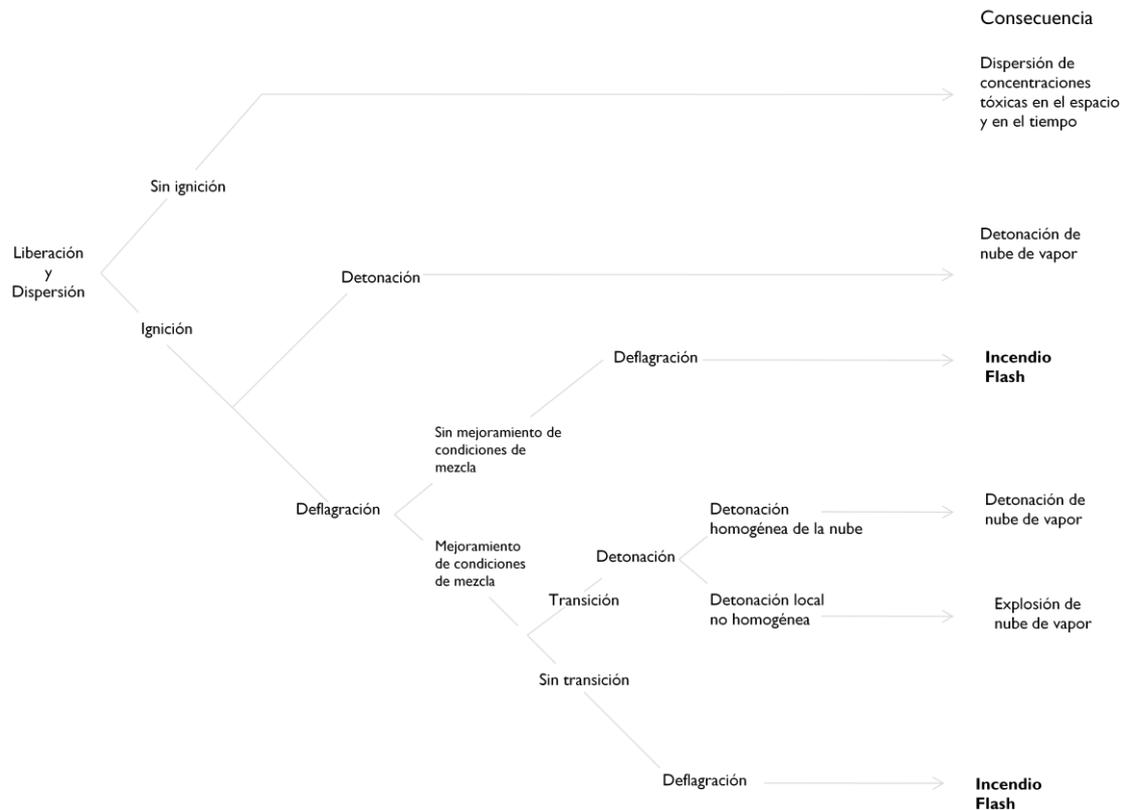


Fig. 3.2. Árbol de eventos para la ocurrencia de un incendio flash

3.3.1. MODELOS PARA LA GEOMETRÍA

Raj y Emmons desarrollaron un modelo matemático para la predicción de la geometría de un incendio flash. El modelo considera al incendio como una flama turbulenta en dos dimensiones que se desplaza a una velocidad constante. Este modelo matemático está basado en estas consideraciones:

- La velocidad del frente de flama es proporcional a la velocidad del viento.
- Cuando una nube de vapor se quema, en ella existe siempre un frente de flama que se mueve a velocidad constante y es seguido por una zona ya combustionada.

La figura 3.3 ilustra el modelo matemático basado en un frente de flama turbulenta que se propaga a una velocidad constante S en una zona de mezcla estancada con una profundidad D . El ancho de la base de la pluma (W) depende de los procesos de combustión en la parte boyante de la pluma. El fuego en la pluma es alimentado por una mezcla sin quemar que fluye a velocidad u_0 . El modelo considera que el proceso de combustión está limitado a la convección y de mayor manera por la entrada de aire a la pluma en combustión.

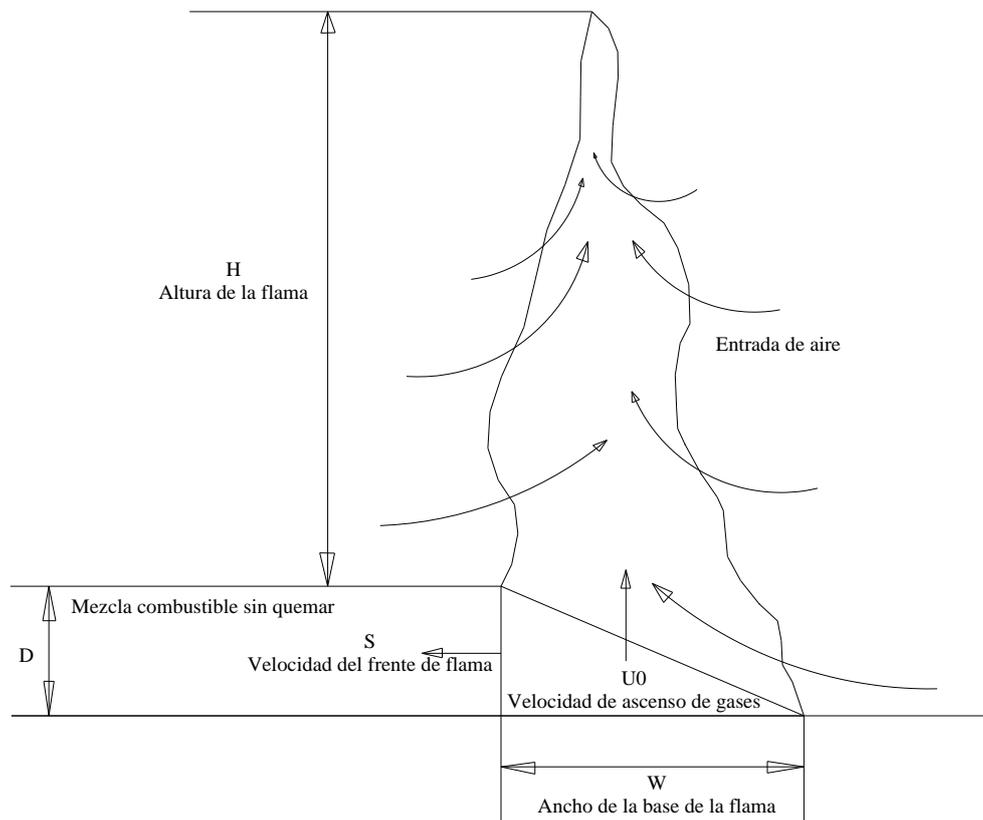


Fig. 3.3. Representación esquemática de una nube de vapor combustible no confinada en combustión.

La aplicación del principio de conservación de la masa, de *momentum* y de energía a la pluma, da como resultado un modelo matemático que relaciona la

altura de la flama (H) con la velocidad de ascenso de los gases en la base de la flama (U_0).

Experimentos al respecto indican que existe una relación cercana entre la altura de la flama y su base ($H/W = 2$). Con esta información es posible relacionar la altura de la flama con la velocidad S.

Haciendo un balance de masa en el área triangular que se forma entre la base de la pluma y el frente de flama, se llega a esta expresión semiempírica:

$$H = 20D \left[\frac{S^2}{gd} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right)^2 \frac{wr^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3} \quad 3.10$$

donde:

H	Altura de la flama visible	[m]
D	Profundidad de la pluma	[m]
S	Velocidad de combustión	[m/s]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
ρ_0	Densidad de la mezcla combustible-aire	[kg/m ³]
ρ_a	Densidad del aire	[kg/m ³]
r	Fracción estequiométrica de masa de la mezcla aire-combustible	[-]

$$w = \frac{\phi - \phi_{st}}{\alpha(1 - \phi_{st})} \quad 3.11$$

$$w = 0; \text{ para } \phi < \text{ ó igual a } \phi_{st}$$

donde:

α	Fracción de expansión de presión para combustión estequiométrica (en el caso de hidrocarburos vale 8)
ϕ	Composición de la mezcla combustible-aire (fracción volumen del combustible)
ϕ_{st}	Composición de la mezcla estequiométrica (fracción volumen del combustible)

Este modelo no considera la dinámica del incendio y requiere de conocer el valor de la velocidad “S”.

Con base en varias observaciones experimentales Raj y Emmons encontraron que la velocidad de combustión es proporcional a la velocidad del viento según la expresión 3.12.

$$S = 2.3U_w \quad 3.12$$

donde:

S	Velocidad de combustión	[m/s]
U_w	Velocidad del viento	[m/s]

Los efectos de la radiación por la deflagración de una nube de vapor pueden ser determinados siempre y cuando se conozca la composición química de la pluma y su forma. La determinación de dichas características es la parte compleja del cálculo de consecuencias, ya que la composición y forma son dependientes del espacio y del tiempo. Debido a que existen múltiples incertidumbres, es recomendable ser conservador en la interpretación de resultados de los métodos descritos. Adicionalmente, se deberá considerar que para el análisis la forma y composición de la pluma permanecen constantes y homogéneas, y que el frente de flama se comporta como un plano transversal a la pluma que se mueve a la velocidad de combustión.

3.3.2. MODELOS PARA LA RADIACIÓN

La radiación que recibe un objeto cercano a un incendio puede determinarse mediante el análisis del poder de emisión que tiene la fuente, de las condiciones atmosféricas que propicien una absorción de la radiación y de la posición del receptor y de la fuente.

Como se detalló en el apartado 3.2.2 un modelo matemático que predice la cantidad de energía radiante por unidad de área y de tiempo es:

$$q = FE\tau_a \quad 3.13$$

donde:

q	Radiación	[W/m²]
F	Factor de vista	[-]
E	Poder emisor del fuego por unidad de superficie	[W/m²]
τ_a	Coefficiente de atenuación debida a las condiciones atmosféricas	[-]

El único valor encontrado en la literatura para el poder emisor (E) de un incendio flash, es el que da Blackmore et al, quien indica que para el propano y el gas natural licuado el valor del poder emisor es de 173 kW/m²

Para la obtención de valores del coeficiente de atenuación debido a las condiciones atmosféricas y las bases para la obtención del poder emisor consultar el apartado 3.2.2.

En el caso del factor de vista es importante considerar las suposiciones que se hicieron para el modelo matemático descrito en el apartado 3.2.2. El frente de flama es un plano que se mueve a velocidad constante a través de la pluma, por ello, y dado que en el modelo de la flama sólida el emisor debe de representarse como una figura geométrica bien definida, la mejor figura que representa al emisor es un plano. En el siguiente apartado se describen los distintos métodos para determinar el factor de vista (F) para el cómputo de la energía de radiación.

Factor de vista para superficies emisoras planas

Para el caso de superficies emisoras que sean factibles de simularse como un plano radiante, el modelo matemático se basa en la suposición de que la radiación resultante del emisor será la suma de la radiación de dos áreas. La primera es la porción del área radiante que queda del lado izquierdo al corte que hace un plano que pasa por el centro del receptor y que contiene al eje

perpendicular a la intersección del receptor y el plano del piso. La segunda es el área radiante restante.

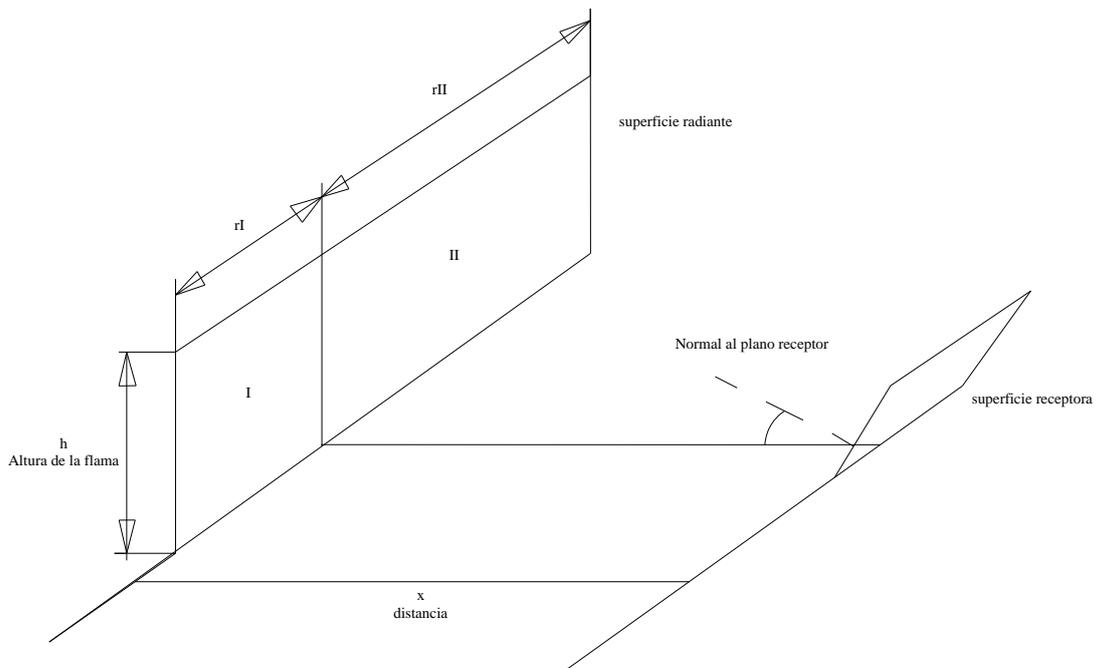


Fig. 3.4. Factor de vista para superficies emisoras planas

Para cada una de las superficies radiantes (I y II) se tendrá que determinar la radiación máxima y posteriormente sumarse, esto mediante las ecuaciones 3.14 a 3.17.

$$h_r = \frac{h}{r} \quad 3.14$$

$$X_r = \frac{x}{r} \quad 3.15$$

$$A = \frac{1}{(h_r^2 + X_r^2)^{0.5}} \quad 3.16$$

$$B = \frac{h_r}{(1 + X_r^2)^{0.5}} \quad 3.17$$

Es necesario determinar los factores de vista, tanto verticales como horizontales, para posteriormente determinar el factor de vista máximo mediante la obtención de la raíz de la suma de los cuadrados de dichos factores de vista.

En el caso de una superficie horizontal, el factor de vista está dado por la ecuación 3.18.

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{X_r} \right) - AX_r \tan^{-1}(A) \right] \quad 3.18$$

En el caso de una superficie vertical, el factor de vista está dado por la ecuación 3.19.

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[h_r A \tan^{-1}(A) + \left(\frac{B}{h_r} \right) \tan^{-1}(B) \right] \quad 3.19$$

El factor de vista máximo se determina mediante la expresión 3.20.

$$F_{max} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2} \quad 3.20$$

La tabla 3.1 y 3.2 muestran los valores de los factores de vista, tanto verticales como horizontales, para distintas formas y posiciones. Adicionalmente la tabla 3.3 y la gráfica de la figura 3.5 muestran el comportamiento del factor de vista máximo al variar condiciones geométricas y de posición.

Tabla 3.1. Factores de vista para superficies horizontales planas*1000

X_r	h_r								
	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
1. horizontal target ($1000 \times F_h$)									
0.1	146	276	341	400	443	456	461	465	467
0.2	53	146	221	310	389	413	423	430	435
0.3	25	83	144	236	337	371	386	397	403
0.5	9	34	68	137	249	296	318	336	346
1.0	2	8	17	42	111	161	190	219	238
1.5	1	3	6	17	53	88	114	146	170
2.0		1	3	8	28	51	71	100	126
3.0			1	3	10	20	31	50	75
5.0				1	2	5	9	16	31

Tabla 3.2. Factores de vista para superficies verticales planas*1000

X_r	h_r								
	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
2. vertical target ($1000 \times F_v$)									
0.1	353	447	474	489	496	497	497	497	498
0.2	223	352	414	461	484	488	489	490	490
0.3	156	274	349	421	466	474	477	478	479
0.5	94	178	245	335	416	435	442	445	447
1.0	41	80	117	180	277	318	335	347	352
1.5	22	44	65	105	179	222	245	264	274
2.0	14	17	41	66	120	157	180	204	218
3.0	7	13	20	32	62	86	105	129	148
5.0	2	5	7	12	24	35	45	61	80

Tabla 3.3. Factores de vista máximos*1000

X_r	h_r								
	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
0.1	382	525	584	632	665	674	678	681	682
0.2	229	381	469	555	621	639	647	652	655
0.3	158	286	377	483	575	602	613	622	626
0.5	94	181	255	362	484	526	544	558	565
1.0	41	80	188	185	299	356	385	410	425
1.5	22	44	66	106	187	239	270	302	322
2.0	14	27	41	67	123	165	194	227	252
3.0	7	13	20	33	62	88	109	138	165
5.0	2	5	7	12	24	36	46	63	86

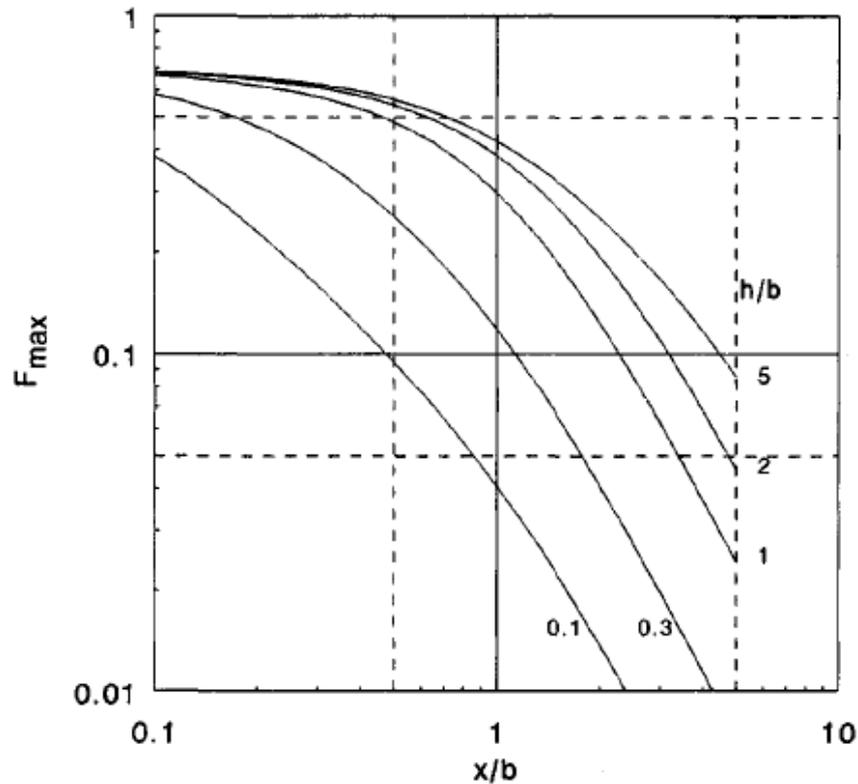


Fig.3.5. Factores de vista máximos para distintas geometrías

3.4. BOLA DE FUEGO

Una bola de fuego (fireball) es el resultado de la ignición de una nube de vapor. El origen de esta nube generalmente es una explosión BLEVE que involucra a una sustancia inflamable o una mezcla de estas. La energía se emite principalmente en forma de calor radiante. El núcleo interior de la nube está compuesto casi por completo de combustible, mientras que la capa exterior, lugar en donde se produce inicialmente la ignición, consiste en una mezcla inflamable de aire-combustible. Debido a que las fuerzas de flotabilidad de los gases calientes aumentan, el incendio tiende a elevarse, expandirse, y a tomar una forma esférica.

Una explosión BLEVE, que involucra sustancias inflamables, provocará un incendio, si la explosión es provocada por fuego. La salida de material del contenedor provocará la formación de una nube de vapor. Después de la ignición, la nube formada se comienza a incendiar en su superficie en donde se presentan las condiciones adecuadas de inflamabilidad. En el período de la explosión en el que el vapor se eleva se provocará una bola de fuego.

Los efectos de la radiación debida a una bola de fuego dependen de:

- a) El diámetro de la bola de fuego en función del tiempo y diámetro máximo alcanzado por el incendio.
- b) La altura del centro de la bola de fuego por encima de la posición de ignición después del lanzamiento.
- c) La superficie emisiva de la bola de fuego
- d) La duración de la combustión

Las consecuencias de la radiación estarán en función de la distancia desde la bola de fuego al receptor y de las condiciones atmosféricas. Dada la intensidad de la radiación generada en una bola de fuego, los efectos de la radiación son de mayor interés que los efectos de la onda de choque provocada.

3.4.1. MODELOS PARA LA GEOMETRÍA

Para la determinación de los efectos físicos provocados por una bola de fuego, es necesario determinar cuatro parámetros principales; la masa de la sustancia inflamable involucrada, el diámetro de la bola de fuego, la duración y el poder emisivo. Para un análisis más detallado será necesario conocer los cambios que sufre la geometría de la bola de fuego durante su existencia, la elevación y la variación del poder emisivo.

3.4.1.1. MODELOS EMPÍRICOS

Muchos autores han publicado ecuaciones empíricas producto de experimentación y de bases teóricas. Estos modelos describen el diámetro máximo que alcanza la bola fuego en el instante final de la combustión, solo en función de la masa combustible.

Un ejemplo de tales modelos son los publicados por Roberts, Jaggars et al y Pape et al, estos son:

$$D_c = 5.8m_f^{1/3} \quad 3.21$$

$$t_c = 0.45m_f^{1/3}; \text{ para } m_f \leq 30,000 \text{ kg}$$

$$t_c = 2.6m_f^{1/6}; \text{ para } m_f > 30,000 \text{ kg}$$

donde:

D_c	Diám. máx. de la bola de fuego al final de la fase de combustión	[m]
t_c	Duración de la combustión	[s]
m_f	Masa del combustible	[kg]

La tabla 3.1 muestra los modelos empíricos encontrados, desarrollados para la determinación de la duración de la fase de combustión, así como de la determinación del diámetro máximo del incendio, variables necesarias para determinar los efectos físicos.

Tabla 3.1. Modelos empíricos para determinar la duración y diámetro de la bola de fuego

Referencia	combustible	Documento fuente	Duración de la Bola de fuego(s)	Diámetro de la bola de fuego(m)
Lhou and Maund 1982	Rocket fuel	High 1968	$0.30m_f^{0.320}$ (1) $0.49m_f^{0.320}$ (2)	$3.86m_f^{0.320}$ (1) $6.20m_f^{0.320}$ (2)
Duiser 1985		Raj 1977	$1.34m_f^{1/6}$	$5.45m_f^{1/3}$
Fay and Lewis 1977	C_2H_6	Experiments	$2.53m_f^{1/6}$	$6.28m_f^{1/3}$
Hasegawa and Sato 1977	C_2H_{12}	Experiments	$1.10m_f^{0.097}$	$5.28m_f^{0.277}$
Lhou and Maund 1982	C_2H_6	Maurer et al. 1977	$0.32m_f^{1/3}$	$3.51m_f^{1/3}$
Lhou and Maund 1982	CH_4	Hardee et al. 1978	$2.57m_f^{0.187}$	$6.36m_f^{0.325}$
Roberts 1982		Literature and model	$0.45m_f^{1/3}$	$5.8m_f^{1/3}$
Williamson and Mann 1981		Bader 1971; Hardee and Lee 1973	$1.09m_f^{1/6}$	$5.88m_f^{1/3}$
Moorhouse and Pritchard 1982		Data of Hasegawa and Sato 1977	$1.09m_f^{0.327}$	$5.33m_f^{0.327}$
Lhou and Maund 1982	C_2H_6	Maurer et al. 1977	$1.10m_f^{1/3}$ (3) $0.31m_f^{1/3}$	$12.2m_f^{1/3}$ (3) $3.46m_f^{1/3}$
Pietersen 1985		Literature	$0.852m_f^{0.26}$	$6.48m_f^{0.325}$
Pitblado 1985		Literature	$0.852m_f^{0.26}$	$6.48m_f^{0.325}$

3.4.1.2. MODELOS TEÓRICOS

La radiación generada por una bola de fuego puede determinarse en función tanto del diámetro máximo como de la duración de la fase de combustión. Los modelos matemáticos para la predicción de los efectos físicos que en este apartado se presentan, surgen de la suposición de la existencia de una esfera de aire y combustible a una temperatura ambiente. Dado que el volumen molar de cualquier gas en condiciones estándar (0 °C y 1 atm) es una constante, si el vapor es considerado como un gas ideal, entonces el diámetro de la esfera puede ser calculado a partir de la masa liberada, la masa del aire y la temperatura ambiente con la ecuación 3.22.

$$D_0 = \left[\frac{6 V_M T_a}{\pi M 273} (m_f + m_a) \right]^{1/3} = 0.539 \left[(m_f + m_a) \frac{T_a}{M} \right]^{1/3} \quad 3.22$$

donde:

M	Peso molecular promedio de la mezcla de aire y combustible [kg/kmol]	
V_M	Volumen de un mol a 273 K y a presión atmosférica	[m³/kmol]
T_a	Temperatura ambiente inicial	[K]
m_f	Masa del combustible	[kg]
m_a	Masa del aire	[kg]
D₀	Diámetro inicial de la esfera	[m]

En ocasiones es probable que la esfera únicamente esté formada de combustible, en tal caso, el valor de la variable m_f es cero, en tanto que el valor de M será únicamente el valor de la masa del combustible.

a) Modelo Isotérmico

En este modelo se hace la consideración de que la velocidad de combustión es constante en toda la extensión de la esfera. La combustión es controlada por el suministro de aire y cesa después de un tiempo (t_c), el cual está relacionado empíricamente con la masa inicial de combustible en la masa inicial en la esfera. Se considera que una fracción (i₁-f_c) es usada para la formación de hollín y el restante se quema estequiométricamente, produciendo un incremento en el número de moles n_i por mol de gas inflamable. La proporción estequiométrica molar de aire en el gas inflamable es μ y dV/dt es la tasa volumétrica del aire que ingresa.

La tasa de incremento de volumen se puede determinar cómo:

$$\frac{\pi D^2}{2} \frac{dD}{dt} = \frac{dV_a}{dt} \frac{T_c}{T_a} \left(1 + \frac{n_j f_c}{\mu} \right)$$

donde:

D	Diámetro	[m]
T_c	Temperatura de la bola de fuego	[K]
T_a	Temperatura ambiente del aire	[K]
dD/dt	Tasa de incremento del diámetro de la bola de fuego	[m/s]
dV_a/dt	Tasa de entrada de aire	[m³/s]
μ	Proporción estequiométrica molar combustible-aire	[-]
n_i	Incremento del número total de moles por mol de gas inflamable	[-]

La tasa de combustión es igual a la tasa del calor aplicado para calentar el aire entrante más el perdido como energía radiante.

$$\frac{273}{T_a} \frac{dV_a}{dt} \frac{M h_c f_c}{V_M \mu} = \frac{273}{T_a} \frac{dV_a}{dt} \frac{M_a c_{pa} (T_c - T_a)}{V_M} + \pi D^2 \epsilon \sigma T_c^4 \quad 3.23$$

donde:

σ	Constante de Stefan-Boltzman (5.67×10^{-11})	[kW/(m ² K ⁴)]
ϵ	Emisividad	[-]
V_M	Volumen de mol	[m ³ /kmol]
M	Peso molecular promedio de la mezcla de aire y combustible	[kg/kmol]
M_a	Peso molecular del aire	[kg/kmol]
h_c	Calor mínimo de combustión (por ejemplo calor de combustión menos el calor de evaporación del agua formada	[kJ/kg]
c_{pa}	Calor específico del aire a presión constante	[kJ/kg K]

Cuando es sustituido dV_a/dt en la ecuación 3.23, se obtiene la ecuación 3.24 de la temperatura de la bola de fuego:

$$\sigma \epsilon T_c^4 = \frac{273}{2V_M} \left[\frac{M h_c f_c - M_a c_{pa} \mu (T_c - T_a)}{T_c (\mu + n_i f_c)} \right] \frac{dD}{dt} \quad 3.24$$

El diámetro final de la bola de fuego en metros es dado por la expresión 3.25:

$$D_c = \left[\frac{6 V_M T_c}{\pi M 273} \{ \mu + (n_i + 1) f_c \} m_f \right]^{1/3} \quad 3.25$$

Donde m_f es la masa inicial del combustible en kg.

Usando el modelo matemático para la determinación del tiempo de combustión de Roberts, se tiene:

2011

$$t_c = 0.45m_f^{1/3}$$

La tasa de incremento del diámetro está dado por la ecuación 3.26:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{(D_c - D_0)}{t_c} = \frac{0.425V_M^{1/3}}{M^{1/3}} [\{\mu + (n_i + 1)f_c T_c\}^{1/3} - T_a^{1/3}] \quad 3.26$$

La combinación de los cuatro modelos matemáticos precedentes con el modelo que describe el diámetro inicial (D_0), la temperatura de la bola de fuego y el diámetro máximo pueden ser calculados. Se deduce que la temperatura de la bola de fuego, y por tanto su potencia emisiva, es independiente de la masa inicial de combustible.

Se ha determinado, con base en mediciones de la elevación de una bola de fuego, que la velocidad de elevación es igual a la tasa de incremento en el diámetro, y que para el metano y el butano $dD/dt=10$ m/s, así que, se determina una simple relación para determinar la altura del centro de la bola de fuego:

$$z = 10t,$$

Y para condiciones finales:

$$z_c = 10 t_c$$

donde:

z_c	Altura final del centro de la bola de fuego	[m]
t_c	Tiempo de combustión	[s]

La proporción inicial de la nube utilizada para la formación de hollín ($1 - f_c$), puede ser determinada como la proporción del calor de formación al calor de combustión. Para el propano el calor de combustión $h_c = 46300$ kJ/kg y $f_c = 0.95$. Con una emisividad de 1, se han determinado los modelos matemáticos:

- $T_c = 1930$ K, $D_c = 5.7 m_f^{1/3}$ y $t_c = 0.45 m_f^{1/3}$

Tiempo de elevación de la bola de fuego

Para una predicción correcta del desarrollo geométrico de una bola de fuego, es necesario considerar su elevación, la cual sucede en la tercera fase, misma que se caracteriza por ser boyante y por su entrada masiva. Hardee y Lee desarrollaron un modelo matemático que describe el tiempo de elevación en función de la masa de combustible en la mezcla.

$$t = 1.1m_f^{1/6} \quad 3.28$$

3.4.2. MODELOS PARA LA RADIACIÓN

La radiación térmica es el principal efecto físico debido a una bola de fuego. Esta puede causar incendios secundarios y producir quemaduras severas en las personas. Una rápida mezcla, combustión y evaporación de las gotas de combustible producen una bola de fuego cuya emisión térmica excede la producida por una flama normal. Para determinar los efectos físicos se han desarrollado modelos matemáticos teóricos y empíricos, mismos que se muestran a continuación.

Modelo de Hymes

El modelo de Hymes surge del modelo general de punto fuente y del modelo de la duración de la bola de fuego de Robert. De acuerdo con estos modelos, la radiación máxima térmica generada por una bola de fuego está en función de la longitud del centro del incendio al centro del receptor (L), dando como resultado la ecuación 3.29.

$$q = \frac{2.2\tau_a R H_c m_f^{0.67}}{4\pi L^2} \quad 3.29$$

donde:

q	Radiación	[W/m ²]
τ_a	Coeficiente de atenuación debida a las condiciones atmosféricas	[-]
R	Fracción radiactiva del calor de combustión	[-]
H_c	Calor neto de combustión por unidad de masa	[J/kg]
m_f	Masa del combustible en el incendio	[kg]
L	Distancia entre emisor y receptor	[m]

Hymes sugiere los siguientes valores de R:

R = 0.3; Para bolas de fuego surgidas de presiones por debajo de la de la válvula de alivio de sobrepresión.

R = 0.4; Para bolas de fuego surgidas de presiones en o por encima de la de la válvula de alivio de sobrepresión.

Modelo de la flama sólida adaptado a una bola de fuego

La radiación incidente por unidad de área y de tiempo está dado el modelo matemático descrito a continuación:

$$q = FE\tau_a \quad 3.30$$

donde:

q	Radiación	[W/m ²]
F	Factor de vista	[-]
E	Poder emisivo del fuego por unidad de superficie	[W/m ²]
τ_a	Coeficiente de atenuación debida a las condiciones atmosféricas	[-]

El poder emisivo para escapes mayores a 6.2 kg de combustible que suceden a 20 atm de presión de vapor, puede obtenerse mediante la ecuación 3.31 que relaciona el poder emisivo con la presión de vapor en el momento de la liberación.

2011

$$E = 235P_v^{0.39} \quad 3.31$$

donde:

E	Poder emisivo	[kW/m²]
P_v	Presión de vapor al momento de la liberación	[MPa]

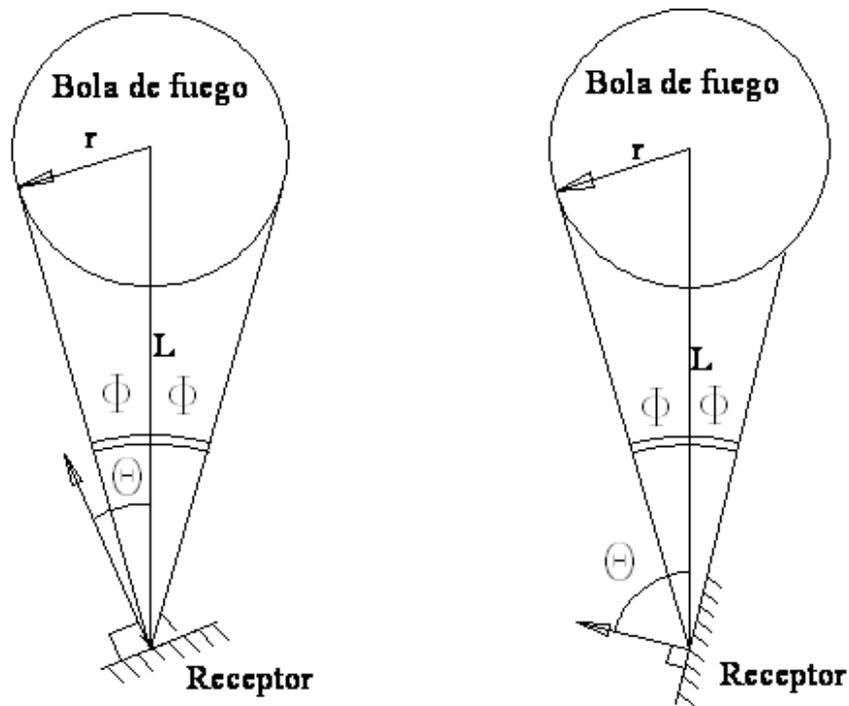
Este modelo tiene la limitante de ser válido para una presión de vapor máxima de 2 MPa, lo que da como valor máximo de poder emisivo 308, dicho resultado no concuerda con los valores máximos obtenidos en mediciones experimentales, por ejemplo, en liberaciones de 1000 a 2000 kg de gas butano liberado a presiones entre 1 y 1.5 MPa, se obtuvieron mediciones con radiómetros con valores de 320 a 370 kW/m². Un valor promedio razonable con las mediciones experimentales, es 350 kW/m² para hidrocarburos.

En el caso que el emisor sea semejante a la forma esférica, tal como en el caso de una bola de fuego, entonces el factor de vista puede predecirse mediante una ecuación que surge del análisis geométrico:

$$F = \frac{r^2}{L^2} \cos(\theta) \quad 3.32$$

donde:

r	Radio de la esfera	[m]
L	Distancia entre el centro de la esfera y el receptor	[m]
θ	Ángulo entre la línea L y la normal a la superficie receptora [°]	



A) $\theta < \pi/2 - \varphi$

B) $\theta < \pi/2 - \varphi$

Fig. 3.5. Factor de vista para una bola de fuego

- A) El receptor expuesto a toda la radiación
- B) El receptor expuesto parcialmente a la radiación

Para utilizar este modelo es necesario que la esfera esté completamente a la vista del receptor, es decir que el receptor esté expuesto a toda la radiación. En el caso de que la esfera no esté completamente “visible”, entonces la ecuación a utilizar, es:

$$F = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left[\frac{(L_r^2 - 1)^{\frac{1}{2}}}{L_r \operatorname{sen} \theta} \right] + \frac{1}{\pi L_r^2} \cos \theta \cos^{-1} \left[-(L_r^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \cot \theta \right] - \frac{1}{\pi L_r^2} (L_r^2 - 1)^{\frac{1}{2}} (1 - L_r^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \quad 3.33$$

donde:

r	Radio de la esfera	[m]
D	Diámetro de la bola de fuego	[m]
L	Distancia entre el centro de la esfera y el receptor	[m]
L _r	Distancia reducida (L/r)	[-]
Θ	Ángulo entre la línea L y la normal a la superficie receptor	[°]

La figura 3.6 muestra la gráfica que describe el comportamiento del valor del factor de vista (F) al variar la relación L/r y el ángulo de la normal del receptor (θ).

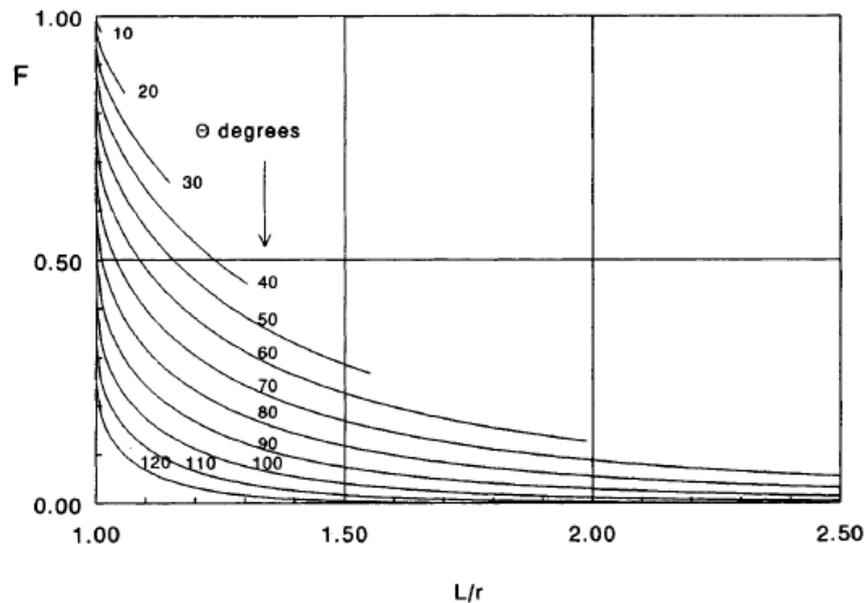


Fig. 3.6. Factor de vista para una bola de fuego (vista incompleta)

Si la bola de fuego no ocurre a nivel de piso, situación que generalmente sucede, entonces el análisis para determinar el factor de vista debe de incluir la variable de la altura del centro del incendio. El análisis es:

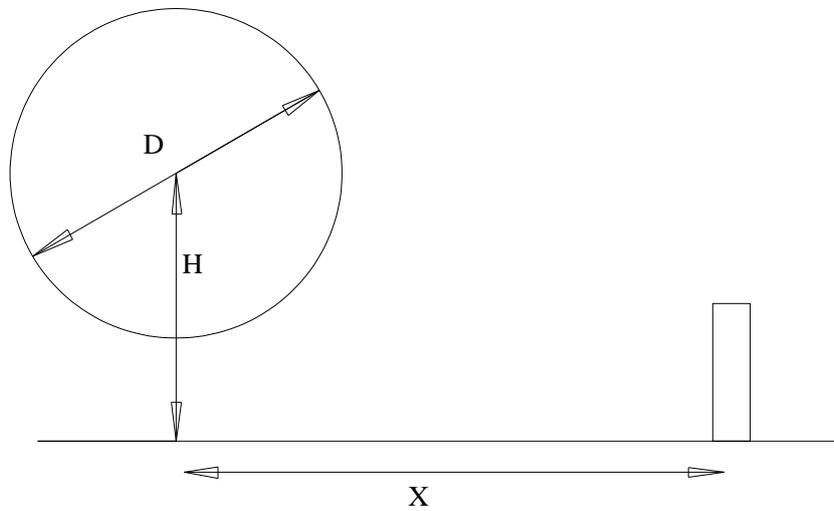


Fig. 3.7. Factor de vista para una bola de fuego

Si la bola de fuego es representada por una esfera de diámetro D y radio r, la distancia entre la proyección a nivel de piso del centro de la esfera al centro del receptor es llamada x, la altura del centro de la esfera H, entonces los modelos matemáticos para predecir el valor del factor de vista son:

- a) Para una superficie contenida en un plano vertical

$$F_v = \frac{x\left(\frac{D}{2}\right)^2}{(x^2+H^2)^{3/2}} \quad 3.34$$

- b) Para una superficie contenida en un plano horizontal:

$$F_h = \frac{H\left(\frac{D}{2}\right)^2}{(x^2+H^2)^{3/2}} \quad 3.35$$

Cabe aclarar que dichas ecuaciones son válidas siempre y cuando el valor de la distancia x sea mayor que el valor del radio de la esfera. En el caso dado que la distancia sea menor al radio, entonces el factor de vista para una superficie vertical se determina con las ecuaciones 3.36 y 3.37.

$$H_r = \frac{H}{r} \quad 3.36$$

$$x_r = \frac{x}{r} \quad 3.37$$

$$F_v = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \operatorname{sen}^{-1} \left[\frac{(x_r^2 + H_r^2 - 1)^{1/2}}{H_r} \right] + \frac{x_r}{\pi(x_r^2 + H_r^2)^{3/2}} \operatorname{COS}^{-1} \left[-\frac{x_r(x_r^2 + H_r^2 - 1)^{1/2}}{H_r} \right] - \frac{(1 - x_r)^{1/2}}{\pi(x_r^2 + H_r^2)^{1/2}} \quad 3.38$$

En ocasiones se considera que la bola de fuego toca el suelo, es decir, que $Z_c = D/2$. Así como se detalló en el apartado anterior, la elevación y el diámetro de la bola de fuego son dependientes del tiempo de combustión, por lo que se puede determinar que el factor de vista también está en función del tiempo de combustión.

Modelo matemático alternativo empírico de Robert

Robert, basado en las mediciones experimentales de Hasegawa y Sato, determinó una ecuación que predice la radiación incidente debida al poder emisor de un emisor en un receptor, correlacionando la radiación con la distancia a la cual sucede, en función también de la masa del combustible, dando como resultado el modelo matemático:

$$q = 828 m_f^{0.771} L^{-2} \quad 3.39$$

donde:

q	Radiación incidente en el receptor	[kW/m ²]
m_f	Masa del combustible	[kg]
L	Longitud mínima entre los centros del emisor y del receptor	[m]

3.5. INCENDIO DE CHARCO

Cuando se produce el escape de un líquido de un contenedor se pueden generar diferentes tipos de efectos físicos, el resultante está en función del tipo de liberación, las condiciones de almacenamiento del líquido (presión y temperatura) y de la geometría de lugar en donde se depositará el líquido. En este apartado se presentará un análisis de los modelos matemáticos para la predicción de consecuencias por incendios provocados por la ignición de un líquido depositado en una superficie horizontal plana.

En el caso de que se produzca la ignición del líquido derramado, el incendio resultante dependerá del tipo de escape (instantáneo o continuo). En el caso de una liberación instantánea, el charco se irá expandiendo hasta que encuentre una barrera, o bien, hasta que se haya consumido todo el combustible; en el caso de que sea liberación continua, de igual forma el charco se expandirá hasta que la velocidad de combustión se iguale con la velocidad de salida, llegando así a un diámetro de equilibrio de tiempo finito, mientras no se detenga la fuga.

3.5.1. MODELOS PARA LA GEOMETRÍA

Geometría del charco

Los modelos que describen la radiación de un incendio de charco, están en función de la geometría del derrame. Si el derrame ocurre en una superficie limitada en sus bordes, entonces el diámetro será el equivalente al que represente el área de un círculo igual al área de la superficie limitante. En el caso de que no exista un borde que limite al derrame, entonces será necesario modelar la extensión del charco por medio de ecuaciones.

Dado que el comportamiento de la geometría del charco está en función de la extensión del derrame, y a su vez este, es dependiente del tipo de liberación, será necesario determinar si es continua o instantánea. Para tal efecto es útil el modelo matemático que indica, con base en el parámetro τ_{cr} , el tipo de liberación:

2011

$$\tau_{cr} = \frac{t_s \dot{y}}{V^{1/3}} \quad 3.40$$

Si la variable τ_{cr} tiene un valor mayor a 0.002, entonces la liberación es considerada como instantánea, por el contrario si es menor, entonces se considera como continua.

Si se determina que la liberación es instantánea, entonces el diámetro puede determinarse por medio de la ecuación 3.41, la cual está en función del tiempo de liberación.

$$D_e = D_m \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{t}{t_m} \left(1 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_m} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad 3.41$$

donde:

D_m	Diámetro máximo que puede alcanzar el charco	[m]
t_m	Tiempo transcurrido hasta el diámetro máximo del charco	[s]

El diámetro máximo se obtiene de la expresión 3.42.

$$D_m = 2 \left(\frac{V_L^3}{\dot{y}^2} \right)^{\frac{1}{8}} \quad 3.42$$

donde:

V_L	Volumen del líquido	[m ³]
\dot{y}	Velocidad de combustión	[kg/m ² *s]

Así mismo, el tiempo necesario para alcanzar el diámetro máximo es obtenido mediante el uso de la expresión 3.43.

$$t_m = 0.6743 \left(\frac{V_L}{g\dot{y}^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 3.43$$

donde:

t_m	Tiempo transcurrido hasta el diámetro máximo del charco	[s]
V_L	Volumen del líquido	[m ³]
\dot{y}	Velocidad de combustión	[m/s]
g	Valor de la aceleración de la gravedad	[m/s ²]

Dado que el diámetro máximo solo ocurre un tiempo breve, es conveniente calcular un diámetro promedio que sea representativo del charco real, además de que con el diámetro máximo se obtienen valores muy conservadores. La ecuación útil para el cálculo del diámetro medio es la 3.44.

$$D_a = 0.683D_m \quad 3.44$$

En el caso de un escape continuo, las ecuaciones 3.45 y 3.46 permiten calcular el diámetro de equilibrio:

$$D_{eq} = 2 \left(\frac{V_L}{\pi\dot{y}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3.45$$

$$t_{eq} = 0.564 \frac{D_{eq}}{(g\dot{y}D_{eq})^{\frac{1}{3}}} \quad 3.46$$

a) Geometría del incendio

Para el cálculo de los efectos físicos ocasionados por un incendio de charco es necesario el conocimiento de la geometría del incendio, esto con el fin de poder relacionarla con una figura geométrica bien definida y así poder utilizar el método de la flama sólida. Así pues, para este caso, el diámetro del charco, que se calcula con los métodos ya descritos en este mismo apartado, será el

mismo que el diámetro de la base del incendio. Las variables de la altura y, en la presencia de viento también la inclinación y el desplazamiento, se determinan con las ecuaciones que se describen a continuación:

Para la altura de la flama la expresión más común es la de Thomas, la cual es general y se adapta de forma óptima a todo tipo de incendios, esta es:

$$\frac{L}{D} = 42 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.61} \quad 3.47$$

Si el incendio es modificado en su geometría por la presencia de viento significativamente, entonces será necesario considerar dicho fenómeno. Thomas crea la ecuación 3.48 para tal efecto:

$$\frac{L}{D} = 55 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.67} u^{*-0.21} \quad 3.48$$

donde:

L	Altura de la flama	[m]
D	Diámetro del incendio	[m]
\dot{m}''	Velocidad másica de combustión	[kg/m² s]
ρ_a	Densidad del aire ambiente	[kg/m³]
g	Valor de la aceleración de la gravedad	[m/s²]
u*	Velocidad del viento adimensional	[-]

La velocidad adimensional se calcula mediante la ecuación 3.49.

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{g \dot{m}'' D}{\rho_v} \right)^{1/3}} \quad 3.49$$

donde:

u_w	Velocidad del viento	[m/s]
g	Valor de la aceleración de la gravedad	[m/s ²]
\dot{m}''	Velocidad másica de combustión	[kg/m ² s]
D	Diámetro del incendio	[m]
ρ_v	Densidad del vapor combustible	[kg/m ³]

En el caso de presencia de viento incidiendo en el incendio, es necesario tomar en cuenta la inclinación de la flama y, en su caso, también el desplazamiento de la base, lo que involucra un aumento en el diámetro. Las ecuaciones que se presentan indican el valor del ángulo de inclinación de la flama para valores de la velocidad del viento mayores a 1 metro por segundo.

$$\cos \theta = 1; \quad \text{para } u^* \leq 1$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}}; \quad \text{para } u^* > 1$$

donde:

u^*	Velocidad del viento adimensional	[-]
-------	-----------------------------------	-----

El nuevo diámetro, en el caso de desplazamiento por viento en la base, se puede determinar por medio de la ecuación 3.50.

$$\frac{D'}{D} = 1.5(Fr_{10})^{0.069} \quad 3.50$$

donde:

D'	Diámetro afectado por el viento	[m]
D	Diámetro del incendio	[m]
Fr_{10}	Número de Froude (u_w^2/gD), con la velocidad del viento (u_w) medida a una altura de 10m	[-]

La radiación es el efecto físico principal a causa de un incendio de charco. En apartados anteriores se ha detallado el procedimiento general para su obtención con base en el modelo de la flama sólida de la radiación de un incendio. En este apartado se describe dicho método aplicado a un incendio de charco, adicionalmente se consideran los efectos físicos, tanto de la radiación como de convección para el caso de receptores que se encuentren inmersos en el incendio de charco.

3.5.2. MODELOS PARA LA RADIACIÓN

Respecto a la radiación recibida por objetos alejados de la flama, el único mecanismo que se debe de considerar es la radiación. En el modelo de la flama sólida se considera que únicamente las partes visibles de la llama emiten radiación. Esta consideración es válida, ya que se ha comprobado experimentalmente que las partes no visibles emiten menos de un 10% de la radiación media emitida por las flamas visibles.

La ecuación que permite determinar la radiación es la 3.51.

$$q = FE\tau_a \quad 3.51$$

donde:

q	Radiación	[W/m²]
F	Factor de vista	[-]
E	Poder emisivo del fuego por unidad de superficie	[W/m²]
τ_a	Coeficiente de atenuación de radiación debido a las condiciones atmosféricas	[-]

Poder emisivo para un incendio de charco

El poder emisivo de un incendio de charco puede obtenerse mediante las ecuaciones descritas en el apartado 3.2.2, sin embargo, también son válidas

las creadas por Duiser, quien calculó el poder emisor en función de la tasa de combustión y del calor emitido. Dado que los resultados obtenidos con el modelo de Duiser son conservadores, él propone el uso de una fracción de emisión (f) de 0,35, resultando la ecuación 3.52.

$$E = \frac{0.35 \dot{m} H_c}{1 + 4 \frac{h_f}{d_f}} \quad 3.52$$

donde:

E	Poder emisor	[W/m²]
m"	Velocidad de combustión por unidad de área	[kg/s·m²]
H_c	Calor de combustión	[J/kg]
h_f	Altura de la flama	[m]
d_f	Diámetro de la flama	[m]

Al aplicar este método, hay que tener en cuenta que, para incendios muy grandes de combustibles que generan mucho humo y para objetos situados en las proximidades del incendio, no se puede utilizar un poder emisor medio para toda la flama, ya que la parte inferior de la flama irradia fuertemente, del orden de 130-150 kW/m², mientras que la parte superior cubierta de humo irradia alrededor de 20 kW/m². Para determinar la altura por encima del nivel del líquido donde inicia el humo, Mudan propone la ecuación.

$$H_L = e^{-0.12D} L \quad 3.53$$

Para este tipo de incendios y para los objetos situados a ras de suelo y próximos a la flama (menos de 2 diámetros del charco), es significativo calcular la radiación incidente que corresponde a cada área (con y sin humo) de la flama. La suma de los resultados es un valor de la radiación incidente más exacto, comparándolo con el valor que se obtiene con un valor medio del poder emisor:

2011

$$Q = \tau_a [F_f E_m + F_u E_s] \quad 3.54$$

donde:

τ_a	Coeficiente de atenuación de radiación debido a las condiciones atmosféricas	[-]
F_f	Factor de vista de la flama	[-]
E_m	Poder de emisión de la zona luminosa	[kW/m ²]
F_u	Factor de vista de la parte de la flama cubierta de humo	[-]
E_s	Poder de emisión de la parte de la flama cubierta de humo	[kW/m ²]

En el caso de que el receptor se encuentre alejado del incendio (más de dos veces el diámetro del charco), se puede utilizar un valor medio del poder emisor, según la expresión 3.55.

$$E_{med} = E_m e^{-0.12D} + E_s (1 - e^{-0.12D}) \quad 3.55$$

donde:

E_m	Poder de emisión de la zona luminosa	[kW/m ²]
D	Diámetro del incendio	[m]
E_s	Poder de emisión de la parte de la flama cubierta de humo	[kW/m ²]

Por otra parte, cuando los receptores se encuentren inmersos en el incendio, los mecanismos de transferencia de calor que intervienen son la convección y la radiación, por lo tanto:

$$Q = q_c + q_r$$

donde:

Q	Radiación incidente sobre el receptor	[kW/m ²]
q_c	Calor por convección	[kW/m ²]
q_r	Calor por radiación	[kW/m ²]

El calor por convección se calcula partiendo de la expresión:

$$q_c = h(\Delta T + T_0 - T_s) \quad 3.56$$

donde:

ΔT	Incremento de la temperatura en el eje de la flama para la altura sobre el nivel del líquido, z, a la que se encuentre el objeto considerado.	[K]
T_0	Temperatura inicial del objeto considerado	[K]
T_s	Temperatura del objeto en cualquier instante	[K]
h	Coficiente de transferencia de calor por convección	[W/m ² K]

Factor de vista para incendios de charco

En el caso de un incendio de charco, la figura geométrica que mejor representa el sistema de flamas del emisor es un cilindro, esto siempre y cuando no exista viento que modifique la geometría del fuego.

Para un receptor que se encuentra a nivel de piso, es decir en un mismo plano con el charco, y cuya normal a su superficie sea un eje paralelo al eje del cilindro, entonces el factor de vista (F) está dado por la ecuación 3.57.

Para superficies horizontales, es decir $\theta=90^\circ$:

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left[\tan^{-1} \left\{ \left(\frac{X_r+1}{X_r-1} \right)^{1/2} \right\} - \frac{X_r^2-1+h_r^2}{\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{(X_r-1)A}{(X_r+1)B} \right)^{1/2} \right\} \right] \quad 3.57$$

donde:

$$h_r = \frac{h}{r}$$

$$X_r = \frac{X}{r}$$

$$A = (Xr + 1)^2 + h_r^2$$

$$B = (Xr - 1)^2 + h_r^2$$

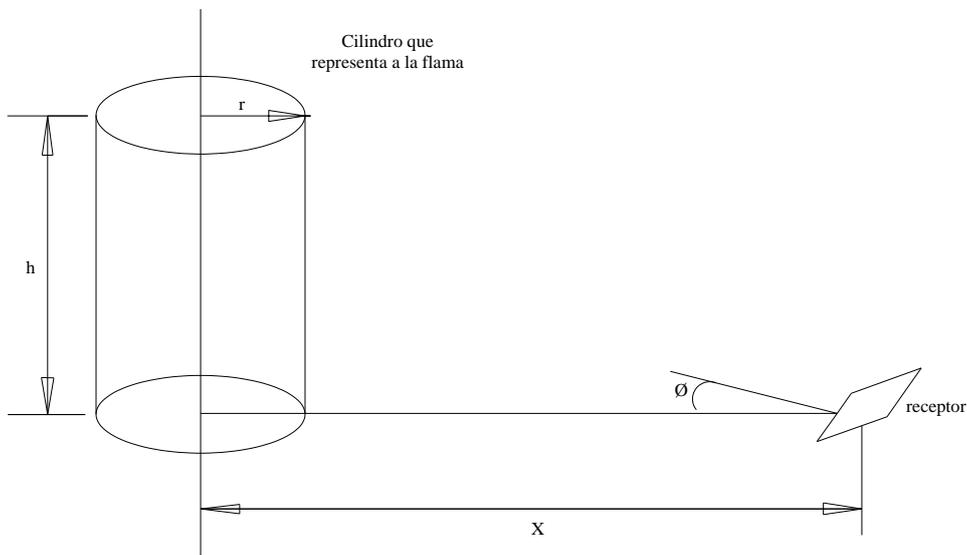


Fig. 3.7. Factor de vista para un incendio de charco

Para superficies verticales, es decir $\theta = 0^\circ$:

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{X_f} \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{h_r^2}{X_r^2 - 1} \right)^{1/2} \right\} + \frac{h_r(A - 2X_r)}{X_r \sqrt{AB}} \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{(X_r - 1)A}{(X_r + 1)B} \right)^{1/2} \right\} - \frac{h_r}{X_r} \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{(X_r - 1)}{(X_r + 1)} \right)^{1/2} \right\} \right]$$

3.58

donde:

$$h_r = \frac{h}{r}$$

$$X_r = \frac{X}{r}$$

$$A = (Xr + 1)^2 + h_r^2$$

$$B = (Xr - 1)^2 + h_r^2$$

El factor de vista máximo está dado por la raíz de la suma de los cuadrados de los factores de vista, tanto vertical como horizontal:

$$F_{max} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2} \quad 3.59$$

Los factores de vista generados por las ecuaciones anteriores están desarrollados en la gráfica de la figura 3.8, misma que muestra el comportamiento del valor del factor de vista al variar tanto la relación geométrica del cilindro (h/r), como el valor de la relación entre la distancia y el radio del cilindro (x/r)

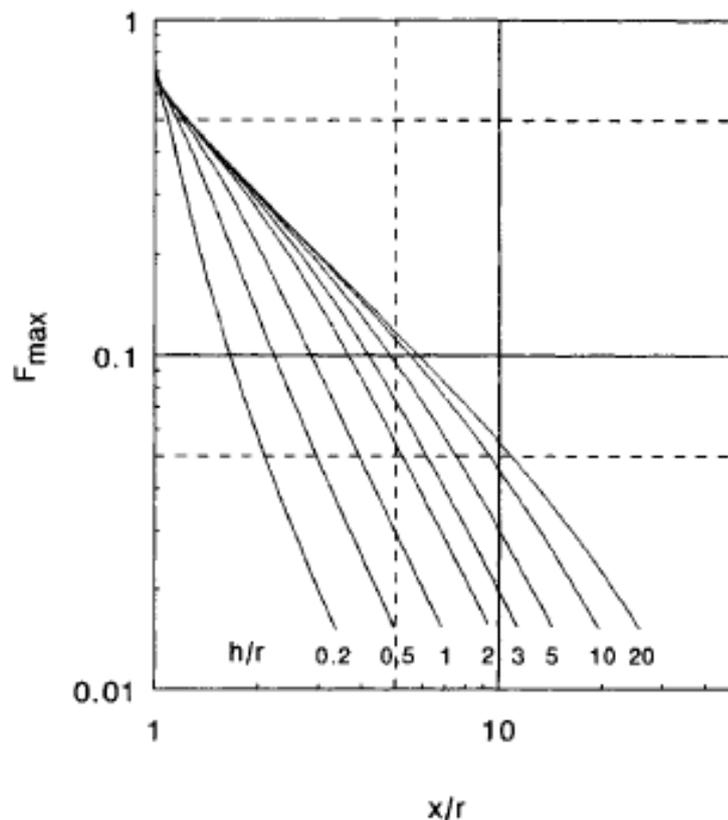


Fig. 3.8. Factor de vista para un incendio de charco

3.6. DARDO DE FUEGO

Este tipo de incendio, también llamado jetfire, incendio de chorro o flamajet, se produce cuando existe la ignición de vapores o gases inflamables liberados de su contenedor y estos están sometidos a presión. Dada la alta velocidad de salida, provocada por las altas presiones en el interior del contenedor, la flama resultante es de forma alargada.

En ocasiones estos incendios son intencionales, se utilizan para disponer los gases no deseados que se generan durante la extracción del petróleo (quemadores) o en refinerías y petroquímicas para evacuar subproductos no deseados o gases emitidos a través de válvulas de seguridad.

Los dardos de fuego creados de forma intencional, salen a través de una válvula y esto permite que el gas pueda alcanzar velocidades de salida supersónicas. En el caso de los chorros accidentales, el gas sale a través de un orificio de un depósito, de una tubería rota o de una brida, y esto hace que la velocidad máxima de salida del gas sea la sónica (velocidad del sonido en el gas, en las condiciones en las que se encuentra el gas a la salida).

La principal consecuencia provocada por un dardo de fuego es la radiación térmica. Para determinar los efectos físicos, es necesario determinar la geometría del incendio.

Más adelante en este texto se describirá que un dardo de fuego se adecúa a la geometría de un cono trunco.

Un dardo de fuego puede provocar daño en estructuras en la vecindad de la liberación por lo que es importante determinar los efectos físicos críticos por medio de un análisis de riesgo.

3.6.1. MODELOS PARA LA GEOMETRÍA

Para definir la geometría de este incendio es necesario definir las condiciones del viento, es decir, cuándo se cuenta o no con su presencia.

- a) Sin la acción del viento

En ausencia del viento, es útil el modelo de Hawthorn et al. Este modelo (aplicable únicamente para velocidades de salida sónicas) permite determinar la longitud efectiva de la llama turbulenta, $L-s$.

s es la distancia entre el orificio de salida y el punto donde empieza la flama.

El motivo por el que se produce esta separación es que la combustión sólo puede tener lugar cuando la velocidad del gas se ha reducido hasta el punto en el que la combustión es estable.

$$\frac{L-s}{D_e} = \frac{5.3}{C_t} \left[\frac{T_{ad}}{\alpha T_v} \left[C_t + (1 - C_t) \frac{M_0}{M_f} \right] \right]^{1/2} \quad 3.60$$

donde:

L	Distancia entre la salida del gas y el final de la flama	[m]
s	Distancia entre la salida del gas y el inicio de la flama	[m]
D_e	Diámetro del orificio de salida del gas	[m]
C_t	Relación entre moles de combustible y reactivos	[-]
T_{ad}	Temperatura adiabática de la flama	[K]
α	Relación entre moles de reactivos y productos	[-]
T_v	Temperatura del combustible antes de la liberación	[K]
M₀	Masa molecular del aire	[kg/kmol]
M_f	Masa molecular del combustible	[kg/kmol]

Dado que en general para los combustibles más comunes el valor de $C_t \ll 1$ y α tiende a 1 y la relación T_{ad}/T_v varía entre los valores de 7 a 9, la ecuación anterior puede simplificarse así:

$$\frac{L-s}{D_e} = \frac{15}{C_t} \left[\frac{M_0}{M_f} \right]^{1/2}$$

La tabla 3.2 muestra algunos de los valores de la ecuación anterior para los combustibles más comunes.

Tabla 3.2. Valores de variables del modelo de Hawthorn et al

Combustible	α	C_t	T_{ad}/T_f
Metano	1.00	0.091	7.4
Etano	1.04	0.054	9
Propano	0.96	0.038	7.6

El valor de la distancia entre el orificio de salida y el inicio de la flama (s) puede obtenerse mediante la ecuación 3.61.

$$S = \frac{6.4\pi D_e U_e}{4 U_a} \quad 3.61$$

donde:

D_e	Diámetro del orificio de salida del gas	[m]
U_e	Velocidad de salida de combustible en un chorro	[m/s]
U_a	Velocidad media del dardo de fuego	[m/s]

Experimentos indican que la relación U_a/U_e se aproxima al valor de 0.4.

Respecto al diámetro del chorro, este se puede aproximar mediante la ecuación 3.62.

$$D_j = 0.29x \left[\ln \left(\frac{L}{x} \right) \right]^{1/2} \quad 3.62$$

donde:

D_j	Diámetro del dardo de fuego	[m]
L	Distancia entre la salida del gas y el final de la flama	[m]
x	Distancia entre el eje de la flama y el receptor	[m]

b) Considerando el efecto del viento

Los incendios de chorro de gas se producen normalmente al aire libre, lo que supone que pueden verse afectados por el viento. Para esta circunstancia hay diversos métodos. En este apartado se describe el modelo matemático de Kalghatgi, que está diseñado para ser aplicado conjuntamente con el modelo de la flama sólida.

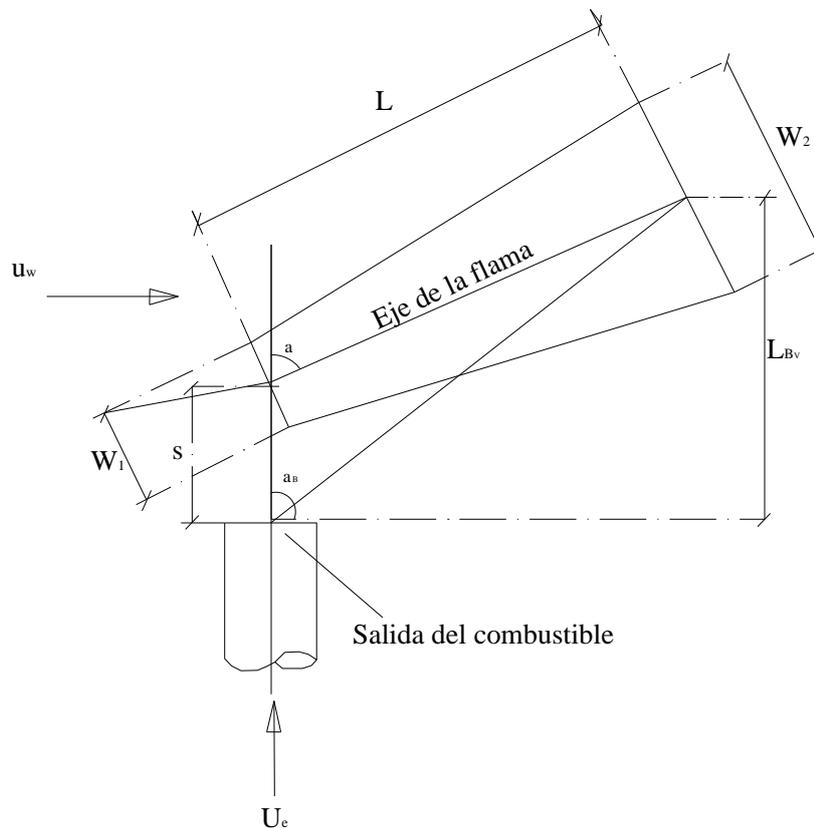


Fig. 3.9. Esquema de la geometría de la flama de un dardo de fuego

Según el método de Kalghatgi, la flama del dardo se puede asimilar a un cono (figura 3.9). Siguiendo la nomenclatura de la figura 1.8, la inclinación de la flama se calcula mediante la expresión 3.63.

$$\alpha_B = 94 - \frac{1.6}{N} - 35N \quad 3.63$$

2011

donde:

$$\alpha = 94 - \frac{1.1}{N} - 30N$$

$$N = \frac{u_w}{U_e}$$

donde:

u_w	Velocidad del viento	[m/s]
U_e	Velocidad de salida de combustible en un chorro	[m/s]

La velocidad de salida del chorro se calcula mediante la ecuación 3.64.

$$U_e = M_{ef} \sqrt{\frac{\gamma R' T_v}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{ef}^2\right)}} \quad 3.64$$

donde:

M_{ef}	Número de match efectivo	[-]
R'	Constante individual del gas. Se calcula dividiendo la constante de los gases (8.314kJ/kmol*K) por la masa molecular del gas	[kJ/kg*K]
T_v	Temperatura del combustible antes de la liberación	[K]

El número de match efectivo se calcula mediante la ecuación 3.65.

$$M_{ef} = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1 \left(\left(\frac{P_v}{P_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}} \quad 3.65$$

2011

donde:

Pv	Presión del gas antes del escape	[bar]
Pa	Presión atmosférica	[bar]
γ	Coefficiente isoentrópico (Cp/Cv)	[-]

La altura de la flama puede calcularse con la ecuación 3.66.

$$\frac{L_{Bv}}{D_s} = 6 + \frac{2.35}{N} + 20N \quad 3.66$$

donde:

L_{Bv}	Altura del extremo del dardo de fuego	[m]
D_s	Diámetro de la fuente de combustión	[m]

El ancho de la base, W₁:

$$\frac{W_1}{D_s} = 49 - \frac{0.22}{N} - 380N + 950N^2 \quad 3.67$$

donde:

W₁	Diámetro al inicio de la flama	[m]
D_s	Diámetro de la fuente de combustión	[m]

El tamaño del extremo superior se deduce de la ecuación 3.68.

$$\frac{W_2}{D_s} = 80 - \frac{0.57}{N} - 570N + 1470N^2 \quad 3.68$$

2011

donde:

W₂	Diámetro al final de la flama	[m]
D_s	Diámetro a la salida del chorro	[m]

donde:

$$D_s = D_e \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_0}} \quad 3.69$$

donde:

D_e	Diámetro del orificio de salida del gas	[m]
ρ_j	Densidad del combustible en el dardo	[kg/m³]
ρ₀	Densidad del aire ambiente = (352.17/T₀)	[kg/m³]

La densidad del combustible en el dardo se calcula mediante la expresión 3.70.

$$\rho_j = \frac{P_0 M_f}{R_0 T_v} \left(\frac{P_v}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad 3.70$$

donde:

ρ_j	Densidad del combustible en el dardo	[kg/m³]
p₀	Presión ambiente	[bar]
M_f	Masa molecular del combustible	[kg/kmol]
R₀	Constante universal de los gases (8.314)	[kJ/kmol K]
T_v	Temperatura del combustible antes de la liberación	[K]
P_v	Presión del gas antes del escape	[bar]
γ	Coeficiente isoentrópico (Cp/Cv)	[-]

La distancia de la flama se obtiene de la ecuación 3.71.

$$L = \frac{L_{Bv} \text{sen} \alpha_B}{\text{sen}(90-\alpha_B) \text{sen}(180-\alpha)} \quad 3.71$$

2011

donde:

L_{Bv} **Altura del extremo del dardo de fuego** **[m]**

La distancia vertical entre el inicio de la flama y la salida del quemador se calcula con la ecuación 3.72.

$$s^2 = L^2 + L_B^2 - 2L * L_B * \cos(\alpha - \alpha_B) \quad 3.72$$

donde:

$$L_B = \frac{L_{Bv}}{\text{sen}(90-\alpha_B)} \quad 3.73$$

3.6.2. MODELOS PARA LA RADIACIÓN

El método para establecer la geometría del incendio de chorro (método de Kalghatgi) descrito en el apartado anterior, define ésta como un cono trunco. Es factible la aplicación del método de la flama sólida simulando que el emisor tiene la forma de un cilindro, tal como en el caso de un incendio de charco. Para ello es necesaria la transformación de la superficie cónica a una cilíndrica determinando un diámetro equivalente, manteniendo el valor de la longitud del incendio.

De este modo el diámetro del cilindro equivalente es:

$$D_{eq} = \sqrt{L^2 + 2A - L}$$

donde:

L =Distancia de la flama **[m]**

$$A = \frac{1}{4}(W_1^2 + W_2^2) + \frac{1}{2}(W_1 + W_2)\sqrt{L^2 + \left(\frac{W_2 - W_1}{2}\right)^2} \quad 3.74$$

Dado que la metodología para determinar la radiación incidente en un objeto será la misma que la que se aplica en un incendio de charco, los modelos matemáticos a utilizar serán los mismos. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que, dado que las formas son distintas, se tendrán distintos valores de los factores de vista y del poder emisor.

La ecuación para determinar el poder emisor de un incendio de chorro es la 3.75.

$$E_p = \frac{f_R \dot{m}_f \Delta H_c}{A_f} \quad 3.75$$

donde:

E_p	Poder emisor del chorro	[kW/m²]
f_R	Fracción de energía liberada en forma de radiación	[-]
\dot{m}_f	Velocidad de combustión	[kg/s]
ΔH_c	Calor de combustión	[J/kg]
A_f	Área del cono	[m²]

El área del cono se obtiene de la expresión 3.76.

$$A_f = \frac{\pi}{4}(W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2}(W_1 + W_2)\sqrt{L^2 + \left(\frac{W_2 - W_1}{2}\right)^2} \quad 3.76$$

La fracción de la energía emitida en forma de radiación se obtiene de la ecuación 3.77.

$$f_r = 0.21e^{-0.00323U_a} + 0.11 \quad 3.77$$

donde:

f_r	Fracción de energía liberada en forma de radiación	[-]
U_a	Velocidad media del chorro	[m/s]

En el caso del factor de vista, será necesario aplicar las mismas ecuaciones que las aplicadas en un incendio de charco inclinado, siempre y cuando se haga la transformación de la geometría del cilindro al cono.

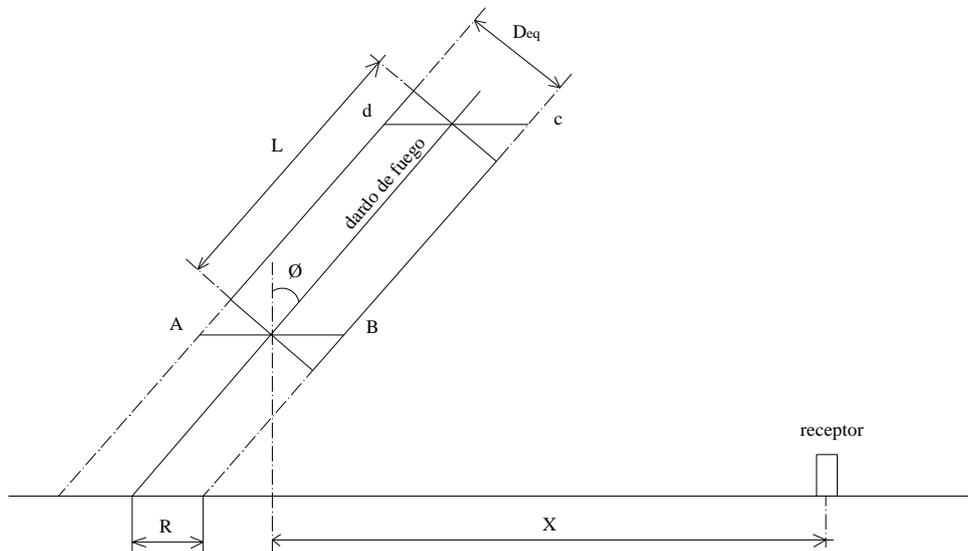
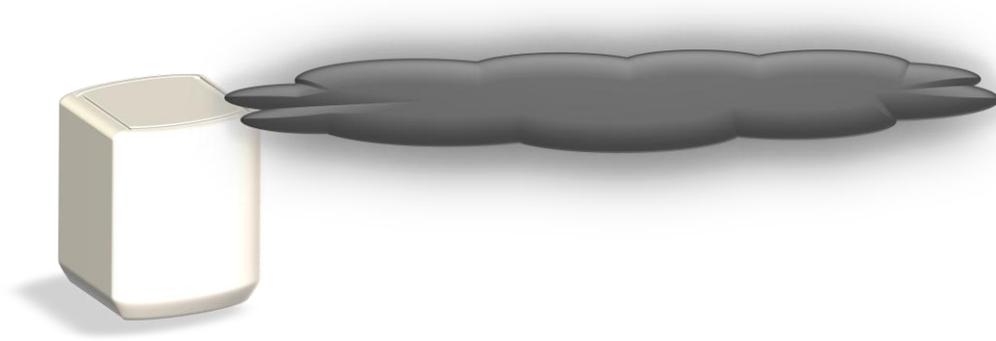


Fig. 3.9. Factor de vista para un dardo de fuego

Dado que el dardo de fuego no suele estar a nivel de piso, caso contrario al de los objetos receptores, es necesario obtener el factor de vista mediante la diferencia entre los obtenidos por dos cilindros que comparten la misma base pero difieren en altura, de la forma:

$$F = F_{e-f-c-d} - F_{e-f-B-A}$$

Una vez determinado el poder emisor, la atenuación debida a las condiciones atmosféricas y el factor de vista, es posible determinar la radiación generada por el incendio.



4. DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

El análisis del fenómeno de liberaciones accidentales es ampliamente usado en la generación de planes de respuesta ante emergencias y es parte del análisis de los procesos. Las sustancias peligrosas que son liberadas a la atmósfera serán transportadas y al mismo tiempo diluidas por el aire.

En este apartado se presentan los modelos matemáticos más importantes, mismos que son capaces de simular la dilución y el transporte de sustancias suspendidas en la atmósfera.

Dado el fenómeno de dilución, la concentración en un punto, principalmente está en función de la localización y del tiempo transcurrido, entre otras variables.

Los efectos físicos provocados por la liberación de sustancias están dados por la cantidad de sustancia presente en el punto de interés por unidad de volumen, es decir, la concentración en ese lugar.

4.1. TURBULENCIA ATMOSFÉRICA Y DISPERSIÓN

La turbulencia se encuentra presente en la capa atmosférica llamada capa de mezcla. Dicha capa es la más próxima a la superficie de la tierra y en ella se liberan la mayoría de las sustancias peligrosas producto de la actividad humana.

La turbulencia es favorable para la dispersión de los contaminantes, en virtud de que aumenta la tasa de entrada de aire a las mezclas disminuyendo rápidamente las concentraciones. Inclusive para condiciones de viento en calma la turbulencia está presente debido a los cambios de temperatura en la atmósfera que provocan movimientos de aire.

La turbulencia es generada por dos vías, en primer lugar la superficie rugosa de la tierra disminuye la velocidad del viento rasante provocando una inestabilidad en la corriente que conlleva a un descenso del aire más alto para compensar la inercia, esto provoca movimientos adicionales verticales que crean turbulencia. Además, los cambios de temperatura provocados por la radiación solar sobre la superficie calientan las capas de aire más cercanas a la tierra provocando su ascenso, esto conlleva movimientos, y por ende, turbulencia.

Un aspecto importante en la turbulencia atmosférica es el rango de tamaños de los torbellinos, mismos que miden desde cientos de metros hasta milímetros. Cada tamaño provoca un tipo de efecto en una pluma, por ejemplo, un torbellino más pequeño que la altura de la pluma provocará una dispersión y aumento de tamaño de la nube, un torbellino más grande que la nube, hará que la nube suba y baje acorde a éste sin cambiar de tamaño o forma.

4.2. ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

Cuando un gas se eleva se expandirá en la medida que disminuya la presión, así mismo, la temperatura del gas irá disminuyendo. La temperatura que se adquiere adiabáticamente al bajar el cúmulo de gas se le conoce como temperatura potencial. Cuando la temperatura del gas es la misma que la de los alrededores a cualquier altura se genera una estabilidad atmosférica neutral.

Al cambio de temperatura por unidad de longitud de elevación se le conoce como gradiente de temperatura.

Cuando un gas perfecto se almacena en un contenedor adiabático y este se eleva y se baja, entonces el gradiente de temperatura que experimentará el gas en su interior será de 1°C por cada 100m. A este gradiente se le conoce como el gradiente adiabático seco. Cuando el gradiente de temperatura es mayor que el gradiente adiabático seco, entonces suceden fenómenos de turbulencia. En el caso de que el gradiente de temperatura sea menor al adiabático seco, cuando el gas perfecto sube, su temperatura estará por encima de la temperatura del exterior, lo que conlleva a que el gas tienda a subir con cada vez más fuerza. En cambio si el gradiente de temperatura en la atmósfera es mayor que el adiabático seco, entonces cuando el gas suba, tendrá una temperatura menor que la del exterior, hecho que provoca que el gas ya no suba más y se genere una pluma alineada.

La figura 4.1 muestra los tipos de gradientes en función de las condiciones atmosféricas y su clasificación cualitativa.

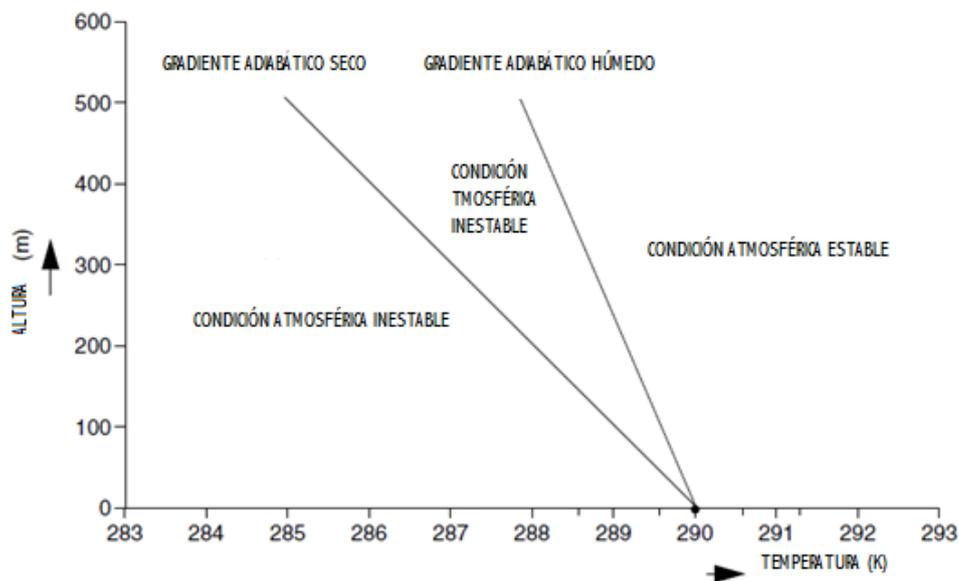


Fig. 4.1. Condiciones atmosféricas en función del gradiente de temperatura

La estabilidad atmosférica es una variable que se establece para caracterizar la capacidad que posee la atmósfera para dispersar un contaminante; en realidad

lo que representa es el grado de turbulencia existente en un momento determinado en función de las condiciones atmosféricas presentes.

Existen dos metodologías para establecer la estabilidad atmosférica. La primera se rige por el cociente de la turbulencia generada por el gradiente de temperatura y la turbulencia generada por la fricción del viento con el suelo. Este cociente es expresado en términos de una longitud escalada llamada “*Longitud Monin Obukhov*” definida por la siguiente ecuación:

$$L = - \frac{\rho_a C_p T_a u_*^3}{\kappa g H_0} \quad 4.1$$

donde:

u_*^3	Raíz cuadrada del esfuerzo cortante entre la densidad del aire en la superficie
H_0	Flujo de calor sensible
ρ_a	Densidad del aire
C_p	Calor específico del aire
T	Temperatura del aire
κ	Constante Von Karman = 0.4
g	Aceleración de la gravedad

La *longitud Monin Obukhov* (L) es una medida de la estabilidad de la capa de mezcla. Se puede interpretar como la altura sobre el piso en donde la turbulencia provocada por el cortante de fricción iguala a la turbulencia provocada por el flujo de calor. En condiciones inestables no existe equilibrio y la (L) resulta negativa. Se pueden presentar los siguientes tres casos:

$L > 0$;	Atmósfera estable
$L < 0$;	Atmósfera inestable
$L = \infty$	Atmósfera neutral

Tabla 4.1. Clasificación de estabilidad atmosférica en función de la Longitud de Monin Obukhov

Longitud Monin Obukhov	Condición de estabilidad atmosférica	
Ligeramente negativa	$-100\text{m} < L < 0$	Muy inestable
Muy negativa	$-10^5\text{ m} \leq L \leq -100\text{m}$	Inestable
Extremadamente negativa o positiva	$ L > 10^5\text{ m}$	Neutral
Muy positiva	$10\text{ m} \leq L \leq 10^5$	Estable
Ligeramente positiva	$0 < L < 10\text{ m}$	Muy estable

Una metodología alternativa utilizada para caracterizar la estabilidad atmosférica es la clasificación de estabilidad atmosférica de Pasquill. Esta metodología utiliza categorías de la A a la G, en donde la A significa una atmósfera muy inestable y la G, muy poco utilizada, indica una atmósfera muy estable.

Tabla 4.2. Clasificación de estabilidad de Pasquill

Tipo de estabilidad	Definición
A	Muy inestable
B	Inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Ligeramente estable
F	Estable
G	Muy estable

La estabilidad atmosférica se estima en función de la velocidad del viento y, en el caso del día, de la radiación solar incidente que está en función del ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre la superficie del suelo y, en el caso de la noche, de la cantidad de nubes presentes en ese momento.

Existen diversos métodos para estimar la clase de estabilidad atmosférica de Pasquill a partir de variables meteorológicas comunes:

- Según el gradiente térmico tabla 4.3
- Según la fluctuación de la dirección del viento tabla 4.4
- Según la radiación solar y la velocidad del viento tabla 4.5

Es importante mencionar que todas estas estimaciones son para atmósferas sobre superficie en plataforma continental y no funcionan en mezclas sobre el mar.

Tabla 4.3. Clase de estabilidad atmosférica en función del gradiente de temperatura

Clase de estabilidad	Gradiente térmico vertical (°C/100m)
A	Menos de -1.9
B	De -1.9 a -1.7
C	De -1.7 a -1,5
D	De -1.5 a -0.5
E	De -0.5 a 1.5
F	Más de 1.5

Tabla 4.4 Clasificación de la estabilidad atmosférica en función de la variación horizontal de la dirección del viento

Clase de estabilidad	Variación en grados de la dirección del viento
A	25
B	20
C	15
D	10
E	5
F	2.5

Tabla 4.5 Clasificación de la estabilidad atmosférica en función de la insolación y de la nubosidad

Velocidad del viento en la superficie (m/s)	Día			Noche	
	Nivel de radiación solar			Cobertura de nubes en el cielo	
	Elevado	Moderado	Bajo	Más del 50%	Menos del 50%
<2	A	A-B	B	E	F
2 – 3	A-B	B	C	E	F
3 – 5	B	B	C	E	F
5 – 6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

En el uso de la tabla anterior es importante considerar que el término *noche* se refiere al período del día que inicia una hora antes de la puesta de sol y hasta una hora después de la salida. En el caso de la cobertura del cielo, esta se refiere al fragmento del cielo situado por encima del horizonte local aparente que está cubierto de nubes. Independientemente de la velocidad del viento y de la radiación solar incidente, se considerará como estabilidad atmosférica D cuando el cielo se encuentre completamente cubierto de nubes.

Tabla 4.6. Clasificación de la insolación en función de la radiación

Clasificación de la insolación	Nivel de radiación cal/h/m ²
Elevada	> 50
Moderada	50 – 25
Baja	< 25

Tabla 4.7. Clasificación de la insolación en función del ángulo del sol

Clasificación de la insolación	Ángulo del sol °
Elevada	> 60
Moderada	35 – 60
Baja	< 35

4.3. ELEVACIÓN DE CHORRO DE GAS

Los gases que por estar sometidos a altas presiones al ser liberados lo hacen a altas velocidades, forman chorros de gas. Así como largo es el chorro formado, así será la velocidad en su interior con referencia a la velocidad del viento. La velocidad del chorro provoca cierta turbulencia, misma que aumenta el diámetro del mismo. La velocidad del chorro va disminuyendo en función inversa a la distancia a la fuente, hasta que la velocidad es tan pequeña, que la nube formada se dispersa de forma pasiva.

4.4. ELEVACIÓN DE LA NUBE

Otro fenómeno a considerar en la predicción de la evolución de la dispersión es el análisis de los fenómenos que hacen que la sustancia se mueva verticalmente.

El material liberado a la atmósfera se puede elevar debido a que:

- a) el material es menos denso que el aire que lo rodea o
- b) el material posee un impulso inicial que lo eleva.

Teóricamente un material menos denso que el aire se elevará infinitamente dentro de la atmósfera, sin embargo, debido a la mezcla con el aire por el fenómeno de la dispersión, se presenta en la nube un incremento en el volumen, hecho que provoca que la velocidad de ascenso disminuya rápidamente. Cuando el movimiento vertical se iguala al movimiento turbulento, entonces se dice que la pluma ha llegado a su altura final. Llegada esta circunstancia la dispersión que experimenta la nube es pasiva.

4.5. DISPERSIÓN PASIVA

La dispersión pasiva se presenta cuando la atmósfera que rodea al gas liberado no es afectada por el material suspendido, además las condiciones son estacionarias, es decir, se presenta la misma turbulencia en todos los puntos y la velocidad del viento es constante. Cuando esto sucede la pluma únicamente evoluciona en función de las condiciones atmosféricas, y se puede decir que la distribución de las concentraciones está acorde a una distribución gaussiana.

4.5.1. LA MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN PASIVA

La expresión básica de una pluma gaussiana para una liberación continua es:

$$C(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} * e^{\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]} * e^{\left[-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad 4.2.$$

donde:

- **q** Flujo másico de la sustancia de interés que emite la fuente [kg/s]
- $\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ Desviación estándar en las direcciones x, y y z [m]
- u_a Velocidad del viento a la altura del centro de la pluma [m/s]
- **h** Altura de la fuente [m]

La expresión equivalente para una liberación instantánea se escribe como:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} * e^{\left[-\frac{(x-u_a t)^2}{2\sigma_x^2}\right]} * e^{\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]} * e^{\left[-\frac{(h-z)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad 4.3$$

donde:

- Q** Flujo másico de la liberación instantánea [kg/s]
- $\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ Desviación estándar en las direcciones x, y y z [m]
- u_a Velocidad del viento a la altura del centro de la pluma [m/s]
- h** Altura de la fuente [m]

Si la pluma a analizar se encuentra cerca del suelo, o bien cerca de la capa de mezcla, entonces tendrán que considerarse más variables que se adicionan a las ecuaciones anteriores.

En muchas aplicaciones del modelo gaussiano se usa la velocidad del viento a la altura de la fuente.

Con respecto a las dispersiones en las tres dimensiones, se utilizan distintos criterios, dos de los cuales se explicarán a continuación.

El primer criterio se basa en la teoría estadística de la dispersión en una turbulencia homogénea. Esto conduce a expresiones en las cuales la propagación en cualquier dirección es proporcional a las fluctuaciones de la velocidad en la dirección de interés por una función del tiempo y de una variable escalada del tiempo de turbulencia T_L .

$$\sigma_x = \sigma_u f(t, t_L) \quad \sigma_y = \sigma_v f(t, t_L) \quad \sigma_z = \sigma_w f(t, t_L)$$

El otro criterio se basa en ajustarse a datos experimentales sin consideraciones teóricas, esto conlleva a expresiones de la forma siguiente:

$$\sigma_x = f(x) \quad \sigma_y = f(x) \quad \sigma_z = f(x)$$

Estrictamente el modelo de la pluma gaussiana no puede utilizarse para la descripción de la dispersión pasiva en la capa superficial, ya que la variación vertical de la velocidad del viento y la intensidad de la turbulencia causan que la distribución de la concentración vertical se desvíe de la distribución normal. Con base en la similitud y concepto de la difusión Eddy-difusivity existe la posibilidad de encontrar aproximaciones de la distribución vertical.

Existe poca información para la determinación del parámetro σ_x . Para liberaciones instantáneas. No solo la turbulencia en la dirección del viento incrementa el valor de σ_x , también lo aumenta la variación vertical de la velocidad del viento.

Los modelos principales para la modelación de dispersión pasiva son:

1. Modelo de Roberts
2. Modelo Sutton
3. Modelo de Pasquill
4. Modelo de Pasquill-Gifford

4.5.1.1. MODELO DE ROBERTS

O.F.T. Roberts dio solución a la ecuación fundamental de la difusión en el año de 1923, analizando el comportamiento del humo emitido por varios tipos de fuentes. El modelo presentado en este apartado se basa en dicho modelo y la modificación hecha por Sutton en 1953.

La ecuación fundamental en coordenadas cartesianas de la difusión de un gas se expresa así:

2011

$$\frac{d\chi}{dt} + u \frac{d\chi}{dx} + v \frac{d\chi}{dy} + w \frac{d\chi}{dz} = K_x \frac{d^2\chi}{dx^2} + K_y \frac{d^2\chi}{dy^2} + K_z \frac{d^2\chi}{dz^2} \quad 4.4$$

Donde x , y y z son las coordenadas rectangulares del receptor, K_x , K_y , K_z , son los coeficientes de difusión en las direcciones x , y y z respectivamente, t es el tiempo en segundos, u , v y w son las velocidades en las direcciones x , y y z , respectivamente y χ es la concentración en el punto del receptor.

Haciendo la suposición de que la velocidad del viento en las direcciones y y z valen cero, entonces los coeficientes de difusión K_x , K_y , K_z , tendrán el mismo valor "K". Así la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$\frac{d\chi}{dt} + u \frac{d\chi}{dx} = K \left(\frac{d^2\chi}{dx^2} + \frac{d^2\chi}{dy^2} + \frac{d^2\chi}{dz^2} \right) \quad 4.5$$

En el caso de que la velocidad en la dirección del viento también sea cero, entonces la ecuación anterior se reduce a lo siguiente:

$$\frac{d\chi}{dt} = K \left(\frac{d^2\chi}{dx^2} + \frac{d^2\chi}{dy^2} + \frac{d^2\chi}{dz^2} \right) \quad 4.6$$

En coordenadas esféricas la ecuación se escribe como:

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{Kd}{r^2 dr} \left(r^2 \frac{d\chi}{dr} \right) \quad 4.7$$

Con $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$

Para dispersión de una fuente instantánea en condiciones de viento en calma, la ecuación anterior es aplicable. Al resolver la ecuación diferencial, tomando como límites de integración que la concentración tiende a cero cuando el tiempo tiende a cero y que cuando el tiempo tiende a infinito la concentración

2011

también tiende a cero, además la condición de continuidad es igual a la tasa de emisión de la fuente, entonces la ecuación queda:

$$\chi(r, t) = \frac{Q}{8(\pi Kt)^{3/2}} e^{\left(-\frac{r^2}{4Kt}\right)} \quad 4.8$$

Y en coordenadas rectangulares:

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{Q}{8(\pi Kt)^{3/2}} e^{\left(-\frac{x^2+y^2+z^2}{4Kt}\right)} \quad 4.9$$

Para una dispersión con una liberación continua, la ecuación anterior puede integrarse con respecto al tiempo obteniendo la ecuación 4.10.

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{Q}{4\pi K(x^2+y^2+z^2)^{1/2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{2(Kt)^{1/2}}\right) \quad 4.10$$

Donde *erf* es la función error y Q es la tasa de liberación de masa continua en kg/s. En el estado estacionario la ecuación anterior cambia a:

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi K(x^2+y^2+z^2)^{1/2}} \quad 4.11$$

La ecuación también puede aplicarse a una fuente continua con una velocidad del viento en la dirección x modificando la ecuación.

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi K(x^2+y^2+z^2)^{1/2}} e^{\left(-\frac{u}{2K}[(x^2+y^2+z^2)^{1/2}-x]\right)} \quad 4.12$$

2011

Si el punto considerado de análisis está lo suficientemente alejado, tal que:

$$\frac{y^2 + z^2}{x^2} \ll 1$$

Entonces para toda situación de viento más ligero, la ecuación de concentración queda de la siguiente forma:

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi Kx} * e\left(-\frac{u}{4Kx}[y^2+z^2]\right) \quad 4.13$$

4.5.1.2. MODELO DE SUTTON

Uno de los modelos para la determinación de las concentraciones en una liberación a la atmósfera es la que dicta el modelo de Sutton creado en 1953. Dicha ecuación es la mostrada a continuación:

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{2Q^*}{\pi^{3/2} C_x C_y C_z (ut)^{3/2(2-n)}} * e\left[-(ut)^{n-2} \left(\frac{x^2}{C_x^2} + \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2}\right)\right] \quad 4.14$$

Donde C_x , C_y y C_z son los parámetros de difusión en los tres ejes, n es el índice de difusión y x , y e z son las coordenadas desde el origen que se mueve con el viento a una velocidad promedio (u).

La ecuación aplicada a una fuente continua situada a nivel de piso, queda de la siguiente manera:

$$\chi(x, y, z) = \frac{2Q}{\pi C_y C_z u x^{2-n}} * e\left[-x^{n-2} \left(\frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2}\right)\right] \quad 4.15$$

Si la fuente no se encuentra a nivel de piso, entonces la configuración del modelo se establece de la siguiente forma:

$$\chi(x, y, z) = \frac{2Q}{\pi C_y C_z (ux)^{(2-n)}} * e^{\left[-(x)^{n-2} \left(\frac{y^2}{c_y^2} \right) \right]} \left\{ e^{\left[-(x)^{n-2} \left(\frac{(z-H)^2}{c_z^2} \right) \right]} + e^{\left[-(x)^{n-2} \left(\frac{(z+H)^2}{c_z^2} \right) \right]} \right\} \quad 4.16$$

Donde H es la altura de la fuente en metros. El índice n está en función de la estabilidad atmosférica, sus límites son 0 cuando existe una alta turbulencia y 1 cuando la turbulencia es nula o muy baja. En condiciones promedio el valor de n es de 1/4. En la tabla 4.8 se muestran valores de las constantes.

Tabla 4.8. Parámetros meteorológicos para el modelo de Sutton

Altura de la fuente [m]	n	C _y	C _z
0	0.25	0.21	0.12
10	0.25	0.21	0.12
25	0.25	0.12	0.12
30	0.25	0.10	0.10
75	0.25	0.09	0.09
100	0.25	0.07	0.07

4.5.1.3. MODELO DE PASQUILL

El modelo de Pasquill está basado en la modificación del modelo de Sutton aplicado a una fuente puntual continua a nivel de piso.

$$C_0 = \frac{2.8 \times 10^{-3} Q}{udh\theta} \quad 4.17$$

donde:

C₀	Concentración a nivel de piso a lo largo del eje de la pluma	[kg/m³]
d	Distancia del receptor a la fuente	[m]
Q	Tasa de emisión	[kg/min]
u	Velocidad del viento promedio	[m/s]
θ	Dispersión lateral	[grados]

La ecuación planteada por Pasquill está basada en la ecuación de Sutton. Esta ecuación permite cambios relativamente lentos de la dirección del viento. Las dispersiones lateral y vertical definen una frontera, en la cual las concentraciones son una décima parte de la concentración a lo largo del eje o a nivel de piso, respectivamente.

Para la determinación de la dispersión lateral, Pasquill recomienda, solo si los datos adecuados están disponibles, las siguientes ecuaciones:

$$\theta = 4.3\sigma_{\theta} \quad 4.18$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_y}{x} \quad 4.19$$

Si los datos para la determinación de la desviación estándar en el eje Y no están disponibles, entonces tendrá que sugerirse el valor de θ mediante la aplicación de las siguientes reglas:

d = 100 m; θ = el valor de la diferencia entre el rastro máximo y mínimo sobre el período de liberación.

d = 100 km; θ = diferencia entre el promedio de dirección del viento en 15 minutos máximo y mínimo.

Para liberaciones de corta duración Pasquill aproximó el valor de θ . Dichos valores se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Valores de la variable teta para las clases de estabilidad atmosférica

Categoría de estabilidad atmosférica de Pasquill	Dispersión lateral teta en grados	
	d= 0.1km	d = 10 km
A	60	20
B	45	20
C	30	10
D	20	10
E	15	5
F	10	5

La dispersión vertical (h) es directamente proporcional a la distancia entre el receptor y el emisor, y crece a una tasa que depende del tamaño de la mezcla vertical. Por ejemplo, si existiese una capa de mezcla o algún mecanismo que limite los movimientos convectivos, entonces la altura de dicha capa es el valor de h. Al final la concentración entre la capa de mezcla y la que se presenta a nivel de suelo se homogenizan.

Para la determinación de la dispersión vertical Pasquill recomienda, si los datos adecuados están disponibles, utilizar la ecuación 4.20.

$$h = 2150d\sigma_{\phi} \quad 4.20$$

donde:

σ_{ϕ}	Desviación estándar de la inclinación del viento	[rad]
ϕ	Inclinación del viento	[rad]

Si los datos para utilizar la ecuación anterior no están disponibles, Pasquill recomienda utilizar las gráficas mostradas en la figura 4.2.

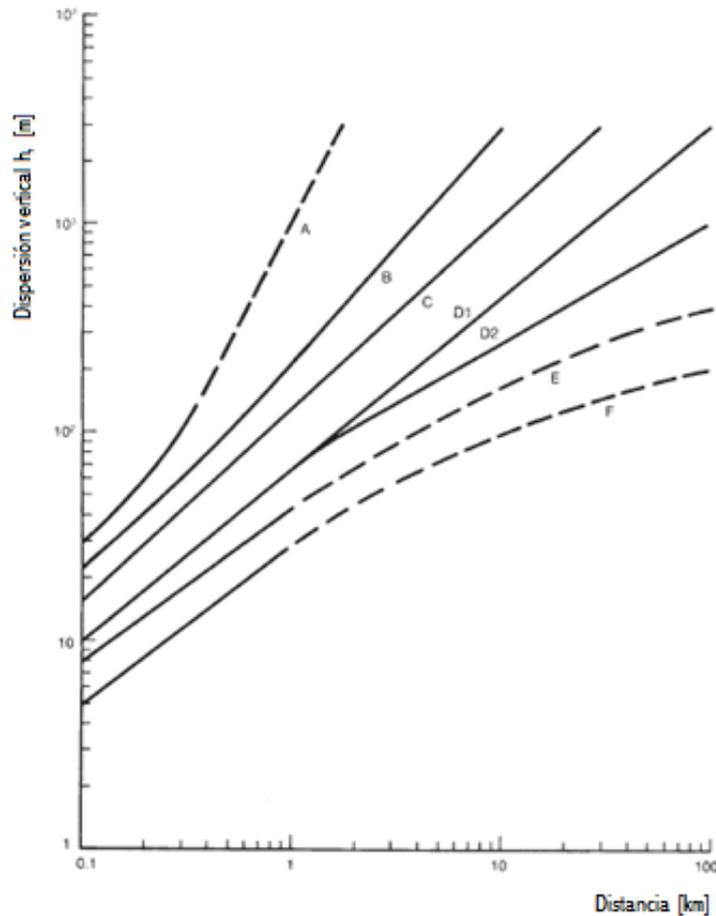


Fig. 4.2. Dispersión vertical en función de la distancia viento abajo

El uso de la gráfica de la figura 4.2 para la obtención de la dispersión vertical, está limitado para zonas urbanas abiertas.

En condiciones estables de una noche con vientos bajos, es decir, de menos de 2 m/s, y por lo tanto en condiciones propicias para la precipitación, la dispersión vertical puede ser incluso menor que la dada por la categoría de estabilidad atmosférica “F”.

En condiciones inestables, la dispersión vertical se puede estimar con el método ya descrito solo hasta alcanzar el valor de h' igual a la altura de convección estimada, el cual ocurre a una distancia d' . Bajo estas condiciones existe un perfil de concentración con una altura de dispersión limitante h' . Generalizando la regla se puede considerar que para una d' adicional, es decir a una distancia $2d'$ se desarrolla una concentración uniforme. A distancias de

2011

10 y 100 km, la velocidad y dirección del viento utilizadas son los promedios de los de la superficie y de los geostróficos modificando un retorno de 10°.

Para una fuente elevada, la ecuación de Pasquill se debe de modificar mediante el factor de corrección F_1 , dado por la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{2.8 \times 10^{-3} Q F_1}{u d h \theta} \quad 4.21$$

donde:

$$F_1 = e \left[-2.303 \left(\frac{H}{h} \right)^2 \right] \quad 4.22$$

donde:

C_c	Concentración a nivel de piso sobre el eje de la pluma	[masa/m ³]
H	Altura de la chimenea	[m]

Si el receptor se encuentra en un sitio diferente al eje de la pluma y se desea conocer la concentración, entonces se debe de multiplicar el resultado obtenido con la ecuación anterior por el factor de corrección F_2 que se obtiene de la siguiente forma:

$$F_2 = e \left[-2.303 \left(\frac{2\alpha}{\theta} \right)^2 \right]$$

Donde α es la desviación entre los ejes en grados. Entonces la ecuación de Pasquill resulta de la siguiente forma:

$$C = \frac{2.8 \times 10^{-3} Q F_1 F_2}{u d h \theta} \quad 4.23$$

Los valores de h y θ están en función de la distancia “ d ” a la cual se encuentra el receptor, por ello será necesario recalcularlos en función de la posición del mismo.

4.5.1.4. MODELO DE PASQUILL-GIFFORD

Pasquill presentó una forma alternativa del modelo de Sutton utilizando coeficientes de dispersión obtenidos por Gifford. Es por ello que el modelo presentado a continuación es llamado el modelo de Pasquill-Gifford. Para este modelo se utilizarán las relaciones desarrolladas por O.G. Sutton.

$$\sigma_x^2 = \frac{c^2}{2} (ut)^{2-n} \quad 4.24$$

Las desviaciones estándar o coeficientes de dispersión en los tres ejes en metros son expresiones similares aplicadas para σ_x , σ_y y σ_z , σ_y y σ_z .

La ecuación para una fuente puntual continua a nivel de piso queda de la siguiente forma:

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{2Q^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{\left[-1/2 \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)\right]} \quad 4.25$$

Donde las coordenadas x , y y z , son medidas desde el origen, mismo que se desplaza con la nube a la velocidad del viento. De forma alternativa si las coordenadas se mantienen en el lugar de la liberación, entonces la ecuación es:

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{\left[-1/2 \left(\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)\right]} \quad 4.26$$

La ecuación para una fuente continua a nivel de piso es:

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z} e^{\left[-1/2\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]} \quad 4.27$$

De la misma ecuación el modelo para determinar las concentraciones a lo largo del eje de la pluma a nivel de piso es el siguiente:

$$\chi(x, z) = \frac{2Q}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z u} e^{\left[-1/2\left(\frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]} \quad 4.28$$

Para una fuente continua elevada la ecuación es:

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{\left[-1/2\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right]} \left\{ e^{\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \right\} \quad 4.29$$

Donde h es el valor de la altura de la fuente.

La concentración obtenida con el modelo anterior solo es válida siempre y cuando se trate de una fuente continua, es decir, que la relación x/u siempre sea menor o igual que el tiempo de liberación.

Nuevamente los coeficientes de dispersión σ_x , σ_y y σ_z son constantes meteorológicas que tendrán distintos valores si la liberación es continua o instantánea. Valores de dichas constantes para una fuente continua se muestran en las siguientes figuras:

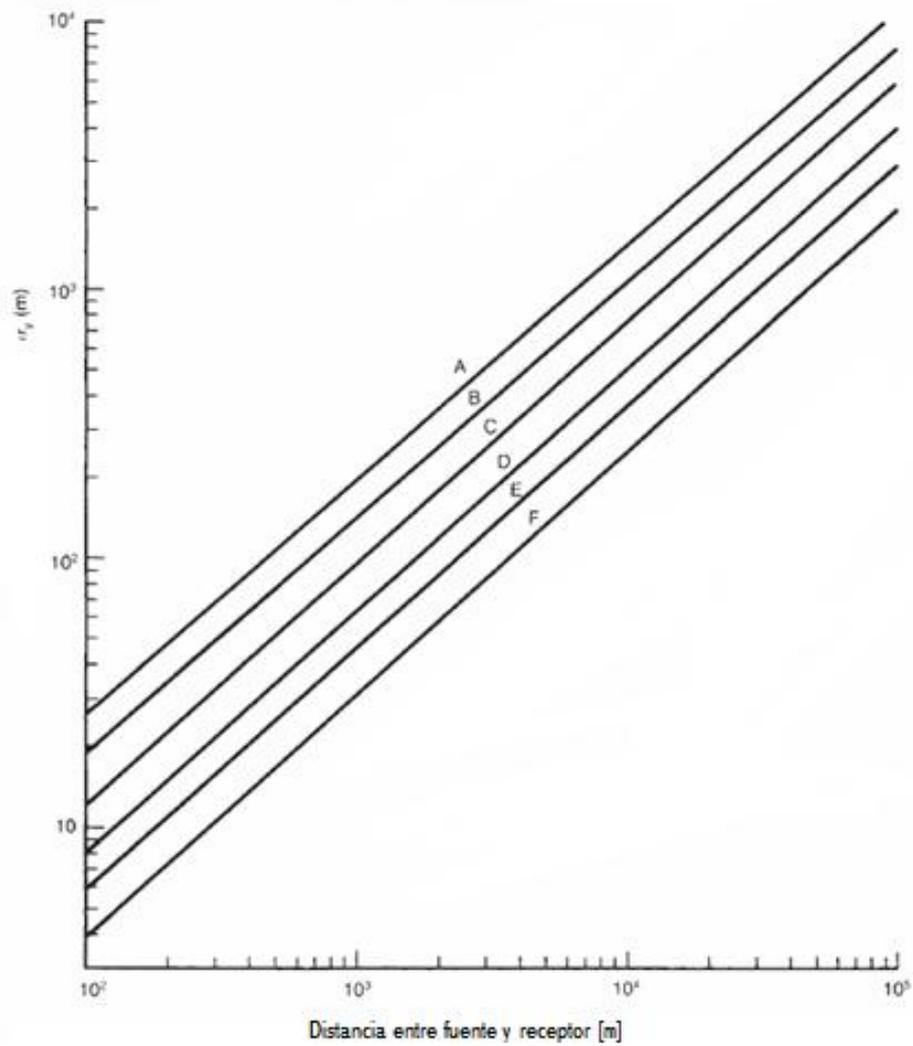


Fig. 4.3. Coeficiente de dispersión σ_y [m] en función de la distancia x

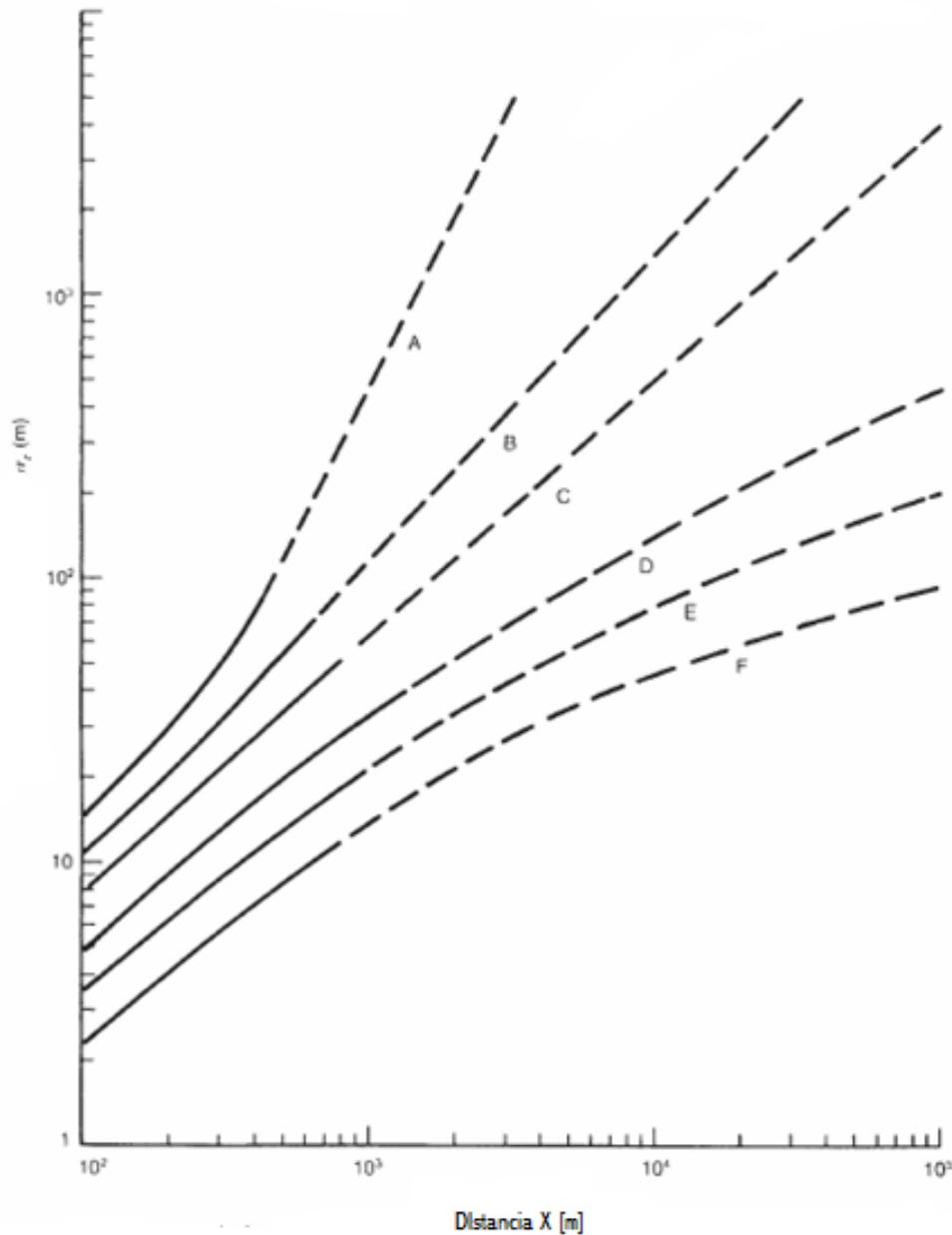


Fig. 4.4. Coeficiente de dispersión σ_z [m] en función de la distancia x

Los gráficos de las figuras 4.3 y 4.4 son la base para la creación de las ecuaciones mostradas en la tabla 4.10, misma que contiene las ecuaciones propias para la obtención de las variables meteorológicas, tanto instantáneas como continuas, en función de la clasificación de estabilidad atmosférica de Pasquill.

Tabla 4.10. Coeficientes de dispersión para el modelo de Pasquill-Gifford

Categoría de estabilidad atmosférica Pasquill	coeficientes de dispersión [m] Liberación continua	
	σ_y	σ_z (m)
A	$\sigma_y = 0.493x^{0.88}$	$\sigma_z = 0.087x^{1.10}$
B	$\sigma_y = 0.337x^{0.88}$	$\log_{10} \sigma_z = -1.67 + 0.902 \log_{10} x + 0.181 (\log_{10} x)^2$
C	$\sigma_y = 0.195x^{0.90}$	$\sigma_z = 0.0135x^{0.95}$
D	$\sigma_y = 0.128x^{0.90}$	$\log_{10} \sigma_z = -1.25 + 1.09 \log_{10} x + 0.0018 (\log_{10} x)^2$
E	$\sigma_y = 0.091x^{0.91}$	$\sigma_z = 0.112x^{0.91}$
F	$\sigma_y = 0.067x^{0.90}$	$\sigma_z = 0.093x^{0.85}$
		$\log_{10} \sigma_z = -1.22 + 1.08 \log_{10} x - 0.061 (\log_{10} x)^2$
		$\sigma_z = 0.082x^{0.82}$
		$\log_{10} \sigma_z = -1.19 + 1.04 \log_{10} x - 0.070 (\log_{10} x)^2$
		$\sigma_z = 0.057x^{0.80}$
		$\log_{10} \sigma_z = 1.91 - 1.37 \log_{10} x - 0.119 (\log_{10} x)^2$

Estabilidad	Coeficientes de dispersión para fuentes instantáneas [m]				Ecuación aproximada	
	$x = 100$ m		$x = 400$ m		$\sigma_y = 0.14x^{0.92}$	$\sigma_z = 0.53x^{0.73}$
	σ_y (m)	σ_z (m)	σ_y (m)	σ_z (m)		
Unstable	10	15	300	220	$\sigma_y = 0.06x^{0.92}$	$\sigma_z = 0.15x^{0.70}$
Neutral	4	3.8	120	50	$\sigma_x = 0.024x^{0.89}$	$\sigma_z = 0.05x^{0.61}$
Very stable	1.3	0.75	35	7		

4.6. DISPERSIÓN DE UN GAS DENSO

La liberación de gases más densos que el aire conlleva ciertos efectos especiales que afectan la evolución de la dispersión. El material liberado descenderá a la superficie del piso y, una vez ahí, se extenderá radialmente bajo la acción gravitacional. Este movimiento autónomo produce una nube poco profunda pero muy extensa.



Fig. 4.5. Dispersión gravitacional

En la zona de los extremos de la nube, el frente avanzará con una gran vorticidad, tal como lo muestra la figura 4.5. Las velocidades sustituirán, mientras dure la difusión de la gravedad, la dispersión atmosférica pasiva.

El movimiento autónomo incrementa la mezcla, en mayor medida en la zona debajo del frente de pluma. Una vez terminada esta, el movimiento autónomo provocado por la acción de la gravedad y la variación vertical de la densidad en la nube causará una estratificación estable la cual reduce la dispersión vertical. Finalmente los efectos de la densidad serán nulos y la dispersión se convertirá en pasiva.

4.6.1. LA MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE UN GAS DENSO

En una liberación de una sustancia en forma gaseosa, cuando la velocidad a la salida es mucho mayor que la del viento, es importante el impulso dado. Cuando la densidad de la sustancia es muy diferente a la del aire también intervienen los efectos boyantes, es decir la ascensión o descenso de la nube. En general existen tres fuerzas que intervienen en la evolución de una nube, en primer lugar, la velocidad del viento, los efectos boyantes y el impulso inicial. Dependiendo de la sustancia y de las condiciones de la liberación será la intervención de cada una de ellas. La resultante de estas tres fuerzas está en función de las condiciones iniciales, la tasa de dilución de la pluma y de la termodinámica de la misma.

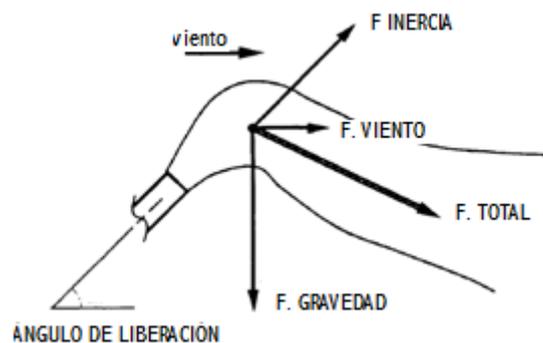


Fig. 4.6. Fuerzas que intervienen en la dispersión

Los parámetros que determinan si una sustancia en fase de vapor se comportará como un gas denso, son: la masa molecular, formación de aerosoles, temperatura y reacciones químicas.

Masa molecular. A partir de la ley de los gases perfectos se comprueba que la densidad de los gases a temperatura ambiente está en función de la masa molecular de la mezcla. La densidad relativa del gas puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\rho_{rel} = \frac{M_g}{M_a}$$

La masa molecular de la mezcla de aire es de 29 g/mol.

Temperatura. En ocasiones se presenta la liberación de gases refrigerados a muy baja temperatura, o bien como en el caso del propano y gas LP, se liberan gases licuados, que al expandirse por la eminente pérdida de presión, se pierde calor del ambiente para llevar a cabo el cambio de fase, lo que conlleva que la humedad circundante se condense formando una nube de color blanco. La densidad relativa de la mezcla debe de calcularse a la temperatura a la cual se evapora el gas a presión atmosférica, mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{rel} = \frac{T_{amb}}{T_{eb}} * \frac{M_g}{M_a}$$

Formación de aerosoles. En ocasiones las condiciones que propician la liberación de la sustancia obligan a que súbitamente el líquido contenido salga del contenedor. En función de las propiedades termodinámicas de la sustancia será el cambio de fase y en caso de existirlo la velocidad del mismo. En ocasiones el contenido no toca el piso y se evapora en el trayecto enfriando a la nube, o bien en ocasiones, pequeñas gotas de líquido quedan flotando dentro de la nube cambiando de fase paulatinamente lo que conlleva el enfriamiento de la misma. Estas temperaturas bajas aumentan la densidad de la mezcla provocando que el comportamiento de la nube sea el de un gas denso.

Reacciones Químicas. Algunas sustancias pueden experimentar cambio en su masa molecular al llevarse a cabo la dispersión.

Si la masa de vapor o gas que se dispersa cumple cualquiera de los aspectos descritos en los párrafos anteriores, entonces macroscópicamente presenta una densidad mayor que la del aire resultando un comportamiento primero de caída y posteriormente de aplastamiento para finalmente comenzar a dispersarse.

La evolución de la sustancia al liberarse tiene tres estadios:

- Fase de flotabilidad**
- Fase de dispersión estable y estratificada**
- Fase de dispersión neutra**

La fase de flotabilidad se basa en el principio de la disminución de la altura de la nube en muy pocos segundos por efecto del aplastamiento. La figura 4.7 muestra un esquema de la fase de flotabilidad.

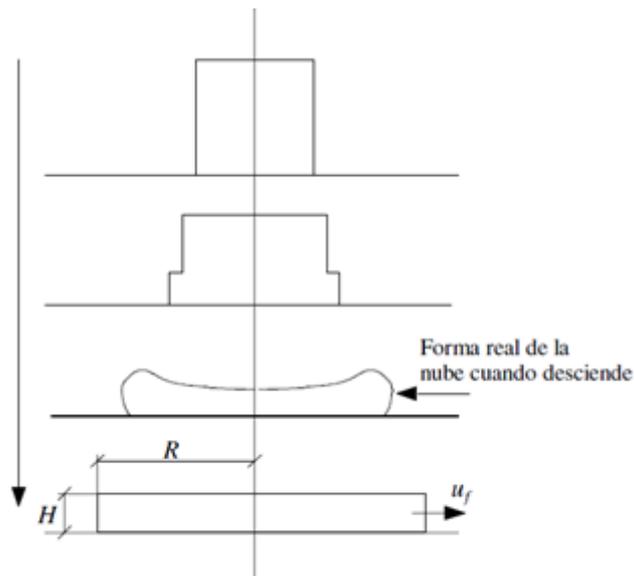


Fig. 4.7. Aplastamiento de la nube

4.6.2. TIPOS DE MODELOS DE GAS DENSO

Existen tres tipos de modelos matemáticos para la dispersión de gases densos.

- 1) Modelos convencionales modificados
- 2) Modelos de caja y SLAB
- 3) De teoría K y otros modelos en tres dimensiones

4.6.2.1 MODELOS CONVENCIONALES MODIFICADOS

Una vez analizado el hecho de que algunas sustancias en estado gaseoso presentan un comportamiento acorde al de un gas denso, es hasta cierto punto entendible pensar en hacer una modificación a los modelos de dispersión pasiva existentes, tal como el del Sutton o el de Pasquill-Gifford, modificando las constantes de difusión C , o bien, los coeficientes de dispersión σ .

4.6.2.1.1. MODELO DEL BOUREAU DE MINAS

En el sentido del párrafo anterior, existen modelos convencionales modificados que toman como base la modelación de dispersión pasiva para determinar el comportamiento de un gas denso. El Bureau de minas de los Estados Unidos desarrolló un modelo matemático para la modelación de la evolución de un gas denso que únicamente hace la suposición de que la relación entre el valor del coeficiente de dispersión en el eje vertical será un veinte por ciento del valor del coeficiente en el eje perpendicular a la dirección del viento, es decir:

$$\sigma_z = 0.2\sigma_y$$

Con esta modificación se podrá simular el comportamiento de un gas denso mediante la determinación de la dispersión pasiva.

4.6.2.1.2. MODELO DE CLANCEY

Tal como el modelo del bureau de minas, el modelo desarrollado por V.J. Clancey sugiere la modificación de los valores de los coeficientes de dispersión usados en el modelo de Sutton.

$$\chi(x, y, z, t) = \frac{2Q}{\pi^{3/2} C_x C_y C_z (ut)^{3/2(2-n)}} e \left[-(ut)^{n-2} \left(\frac{x^2}{C_x^2} + \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right) \right] \quad 4.30$$

Sugiere que los coeficientes tengan los siguientes valores:

$$C_z = 1/2 C_y = 1/2 C_x$$

4.6.2.1.3. MODELO DE GERMELES Y DRAKE

Germeles y Drake presentan en 1975 un modelo gaussiano que describe la evolución de una nube de gas natural.

El modelo de Germeles contiene variables propias de un modelo de caja y a la vez de un modelo de dispersión pasiva. Se basa en la consideración de que la nube es de forma cilíndrica con un radio inicial R_i dada por el radio del charco evaporante. La altura de la nube se determina con la relación 4.31.

$$H_i = 2R_i \frac{W_v}{u} \quad 4.31$$

La masa y contenido de calor en la nube se determinan por medio de las relaciones 4.32 y 4.33.

2011

$$m = \pi \rho R^2 u_e \quad 4.32$$

$$E = m C_p T \quad 4.33$$

donde:

C_p	Calor específico de la nube
E	Calor en la nube
M	Masa de gas en la nube
T	Temperatura absoluta
u_e	Velocidad del viento
W_v	Velocidad de la nube
ρ	Densidad

Este modelo se basa en la consideración de que la liberación proviene de una fuente lineal finita con ancho L localizada en una fuente virtual a una distancia X_v viento arriba de la fuente real.

$$c(x, y, z) = \frac{V}{(2\pi)^{\frac{1}{2}} u L \sigma_z} e^{\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)} \left\{ erf \left[\frac{\left(\frac{L}{2}\right) - y}{\frac{1}{2^{\frac{1}{2}} \sigma_y}} \right] + erf \left[\frac{\left(\frac{L}{2}\right) + y}{\frac{1}{2^{\frac{1}{2}} \sigma_y}} \right] \right\} \quad 4.34$$

donde:

V	Tasa volumétrica de la liberación
σ_y y σ_z	Coefficientes de dispersión en la dirección y y z propios de método de Pasquill-Gifford
erf	Función error

4.6.2.2. CONSIDERACIONES DE LOS MODELOS DE CAJA

Los modelos de caja consideran que la nube formada por la liberación tiene propiedades uniformes en toda la masa. Dichos modelos contienen relaciones que indican la evolución del radio de la nube y de la altura. Las concentraciones al interior de la nube se obtienen por medio de un balance de masa. Es importante mencionar que en una liberación instantánea las

concentraciones se consideran uniformes en todos los ejes de la nube. Para una liberación continua, el eje perpendicular a la dirección del viento presenta uniformidad a diferencia del eje vertical el cual tiene variaciones en función de la altura.

Las consideraciones en un modelo de caja son: en primer lugar, la mezcla en el interior de la nube es lo suficientemente rápida como para poder considerar que las concentraciones son uniformes, la forma de la nube está en función de la gravedad, la velocidad del viento ingresando a la nube está en función de la velocidad advectiva, diferencias de densidades y de los niveles de turbulencia.

En general los modelos de caja contienen pocas variables, lo que conlleva cierta inexactitud en los resultados obtenidos, por ello, no es recomendable utilizarlos en simulación de liberación de sustancias tóxicas e inflamables por el riesgo que conllevan.

Los modelos de caja presentan adicionalmente desventajas, por ejemplo, consideran que el piso sobre el cual escurre la nube es completamente plano y libre de obstrucciones, otra limitante es la suposición de homogeneidad inadecuada para la determinación de las zonas inflamables de la nube.

4.6.2.3. MODELO SLAB

El modelo SLAB se aplica a una liberación continua de un gas denso. Establece condiciones promedio en los ejes vertical y horizontal de la nube por lo que es unidimensional. El modelo se basa en seis ecuaciones diferenciales simultáneas, para la conservación de la masa total, conservación de la masa liberada, ecuaciones de conservación de *momentum* y de conservación de energía. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{d(Bhu_c\rho_c)}{dx} = B_0u_0\rho_0 + (Bu_e + hw_e)\rho_a \quad 4.35$$

$$\frac{d(Bhu_cp_c\omega)}{dx} = B_0u_0\rho_0 \quad 4.36$$

$$\frac{d(Bhu_c\rho_cc_pT_c)}{dx} = B_0u_0\rho_0c_{p0}T_0 + (Bu_e + hw_e)\rho_aC_{pa}T_a + Q_{gr} \quad 4.37$$

2011

$$\frac{d(Bhu_c^2\rho_c)}{dx} = -\frac{1}{2}[Bh^2(\rho_c - \rho_a)]g + (Bu_e + hw_e)\rho_a u \quad 4.38$$

$$\frac{d(Bhu_c u_y \rho_c)}{dx} = h^2(\rho_c - \rho_a)g \quad 4.39$$

$$\frac{dB}{dx} = \frac{u_y + w_e}{u_c} \quad 4.40$$

donde:

B	Ancho de la nube
C_p	Calor específico
h	Altura de la nube
Q_{gr}	Flujo de calor entre la nube y el piso
T	Temperatura absoluta de la nube
U	Velocidad del viento
u_c	Velocidad de la nube en la dirección del viento
u_e	Velocidad entrante en el sentido vertical
u₀	Velocidad del material en la fuente
u_y	Velocidad de la nube en la dirección perpendicular al viento
w_e	Velocidad entrante en la dirección horizontal
r	Densidad de la nube
w	Fracción de masa del material liberado con subíndice a para el aire, c para la nube y 0 para la fuente

Además, se utiliza la ecuación suplementaria 4.41.

$$\rho_c T_c = \frac{\rho_a T_a M_0}{M_0 + (M_a - M_0)\omega} \quad 4.41$$

donde

M	masa molecular
----------	-----------------------

La velocidad vertical entrante se define con:

$$u_e = \frac{2.7ku^*}{\phi(Ri)} \quad 4.42$$

donde:

k	Contante de Von Karman
(Ri)	Perfil de Monin-Obukhov
Φ	=1+5Ri; si Ri > 0, Φ= (1-16Ri)^{-p} ; si Ri < 0

2011

Ri Número de Richardson
p' Índice que vale ¼ si se trata de *momentum* y ½ si se trata de *especies*

$$w_e = (1.8)^2(h/B)u_e \quad 4.43$$

El término (h/B) implica que a valores reducidos de la altura, la entrada horizontal es baja, sin embargo, conforme la altura se incrementa la altura también lo hace.

El perfil de la concentración volumétrica en la nube se representa como:

$$C(x, y, z) = C(x)C_1(y)C_2(z) \quad 4.44$$

Donde C es la concentración volumétrica y C(x), C₁(y), C₂(z) son funciones de las concentraciones. Tales funciones son:

$$C(x) = \frac{M_a \omega}{M_0 + (M_a - M_0) \omega} \quad 4.45$$

$$C_1(y) = \frac{1}{4b} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+b}{2^{1/2}\beta} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-b}{2^{1/2}\beta} \right) \right] \quad 4.46$$

$$C_2(z) = \frac{1}{h} \left(\frac{\delta}{h} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{3z^2}{2h^2} \right) \quad 4.47$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2 \quad 4.48$$

donde:

ω Fracción de masa
b y β Parámetros de forma
B Varía con respecto a x con base en la última ecuación diferencial que describe SLAB

La variación de b con respecto a x está dada por la relación $\frac{db}{dx} = \frac{bu_y}{Bu_c}$

El perfil de la concentración horizontal es uniforme cuando β=0 y se aproxima al tipo gaussiano cuando β>>b. la proporción de β con b permanece constante bajo la influencia de la velocidad horizontal u_y, w_e y u_e. Esto es, la velocidad

horizontal entrante w_e la cual causa un incremento en β y resulta en un perfil gaussiano en la dirección perpendicular al viento.

Los parámetros de forma B y h están relacionados con los parámetros de dispersión de la siguiente forma:

$$\sigma_y^2 = 3B^2 \quad 4.49$$

$$\sigma_z^2 = 3h^2 \quad 4.50$$

5.0 APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS A UNA INDUSTRIA CON ACTIVIDAD ALTAMENTE RIESGOSA

Como complemento a la investigación y análisis de los modelos matemáticos para la predicción de consecuencias y como aportación del autor se aplicaron a una industria con actividades altamente riesgosas.

Para la elección del tipo de industria se consideró que ésta, además de involucrar el manejo de una sustancia peligrosa, debía de incluir riesgos mayores ante un evento extraordinario y la mayor cantidad posible de efectos físicos motivo de este estudio.

Se considera que la mejor opción para ejemplificar un análisis es una gasera. Una gasera es una industria que en su proceso involucra riesgo de ocurrencia de eventos extraordinarios, mismos que se han analizado en este documento.

El manejo de gas licuado de petróleo, en adelante denominado gas LP, involucra eventos tales como derrames, que conducen a la generación de charcos evaporantes de muy corta duración; nubes de vapor, mismas que pueden desencadenar un incendio, o bien, concentraciones tóxicas viento abajo; incendios instantáneos a la liberación, tales como flama jet, o bien, una bola de fuego posterior a una explosión de tipo BLEVE.

En el presente trabajo se simuló las consecuencias posibles de una planta industrial que abastece a gran parte de la población de la Ciudad de México.

La información de la planta que concierne a la geometría, proceso y cantidades de comercialización, fue proporcionada por los directivos y personal técnico de la misma, previa firma de un acuerdo de confidencialidad solicitado al autor por la Directiva de la gasera. En dicho documento se establecen los alcances y limitaciones del manejo de la información para la posible realización del estudio y su posterior publicación.

Por razones de estrategia comercial se le ha solicitado al autor no difundir información específica de ubicación, razón social, nombres del personal, fotografías y cantidades exactas comercializadas. Atendiendo a lo anterior, se mostrará información general y cantidades aproximadas.

5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES DE LA GASERA

La comercializadora de gas recibe el insumo de PEMEX. En el interior de sus instalaciones se realiza trasiego, almacenamiento temporal, carga de autotanques, distribución y venta de gas LP. Es importante mencionar que la gasera no realiza ningún proceso de transformación, ya que el insumo adquirido por la empresa ya es susceptible de comercializarse y no necesita ningún proceso adicional.

Esta planta industrial comenzó sus labores en la década de los cincuentas y se estableció en un predio localizado al oriente del Municipio conurbado de Tlalnepantla de Baz, localizándose al norte de la Delegación Política Gustavo A. Madero, en el Distrito Federal, México.

5.2. ELEMENTOS QUE INTEGRAN A LA GASERA

El terreno sobre el cual están las instalaciones de la empresa tiene una superficie aproximada de 3 ha. Las áreas necesarias para las labores de comercialización están distribuidas como lo muestra la tabla 5.1.

5.3. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS

En este apartado se describen de manera general los procesos, actividades e infraestructura empleada para el almacenamiento y distribución de gas LP.

2011

Tabla 5.1. Superficie que ocupan las instalaciones que integran la planta

INSTALACIÓN	SUPERFICIE m ²	PORCENTAJE %
Área de tanques de almacenamiento (10 tanques)	2,496.32	8.13
Isleta de carga de remolques – tanque.	22.00	0.07
Caseta de bombas para el sistema contra incendio	91.00	2.96
Oficinas: Gerencia de planta, administrativas y salones de capacitación	165.90	0.54
Andén de carga y de carburación	196.20	0.64
Oficina de jefatura de patio de operaciones	35.00	0.11
Planta de emergencia, subestación eléctrica, taller de mantenimiento eléctrico, equipo de emergencia, cuarto de PLC	100.00	0.33
Oficinas generales y de ventas	543.50	1.77
Baños, guarda ropa	121.50	0.40
Subestación 1 y 2	60.50	0.20
Cocina, comedor y aulas de usos múltiples	102.67	0.33
Báscula	100.00	0.33
Caseta de vigilancia	18.00	0.06
Zona de estacionamiento de autotanques	2,224.00	7.50
Caseta de recibo de gas LP	86.00	7.50
Estacionamiento: visitantes y personal directivo	2,167.50	0.28
Estacionamiento techado	73.10	7.06
Bodega de taller	4.00	0.24
Cobertizo de descarga de combustibles (fuera de operación)	40.00	0.01
Área verde	3,837.75	0.13
Cisternas de agua para sistema contra incendio	288.00	12.50
Vialidad interna	17,912.06	58.38
TOTAL	30,685.00	100

5.3.1. RECEPCIÓN DEL PRODUCTO

El suministro normal de gas LP a los tanques de almacenamiento se realiza por medio de semi-remolques que se abastecen en la Terminal de PEMEX ubicada en Tepeji del Río, Hidalgo.

La estación de recibo se localiza en el lado norte de los tanques de almacenamiento. El diámetro de la tubería de entrada es de 152 mm y a la salida se tienen diámetros de 152, 101 y 76 mm, conforme se bifurcan las tuberías para conectarse a cada uno de los diez tanques de almacenamiento, de 250,000 litros de capacidad, cada uno. El llenado de los tanques de almacenamiento se realiza hasta el 85% de capacidad.

Cada uno de los tanques cuenta con: dos válvulas de exceso de flujo Rego Mod. 7539-VG con capacidad de 250 gpm y diámetro de 76.2 mm; una válvula de exceso de flujo Rego Mod. 3292-B con capacidad de 100 gpm y 50.8 mm de diámetro; dos válvulas de exceso de flujo Rego Mod. 9292-B con capacidad de 100 gpm (retorno de líquido) y 58.08 mm de diámetro; tres válvulas de exceso de flujo Rego Mod. 3292-B para 925 m³/min de vapor y diámetro de 58.08 mm; dos válvulas multipor marca C.M.S. modelo 5850-A, con diámetro de 101 mm; ocho válvulas de relevo de presión Rego Mod. 3149-G con capacidad de 925 m³/min y diámetro de 63.4 mm; ocho tubos de desfogue de fierro galvanizado C-40 de 2.0 metros y 76.2 mm de diámetro; un medidor magnético para nivel Rochester de 64.3 mm de diámetro; un termómetro de rango -20 a +50°C de 12.7 mm de diámetro; un manómetro de rango de 0-14 kg/cm² con diámetro de 6.4 mm; un transmisor de nivel de líquido de 19.7 mm de diámetro; un transmisor de nivel de presión de 19.7 mm de diámetro; dos conexiones soldadas para cable a tierra, que consiste en un cable de cobre desnudo unido a una varilla copperweld de 3.0 metros, la que permanece enterrada.

En el caso de recibir el suministro de gas a través de remolques, las tomas de recepción se ubican al oeste de la zona de almacenamiento; consisten en dos isletas ubicadas, la más cercana, a 12.5 metros de distancia de los tanques de almacenamiento.

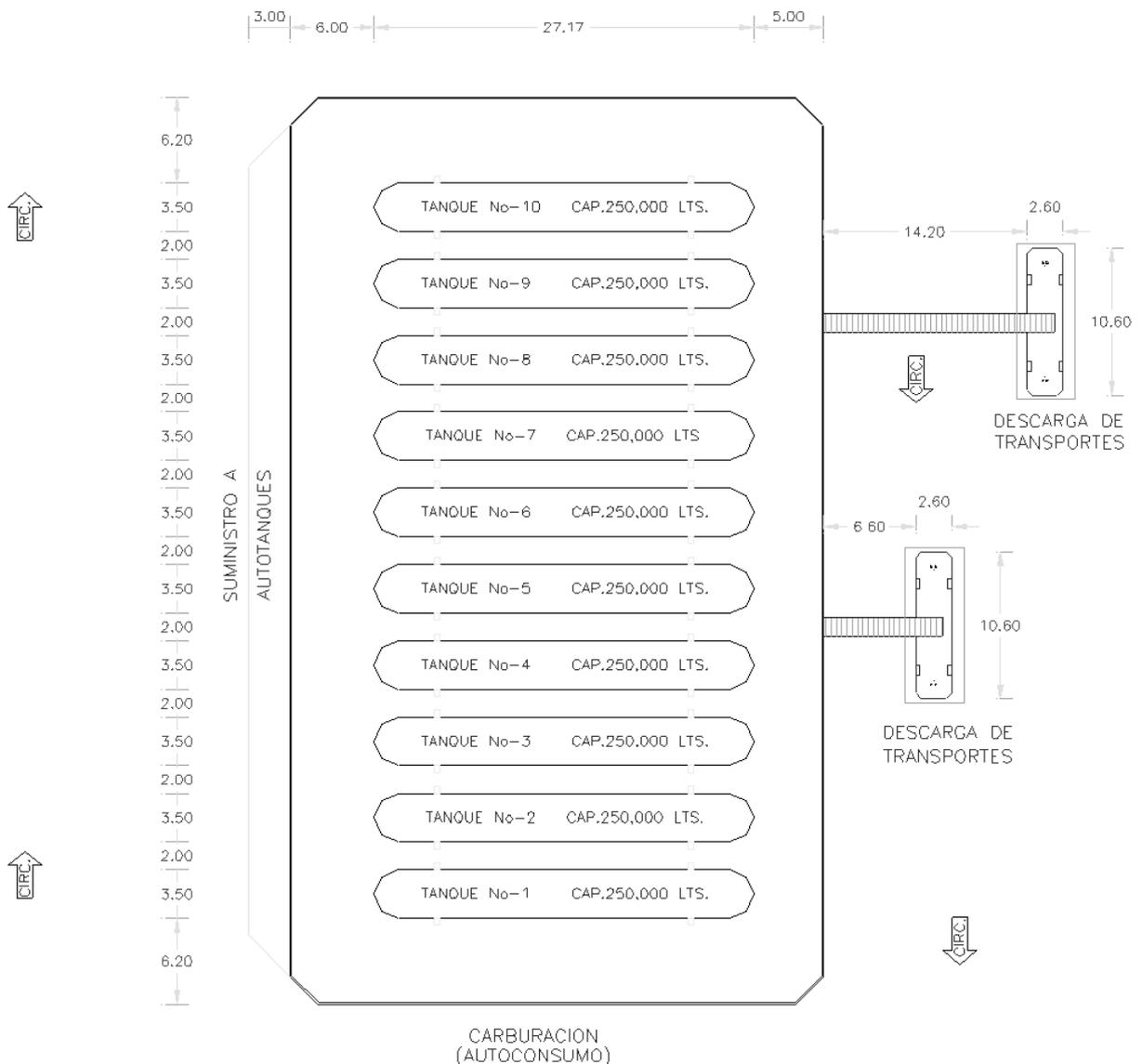


Fig. 5.1. Ubicación de los tanques de almacenamiento

5.3.2. LLENADO DE AUTOTANQUES PARA LA DISTRIBUCIÓN

Las tomas para el llenado de auto-tanques se localizan en el lado este de la zona de almacenamiento, a una distancia de 6.0 metros de los mismos.

Para realizar la carga de auto-tanques se utilizan bombas que son alimentadas por medio de una tubería de 101 mm (4") de diámetro y con un diámetro de

descarga de 76 mm (3") de diámetro, que se divide en dos tomas de 51 mm (2") de diámetro. La tubería de gas-vapor es de 51 mm (2") de diámetro, y se divide en dos bocas terminales de 32 mm (1 ¼") de diámetro, cada una.

Todas las tomas, tanto de recepción como de suministro, en bocas terminales se cuenta con una válvula de exceso de flujo de cierre automático, dos válvulas de cierre manual, una válvula de cierre a control remoto, un tramo de manguera especial para gas LP y un acoplador de llenado, siendo estos accesorios de igual diámetro al de la tubería y sólo en las tomas para gas líquido se tiene también una válvula de seguridad para el alivio de presión hidrostática de 6.4 mm (1/4") de diámetro.

Las condiciones de carga y almacenamiento de gas, así como el llenado de auto-tanques se realizan en condiciones de temperatura y presión ambiente.

5.4. CARACTERÍSTICAS DEL GAS LP

El gas LP es un combustible de alto poder calorífico que arde con una flama excepcionalmente limpia. Si se le maneja en forma adecuada no produce humo ni hollín y se quema totalmente sin dejar residuos o cenizas, razón por la cual es ampliamente utilizado en labores domésticas. Se compone de una mezcla de propano 80% y butano 20%, generalmente.

Se le conoce comercialmente como gas LP. En el interior de los recipientes en los que se almacena, transporta, distribuye y aprovecha, se encuentra en estado líquido, debido a que cuando se le somete a una presión mayor que la atmosférica y en función de ésta, se condensa migrando a la fase líquida.

Cuando se libera el gas LP del recipiente que lo contiene, disminuye la presión que rodea a la sustancia propiciando la evaporación. Cuando el contenido sale utiliza el calor del medio para completar el cambio de fase y liberarse en forma de gas. Dicha fase es la aprovechable.

El gas LP es incoloro, inodoro y de baja viscosidad. En estado de vapor es más pesado que el aire. Para proveerlo de su olor característico es necesario olorizarlo mediante la mezcla con Etil mercaptano, hidrocarburo obtenido del petróleo. La mezcla se realiza en una proporción de 1 litro por cada 10,000 litros de gas LP.

El gas LP se obtiene directamente de los mantos petrolíferos en mezcla con el petróleo crudo; también se obtiene de la refinación de algunos productos del petróleo.

Tabla 5.2. Temperatura de ebullición

Componente	Temperatura de ebullición °C
Propano	-42.1
Butano	-0.5

Tabla 5.3. Peso específico

Componente	Peso específico kg/m ³
Propano	507.9
Butano	584.4

Tabla 5.4. Densidad en estado gaseoso

Componente	Densidad kg/m ³
Propano	1.522
Butano	2.006

El gas LP, aunque no siempre suceda, debe estar conformado por una mezcla de butano y propano con una proporción de 20% y 80%, respectivamente.

Tabla 5.5. Límites de inflamabilidad

Componente	Límite inferior %	Límite superior %
Propano	2.0	9.5
Butano	1.5	5.8

Relación de expansión de gas L.P. al pasar del estado líquido al de vapor

Al existir una fuga instantánea de gas LP en fase líquida existe la posibilidad de que se forme un charco evaporante de muy corta duración, este se expandirá rápidamente transformándose al estado gaseoso con las proporciones mostradas en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Relaciones de expansión

Componente	Proporciones
Propano	De 269 a 273 por UNC
Butano	De 234 a 238 por UNC

Relaciones a $P_{atm} = 1 \text{ atm}$ y $T_{amb} = 15.5^{\circ}\text{C}$

Las proporciones de la tabla 5.6 indican que un litro de propano se convierte en 273 litros de vapor de propano y éstos a su vez forman con el aire 11,500 litros de mezcla inflamable.

Adicionalmente, el gas LP posee las propiedades mostradas en la tabla 5.7.

Tabla 5.7 Características del gas LP

CARACTERÍSTICA	VALOR	FUENTE
Nombre de la Sustancia	Gas LP	Hoja de seguridad. Gas LP PEMEX
Peso Molecular	49.7 g/mol	Hoja de seguridad. Gas LP PEMEX
AEGL 1	no aplica	
AEGL 2	no aplica	
AEGL 3	no aplica	
Punto de ebullición	-32.5°C	Hoja de seguridad. Gas LP PEMEX
Presión crítica	41.9x10 ⁵ Pa	Yu.N. Shebeko, A mathematical model of a behaviour of an LPG tank in a fire. <i>Fire Explos. Saf.</i> 6 2 (1997), pp. 17–22 (in Russian)
Temperatura crítica	369.8 K	A study of the behaviour of a protected vessel containing LPG during pool fire engulfment
Densidad del gas	2.01 kg/m ³ , T=15.5°C,	Hoja de seguridad. Gas LP PEMEX
ERPG 1	no aplica	
ERPG 2	no aplica	
ERPG 3	no aplica	
Punto flash	-98°C	
Punto de congelamiento	-187 °C	www.tpub.com
Capacidad térmica específica Cp	1700.8 J/Kg	enciclopedia.airliquide.com
Capacidad térmica específica Cv	1496.7 J/Kg	enciclopedia.airliquide.com
Calor específico	0.6 BTU/lb	manual del instalador gas lp
IDLH	2000 ppm	NIOSH
Límite inferior de inflamabilidad	2.1%(2100 ppm)	Hoja de seguridad. Gas LP PEMEX
Límite superior de inflamabilidad	9.3% (9300 ppm)	Hoja de seguridad. Gas LP PEMEX
Presión de vapor	5525 mmHg a 20°C	Clamcoactzacoalcos
TEEL 1	no aplica	
TEEL 2	no aplica	
TEEL 3	no aplica	

5.5. POSIBLES ESCENARIOS ANTE UN EVENTO EXTRAORDINARIO

El comportamiento del gas LP es acorde al de un gas denso. La densidad del mismo es 2 veces mayor que la del aire, por ello tiene un movimiento negativamente boyante al ser liberado en forma de vapor.

En principio, si la ruptura del contenedor se encuentra en contacto con la fase gaseosa, la sustancia al salir, tenderá a moverse radialmente hacia las cotas más bajas. Posteriormente toda la nube se moverá en conjunto en la dirección del viento experimentando un aumento paulatino de su volumen por el fenómeno de dispersión, mismo que está en función de las condiciones atmosféricas locales.

Si el vapor en liberación no encuentra una fuente de ignición de manera inmediata, hecho que provocaría un incendio tipo flama jet, entonces esta seguirá expandiéndose, hecho que conlleva el riesgo de explosión de la nube de vapor. Esto sucedería siempre y cuando la mezcla de gas LP y aire se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad. En el caso de que el gas tenga contacto con una fuente de ignición, entonces sucederá una deflagración de la nube de vapor, o bien, si existen las condiciones adecuadas de contención y mezcla, la deflagración puede convertirse rápidamente en una detonación al rebotar la onda de choque en las paredes provocando una mayor presión y temperatura en la mezcla.

Si el gas LP no encuentra en su trayecto una fuente de ignición y debido a la dispersión la concentración del gas LP disminuye más allá del límite inferior de inflamabilidad, entonces las consecuencias estarán en función de las concentraciones que sucedan en el espacio y en el tiempo. En este sentido, es importante mencionar que el gas LP es un asfixiante simple que provoca daños al ser humano al tener contacto con concentraciones de 2000 ppm en 60 minutos.

Si la ruptura del contenedor sucede en contacto con la fase líquida, se tendrá que evaluar la tasa de salida de la sustancia en función del área de la ruptura, presión en el interior y las temperaturas externas e internas, para con ello determinar la extensión del charco evaporante. Sin embargo, dado que el gas LP tiene un punto de ebullición de -32.5°C , suponiendo que la liberación se da en condiciones normales, el derrame de líquido es de corta duración, es decir, el líquido que se libera, casi instantáneamente migra a la fase gaseosa, por lo que la existencia de escenarios como el incendio de charco es prácticamente imposible.

Puede suceder que el evento extraordinario se deba no a la liberación del gas LP por la ruptura del contenedor, sino que, por una situación ajena al contenedor, un incendio incida en las paredes del contenedor modificando la temperatura del contenido. Si esto sucede, entonces la presión en el interior aumentará en función de la temperatura. Si por algún motivo no funcionan las válvulas de alivio de sobrepresión, o bien no tienen la capacidad de desalajo requerida, entonces puede suceder que la presión en el interior aumente más allá del límite mecánico del contenedor, provocando la falla del mismo y una eminente explosión mecánica.

Cuando una sustancia que posee un punto de ebullición por debajo de la temperatura ambiente normal, se somete a una presión mayor que la presión atmosférica, ésta se licúa. Si dicha sustancia en fase líquida se le ha aumentado la temperatura y se libera de forma súbita, como cuando sucede la ruptura de un contenedor por un incendio externo, entonces todo el líquido cambia instantáneamente de fase líquida a vapor. Si la disminución de la presión hace que la relación presión-temperatura esté por debajo del límite de sobrecalentamiento, entonces sucederá una expansión instantánea, la cual conlleva una detonación que, aunque no involucre radiación, sí genera una onda de sobrepresión y un impulso. Una explosión de este tipo, llamada BLEVE, involucra una dispersión inmediata del gas LP. Es probable que la nube formada encuentre un punto de ignición de los alrededores y se tenga como consecuencia adicional una bola de fuego.

En todos los casos, si no se presenta radiación o sobrepresión, dado que el gas LP es asfixiante, siempre existirá el riesgo de la formación de nubes que, aunque tengan concentraciones fuera de los límites de inflamabilidad, representan riesgo a la salud del ser humano.

5.6. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

El análisis de las posibles consecuencias se realizó, en principio, utilizando los modelos matemáticos estudiados en los capítulos anteriores aplicables a cada caso. Además, el análisis se enriqueció mediante el uso de un software libre aplicable.

El análisis se efectuó con el uso del software libre de la EPA "ALOHA".

Una vez hechos los cálculos y realizada la modelación con el software libre, se realizó la simulación de consecuencias con el software PSC creado por el autor para tal caso.

5.6.1. ANÁLISIS USANDO SOFTWARE LIBRE

El software utilizado para la predicción de consecuencias es “ALOHA”, este software es editado por la EPA de Estado Unidos y sirve para modelar los efectos físicos posibles a partir de la liberación de una sustancia peligrosa.

5.6.1.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

ALOHA (Areal Location of Hazardous Atmospheres) es un programa de computadora diseñado especialmente para dar respuesta inmediata ante la liberación de una sustancia peligrosa. Es funcional para la planeación de respuesta ante un evento extraordinario de algún proceso que involucre el manejo de sustancias peligrosas. ALOHA predice concentraciones tóxicas, zonas inflamables dentro de nubes de gas, niveles de radiación térmica provocados por incendios, y niveles de sobrepresión que resultan de una explosión.

ALOHA está diseñado para ser utilizado fácilmente durante la ocurrencia de situaciones de emergencia. Su base de datos contiene información física y química de cerca de 1000 sustancias peligrosas. Se programó para minimizar errores durante el proceso de llenado de los datos, advirtiendo al usuario del ingreso de datos no consistentes. Fue desarrollado en conjunto por National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y Environmental Protection Agency (EPA).

Para usar ALOHA es necesario seguir los siguientes pasos:

2011

1. Indicar minuciosamente la localización del sitio de liberación. Para ello es necesario ingresar el nombre de la localidad, coordenadas geográficas y datos de fecha y hora.
2. De la base de datos, seleccionar la sustancia involucrada en el evento extraordinario. En el caso de que la base de datos no contenga a la sustancia involucrada, es necesario introducir las características físicas y químicas de la misma.
3. Introducir las características atmosféricas del sitio, tal como la velocidad y dirección del viento, temperatura, nubosidad y humedad relativa.
4. Describir la forma y circunstancias de la liberación. Se indica si se trata de un charco, fuente directa, ruptura de un tanque, o bien, una tubería que falla. Es necesario indicar características del orificio y qué tipo de escenario es el que se pretende analizar.
5. Indicar el efecto físico y sus magnitudes de interés.

5.6.1.2. LLENADO DE DATOS

Para la simulación de los efectos físicos utilizando ALOHA es necesario introducir los datos que solicita el software, tal como se indicó en el apartado anterior, los datos necesarios son las características del sitio, datos atmosféricos, características de la liberación y del tipo y magnitud de los efectos físicos de interés.

5.6.1.2.1. DATOS DEL SITIO

Los datos solicitados por ALOHA al respecto del lugar en donde se lleva a cabo la liberación son los siguientes:

Nombre de la localidad:	San Juan Ixhuatepec	(Fuente: E. de riesgo, Cap. 1)
Altitud:	2250 msnm	(Fuente: E. de riesgo, Cap. 1)
Latitud:	Norte; 19° 32'	
Longitud:	Oeste; 99° 13'	

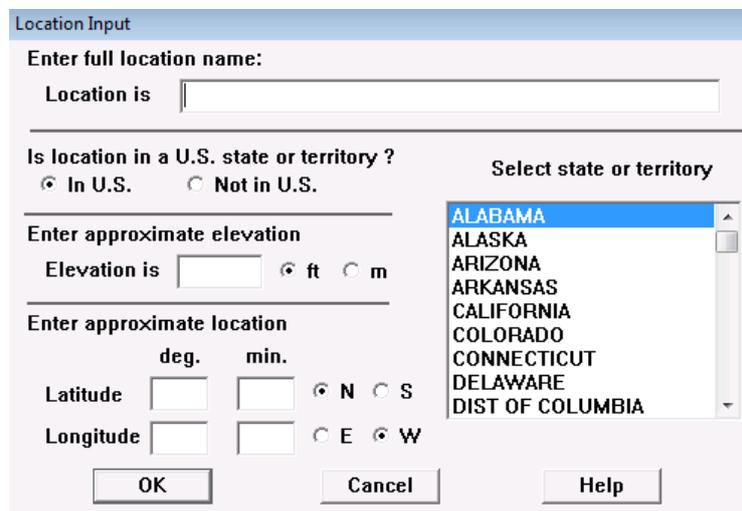


Fig. 5.2. Ventana de datos del sitio de ALOHA

Con respecto al tipo de edificación: ALOHA propone las siguientes opciones:

1. Edificio de oficinas cerradas
2. Construcciones de un solo piso
3. Construcciones de dos pisos
4. Número de cambios de aires por hora

1. Entornos protegidos por árboles o arbustos
2. Entornos no protegidos

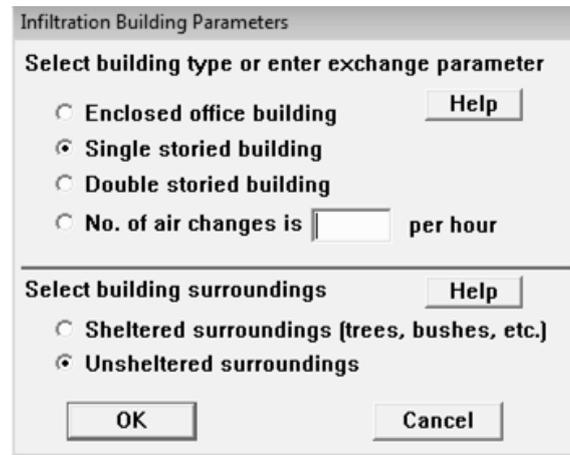


Fig. 5.3. Ventana de características los edificios aledaños de ALOHA

Dado que se realizó un recorrido a los alrededores de la gasera, se contó con criterios de juicio para elegir la opción de edificaciones de dos pisos. Además el programa solicitó la información referente a la rugosidad presentada por la vegetación en torno a la fuente, es decir, si existen árboles y arbustos. Al respecto, no se observaron árboles que propicien una modificación en la modelación de las consecuencias, por ello en cuanto a esa opción se elige un entorno no protegido.

5.6.1.2.2. DATOS DE FECHA Y HORA

El software da la opción de especificar una hora y día específico, o bien, utilizar el reloj interno de la computadora.

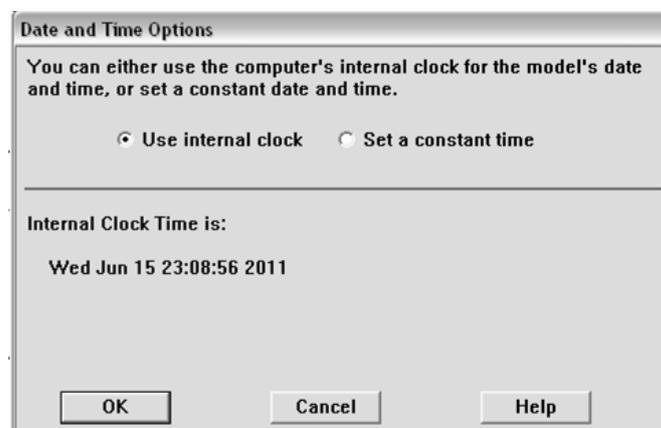


Fig. 5.4. Ventana de opciones de fecha y hora de ALOHA

5.6.1.2.3. DATOS DE LA SUSTANCIA

Los datos de la sustancia son los que se mostraron en el apartado 5.4 de este mismo capítulo, los cuales se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Datos ingresados a la base de datos de ALOHA

CARACTERÍSTICA	VALOR
Nombre de la Sustancia	Gas LP
Peso Molecular	49.7 g/mol
AEGL 1	no aplica
AEGL 2	no aplica
AEGL 3	no aplica
Punto de ebullición	-32.5°C
Presión crítica	41.9x10 ⁵ Pa
Temperatura crítica	369.8 K
Densidad del gas	2.01 kg/m ³ , T=15.5°C, P = 1 atm
ERPG 1	no aplica
ERPG 2	no aplica
ERPG 3	no aplica
Punto flash	-98°C
Punto de congelamiento	-187 °C
Capacidad térmica específica Cp	1700.8 J/Kg K
Capacidad térmica específica Cv	1496.7 J/Kg K
Calor específico	0.6 BTU/lb
IDLH	2000 ppm
Límite inferior de inflamabilidad	2.1%(2100 ppm)
Límite superior de inflamabilidad	9.3% (9300 ppm)
Presión de vapor	5525 mmHg a 20°C
TEEL 1	no aplica
TEEL 2	no aplica
TEEL 3	no aplica

The screenshot shows a software window titled "Input Available Information". It contains several input fields and a list of parameters. The "Chemical Name" field is filled with "Gas LP". The "Molecular Weight" field is empty, with "g/mol" written to its right. Below this is a list of parameters: AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3, Boiling Point (normal), Critical Pressure, Critical Temperature, Default LOC-1 (Yellow), Default LOC-2 (Orange), Default LOC-3 (Red), Density (gas), and ERPG-1. The "AEGL-1" parameter is selected. To the right of the list, there is a field for "AEGL-1 (60 minute) Value:" which is empty, and a dropdown menu currently showing "ppm". At the bottom of the window are four buttons: "Next Field", "OK", "Cancel", and "Help".

Fig. 5.5. Ventana de base de datos de ALOHA

Dado que el gas LP puede estar integrado por más de dos sustancias, y a la vez de varias proporciones de las mismas, se decidió introducir a la base de datos la información de la mezcla normada de PEMEX, misma que se encuentra en las hojas de seguridad de la normatividad emitida por dicha empresa. Dichos documentos no contienen todas las características solicitadas por ALOHA, por ello, se incluyó información tomada de la red y de los documentos establecidos en la bibliografía.

En el caso de los valores de las concentraciones máximas solicitadas por la base de datos de ALOHA, no se han desarrollado aún por los especialistas los referentes a los daños agudos AEGL (Acute Exposure Guideline Levels). Misma situación sucede con los ERPG (Emergency Response Planning Guideline) y TEEL (Temporary Emergency Exposure Limit), solamente se haya el valor IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations) el cual se toma como referencia, no por su valor toxicológico, el cual suele estar alrededor del valor de 20,000ppm, sino por el límite inferior de inflamabilidad (2000 ppm) que evidentemente provocaría daños a la salud por un incendio.

5.6.1.2.4. CARACTERÍSTICAS ATMOSFÉRICAS

Para el llenado de los datos atmosféricos presentes en el momento de la liberación, se tomaron aquellos que suceden normalmente en el sitio. La información de las variables meteorológicas se tomo del estudio de riesgo de la gasera y de la página web del Municipio de Tlalnepantla de Baz.

Los datos ingresados a ALOHA son:

- Velocidad del viento 2m/s (fuente: análisis de riesgo de la gasera)
- Dirección del viento N-S (fuente: análisis de riesgo de la gasera)
- Altura de la medición del viento 10m (fuente: observación en sitio)
- Rugosidad del entorno. Entorno urbano (fuente: observación en sitio)
- Temperatura atmosférica 22°C (fuente: estudio de riesgo de la gasera)
- Altura de capa de inversión N.A.
- Humedad relativa 55% (fuente: meteored.mx)

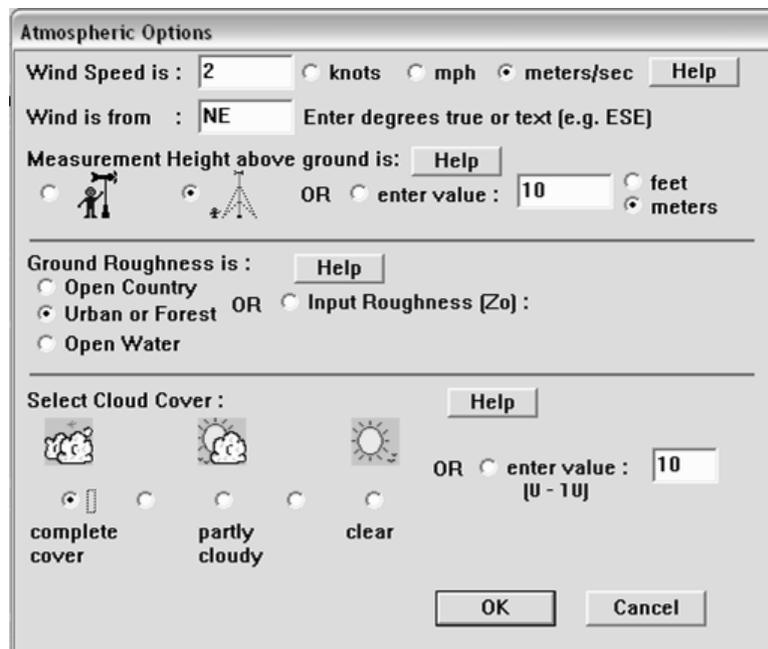


Fig. 5.6. Ventana de Opciones atmosféricas de ALOHA

5.6.1.3. SIMULACIÓN

Una vez ingresada la información solicitada por ALOHA, se inició la simulación de las consecuencias, identificando los escenarios de interés. El primero fue la formación de nube tóxica. Los resultados que generó ALOHA mostraron gráficamente los efectos físicos, es decir, las concentraciones máximas de gas LP que ocurren en el espacio por efecto de la liberación. Posteriormente, en una segunda simulación, se identificaron las zonas susceptibles de explosión, en función de los límites de inflamabilidad presentes en la misma. Después se modeló un escenario en el cual se presenta un incendio del gas saliendo del tanque (flama Jet). Los resultados gráficos que generó el software para este tipo de efecto físico están en función de la radiación que se genera en el espacio cercano al tanque. Por último se simuló las consecuencias de una explosión BLEVE de alguno de los 10 tanques de la gasera.

5.6.1.3.1. ESCENARIO I. FORMACIÓN DE NUBE TÓXICA

Se estableció la geometría del tanque con base en la información dada por el personal de la gasera, la cual es:

- $V = 250,000$ L
- Largo = 27.7 m
- Diámetro = 3.50m

ALOHA, con base en la información ingresada, generó como posibles escenarios los siguientes:

1. Tanque que contiene un líquido inflamable presurizado, el cual no se está quemando y se está escapando a la atmósfera

Los riesgos potenciales propuestos por ALOHA son:

- Concentraciones tóxicas viento abajo
- Incendio flash de la nube de vapor
- Sobrepressiones de la explosión de la nube de vapor

La siguiente ventana solicita el área y el tipo de fuga

Se propuso una fuga provocada por el rompimiento accidental de una de las conexiones entre el tanque y los distintos tubos conectados. Al tanque se conectan 8 tubos, el diámetro más grande de estos es de 76mm. Como el escenario que se pretendía analizar era el más desfavorable, este fue el diámetro supuesto del orificio de escape.

El programa solicitó la información de la ubicación del orificio de escape. La modelación se hizo considerando fuga en el fondo.

Los resultados obtenidos con ALOHA se muestran en la figura 5.8. Dicha figura muestra la dispersión de concentraciones tóxicas.

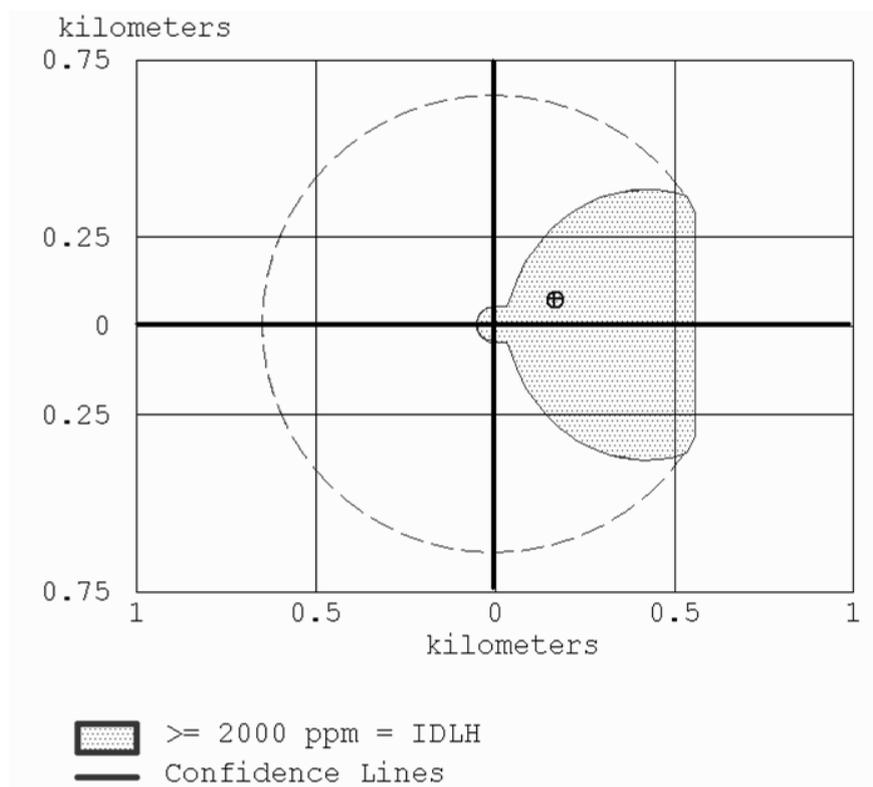


Fig. 5.8. Resultados gráficos de la nube tóxica

Nota: la frontera de la zona de afectación está dada por el IDLH = 2000 ppm

Adicionalmente ALOHA da resultados numéricos como los mostrados a continuación:

```
THREAT_ZONE:  
Model Run: Heavy Gas  
Red : 561 meters --- (2000 ppm = IDLH)  
  
THREAT AT POINT:  
Concentration Estimates at the point:  
Downwind: 0.16 kilometers Off Centerline: 0.074 kilometers  
Max Concentration:  
Outdoor: 29,600 ppm  
Indoor: 4,350 ppm
```

5.6.1.3.2. ESCENARIO 2. FORMACIÓN DE NUBE INFLAMABLE

Con respecto a la formación de una nube inflamable y el riesgo de un incendio flash, ALOHA proporcionó resultados respecto de las zonas inflamables en la nube. Estos se muestran en la figura 5.9.

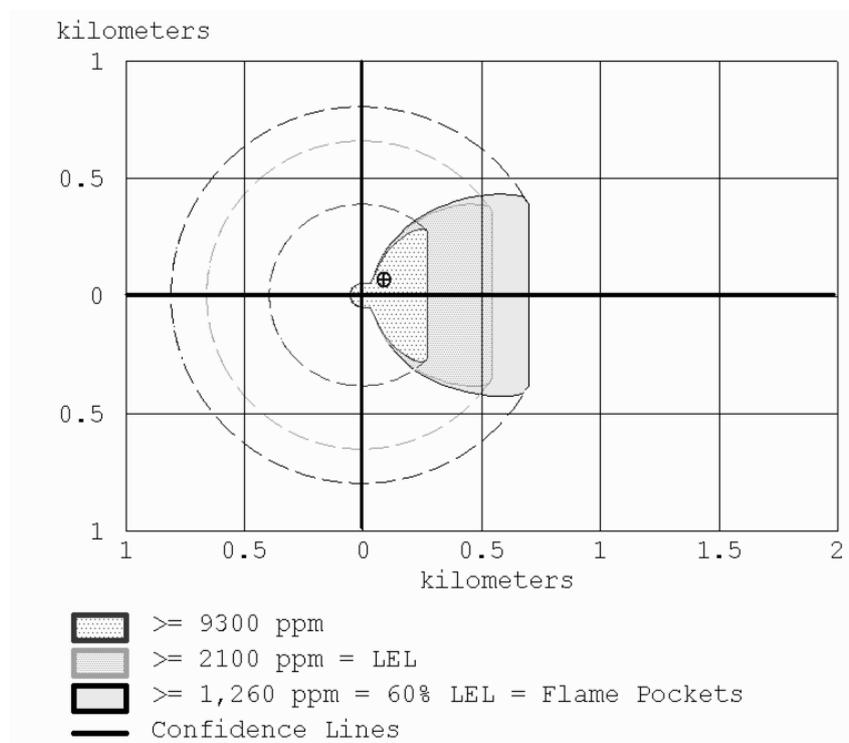


Fig. 5.9. Resultados gráficos de la nube inflamable

2011

Los resultados numéricos son:

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Flammable Area of Vapor Cloud

Model Run: Heavy Gas

Red : 275 meters --- (9300 ppm)

Orange: 547 meters --- (2100 ppm = LEL)

Yellow: 704 meters --- (1,260 ppm = 60% LEL = Flame Pockets)

THREAT AT POINT:

Concentration Estimates at the point:

Downwind: 0.086 kilometers

Off Centerline: 0.071 kilometers

Max Concentration:

Outdoor: 128.000 ppm

5.6.1.3.3. ESCENARIO 3. GENERACIÓN DE INCENDIO EN LA FUGA

Otro de los escenarios propuestos por ALOHA es la fuga en el tanque y que la sustancia se quemé como una flama jet.

Los riesgos potenciales de la sustancia quemándose al mismo tiempo que sale del tanque son:

1. Radiación térmica de la flama jet
2. BLEVE (Si el calor hace que el tanque falle)
3. Efectos tóxicos por los productos de la combustión

Para simular este escenario fue necesario indicar la posición de la ruptura con respecto al tanque. Se decidió colocar ésta en la parte más alta del tanque, con el objetivo de que la flama alcance la máxima altura y se presenten las condiciones más desfavorables.

Los resultados gráficos obtenido se muestran en la figura 5.10.

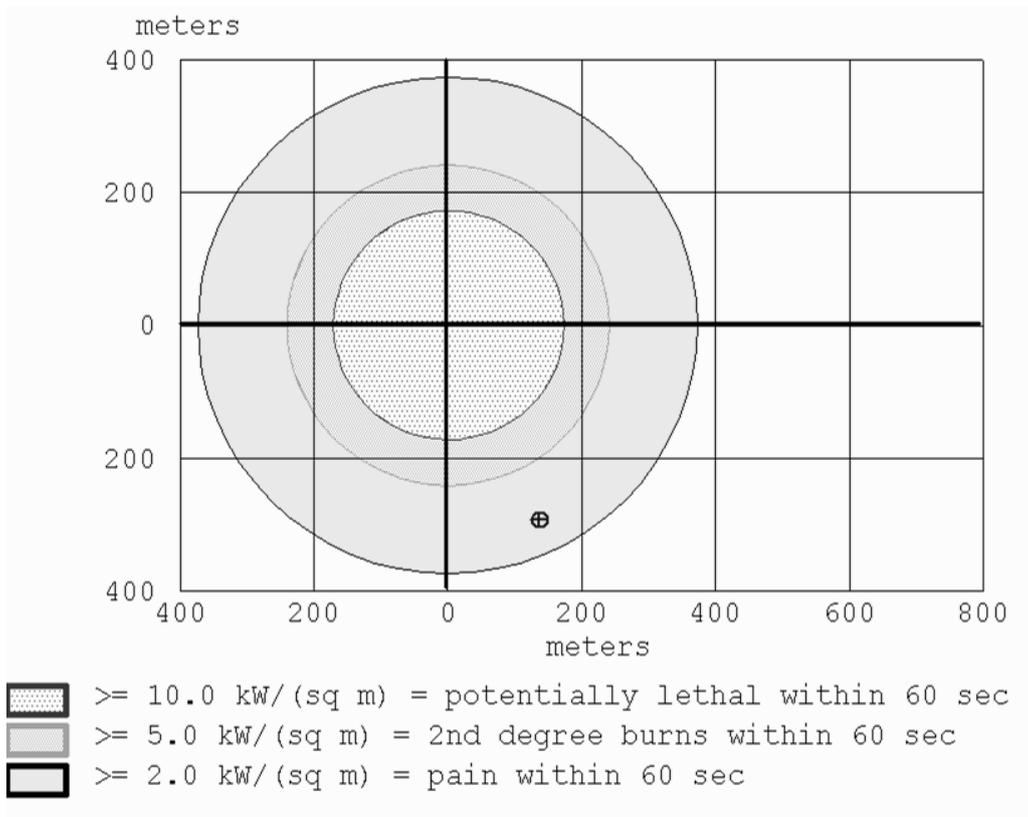


Fig. 5.10. Resultados gráficos del incendio de chorro

Los resultados numéricos generados por ALOHA son:

SOURCE STRENGTH:

Leak from short pipe or valve in horizontal cylindrical tank
Flammable chemical is burning as it escapes from tank
Tank Diameter: 3.5 meters Tank Length: 26.0 meters
Tank Volume: 250000 liters
Tank contains liquid Internal Temperature: 22° C
Chemical Mass in Tank: 137 tons Tank is 85% full
Circular Opening Diameter: 7.6 centimeters
Opening is 3.50 meters from tank bottom
Internal Pressure at Failure: 13.553 atmospheres
Max Flame Length: 41 meters
Burn Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
Max Burn Rate: 2,220 kilograms/min
Total Amount Burned: 105,521 kilograms
Note: The chemical escaped from the tank and burned as a jet fire.

5.6.1.3.4. ESCENARIO 4. EXPLOSIÓN BLEVE

Otro escenario propuesto por ALOHA es una explosión tipo BLEVE en la cual el tanque explota y la sustancia se quema posteriormente formando una bola de fuego.

Los riesgos potenciales por la explosión BLEVE son:

1. Radiación térmica de la bola de fuego y/o del incendio de charco
2. proyectiles y onda de choque producto de la explosión
3. Efectos tóxicos por los productos de la combustión

En la misma medida que se encuentre la presión y/o la temperatura en el interior del tanque, será la extensión del la bola de fuego posterior a la explosión.

Los resultados gráficos generados por ALOHA respecto de la una explosión BLEVE son los que se muestran en la figura 5.11.

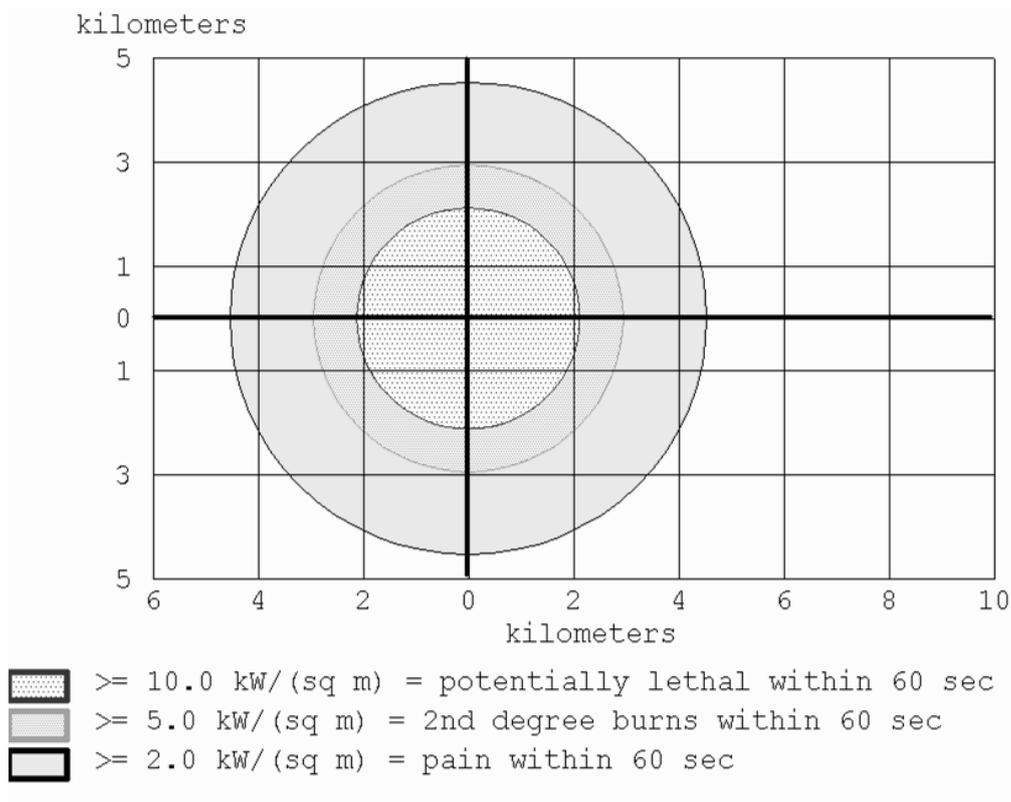


Fig. 5.11. Resultados gráficos de la explosión BLEVE

Los resultados numéricos son:

THREAT ZONE:

Threat Modeled: Thermal radiation from fireball

Red : 2.1 kilometers --- (10.0 kW/(sq m) = potentially lethal within 60 sec)

Orange: 2.9 kilometers --- (5.0 kW/(sq m) = 2nd degree burns within 60 sec)

Yellow: 4.5 kilometers --- (2.0 kW/(sq m) = pain within 60 sec)

5.6.2. ANÁLISIS USANDO MODELOS MATEMÁTICOS

Se hizo la simulación de consecuencias de un incendio flash usando el modelo de Raj y Emmons. Para el caso de la explosión de una nube de vapor se utilizó el modelo de TNT equivalente, posteriormente se calcularon los efectos físicos de una explosión tipo BLEVE y por último se hizo la simulación de la dispersión.

5.6.2.1. ANÁLISIS I. INCENDIO FLASH

Un incendio flash sucede cuando una nube de vapor inflamable encuentra un punto de ignición e inicia una deflagración. Tiene como efecto físico la alta radiación térmica en función de la posición del receptor.

Para conocer la cantidad de radiación a la que se encuentra sometido cierto receptor, es necesario conocer, primero, la geometría de la flama posible que se forma en el incendio flash.

El modelo elegido para la determinación de la geometría del incendio es el diseñado por Raj y Emmons. Este modelo considera al incendio como una flama turbulenta en dos dimensiones que se desplaza a una velocidad constante. Este modelo está basado en estas consideraciones:

- a) La velocidad del frente de flama es proporcional a la velocidad del viento.
- b) Cuando una nube de vapor se quema, en esta existe siempre un frente de flama que se mueve con velocidad constante y es seguido por una zona ya combustionada.

La metodología para el cálculo de los efectos físicos se muestra a continuación:

Dinámica del incendio

La dinámica del incendio flash está determinada por un modelo que relaciona la altura de la flama con la profundidad, composición y velocidad de la flama. Con base en observación experimental, se ha determinado que la velocidad de la flama está estrechamente relacionada con la velocidad del viento. Por otra parte la altura de la flama se puede calcular con la siguiente expresión:

$$H = 20D \left[\frac{S^2}{gd} \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right)^2 \frac{wr^2}{(1-w)^3} \right]^{1/3} \quad 5.1$$

donde:

H	Altura de la flama visible	[m]
D	Profundidad de la pluma	[m]
S	Velocidad de combustión	[m/s]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s ²]
ρ_0	Densidad de la mezcla combustible-aire	[kg/m ³]
ρ_a	Densidad del aire	[kg/m ³]
r	Fracción estequiométrica de masa del mezcla aire combustible	[-]

donde:

$$w = \frac{\phi - \phi_{st}}{\alpha(1 - \phi_{st})} \quad 5.2$$

$$w = 0; \text{ para } \phi < \text{ ó igual a } \phi_{st}$$

donde:

α	Fracción de expansión de presión para combustión estequiométrica (en el caso de hidrocarburos, vale 8)
ϕ	Composición de la mezcla combustible-aire (fracción volumen del combustible)
ϕ_{st}	Composición de la mezcla estequiométrica (fracción volumen del combustible)

Para determinar la posición y forma de la flama, se deberá determinar el tiempo de interés. La posición y forma de la flama dependen de la forma de la nube y de la localización de la ignición. Si la nube es una pluma, la forma de la flama se puede aproximar a un plano de sección constante que consume a la pluma en dirección longitudinal. Si por otro lado la forma de la nube es más circular, entonces la forma de la nube estará en función de la localización del punto de ignición. Una ignición central conlleva una flama circular, mientras que en el caso de una ignición en los límites conlleva una forma aplanada en la flama que va cambiando durante la propagación. La forma de la flama es importante para el cálculo de la radiación emitida. Como se verá en este ejemplo de aplicación la forma de la flama incide en un factor de vista, mismo que es una variable utilizada para el cálculo de la radiación.

La radiación recibida por un objeto depende del poder emisor de la flama que está radiando, la orientación de la flama con respecto al objeto y de la atenuación atmosférica.

$$q = FE\tau_a$$

dónde:

q	Radiación	[W/m²]
F	Factor de vista	[-]
E	Poder emisor del fuego por unidad de superficie	[W/m²]
τ_a	Coefficiente de atenuación debida a las condiciones atmosféricas	[-]

El único valor encontrado en la literatura para el poder emisor (E) de un incendio flash, es el que da Blackmore et al, quien indica que para el propano y el gas natural licuado, el valor del poder emisor es de 173 kW/m².

Se calculó la altura de la flama con los siguientes datos:

Peso molecular del aire	= 29 g/mol
Peso molecular del gas LP	= 49.7 g/mol

Se calculó la velocidad de la flama con base en la velocidad del viento.

$$S = 2.3 \cdot U_w = 2.3 \times 2 \text{ m/s} = 4.6 \text{ m/s}$$

Se calculó w en función de la composición estequiométrica, de la proporción de gas LP en la nube y de la fracción de expansión para una combustión estequiométrica α .

$$w = \frac{\phi - \phi_{st}}{\alpha(1 - \phi_{st})} = \frac{0.1 - 0.04}{8(1 - 0.04)} = 0.0078$$

Se calculó la altura de la flama sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 5.1.

$$H = 20 * 6.77 \left[\frac{4.6^2}{9.81 * 6.77} * 1.148 * \frac{0.0078 * 14.004^2}{(1 - 0.0078)^3} \right]^{1/3} = 77.56m$$

Hasta esta parte del proceso de cálculo se determinó la altura de la flama que provocaría un incendio flash de la nube de vapor. Para conocer el ancho de la flama fue necesario definir el instante para el cual se desea conocer la radiación. La razón de lo anterior es el hecho de que la forma de la flama depende de la localización de la ignición y de la forma que tiene la nube en ese instante. Dado que la flama viaja a una velocidad constante desde el sitio de ignición, la flama estará en función del diámetro que se tenga en la nube en cada lugar, por ello es necesario predecir la forma de la nube.

El gas LP es más pesado que el aire, por ello la dispersión inicial es radial, después viaja en conjunto en la dirección del viento mientras se dispersa. La forma de la nube es circular. Se hizo la suposición de que la ignición se produce de forma tangente al perímetro de la nube y que la flama viaja hacia el centro, tal como lo muestra la figura 5.12.

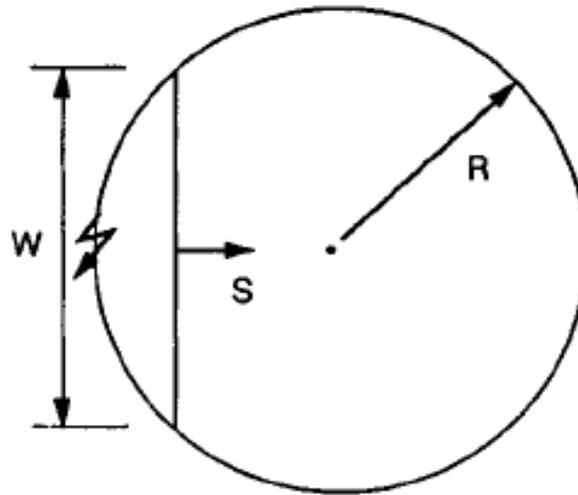


Fig. 5.12. Ignición de la nube de forma tangente

El ancho de la flama está en función del tiempo, acorde a la ecuación 5.2.

$$W = 2\sqrt{R^2 - (R - St)^2} \quad 5.2$$

Para conocer el comportamiento de la geometría de la flama se utiliza una hoja de cálculo en la que se determina el ancho de la flama en función del tiempo.

El factor de vista está en función, tanto de la ubicación, como de la orientación del receptor. Un incendio flash es susceptible de modelarse como un plano que viaja a velocidad constante.

El modelo matemático se basa en la suposición de que la radiación resultante del emisor será la suma de la radiación de dos áreas. La primera es la porción del área radiante que queda del lado izquierdo al corte que hace un plano que pasa por el centro del receptor y que contiene al eje perpendicular a la intersección del receptor y el plano del piso. La segunda es el área radiante restante.

Tabla 5.6. Determinación de la geometría de la flama a cada 3 segundos

Tiempo [s]	Altura de la flama	Ancho de la flama
0	77.56	0
3	77.56	191.3338444
6	77.56	267.7569047
9	77.56	324.4308247
12	77.56	370.5312942
15	77.56	409.6437477
18	77.56	443.6203783
21	77.56	473.5679043
24	77.56	500.2105157
27	77.56	524.0525165
30	77.56	545.4612727
33	77.56	564.7135911
36	77.56	582.0235047
39	77.56	597.559838
42	77.56	611.457799
45	77.56	623.8268991
48	77.56	634.7565203
51	77.56	644.3199205
54	77.56	652.5771679
57	77.56	659.5773192
60	77.56	665.3600529
63	77.56	669.9568941
66	77.56	673.3921294
69	77.56	675.6834762
72	77.56	676.8425519
75	77.56	676.8751731
78	77.56	675.7815032
81	77.56	673.5560556
84	77.56	670.1875558
87	77.56	665.6586513
90	77.56	659.9454523
93	77.56	653.0168757
96	77.56	644.833746
99	77.56	635.3475899
102	77.56	624.4990312
105	77.56	612.2156483
108	77.56	598.4090908
111	77.56	582.9711485
114	77.56	565.7682918
117	77.56	546.6339177
120	77.56	525.3570215
123	77.56	501.6650676
126	77.56	475.1969697
129	77.56	445.4581462
132	77.56	411.7405008
135	77.56	372.9664864
138	77.56	327.3442225
141	77.56	271.4423696
144	77.56	196.682892
147	77.56	46.51709363

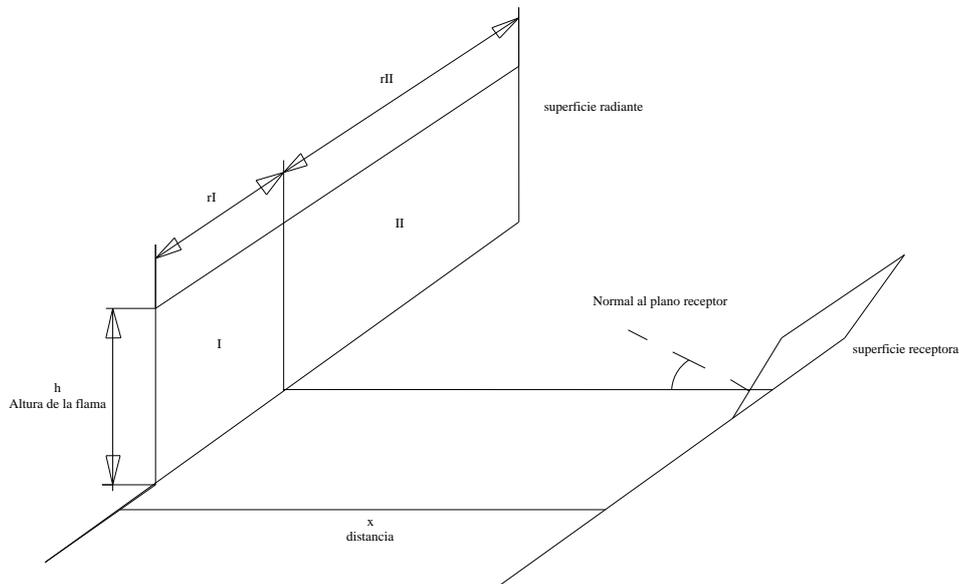


Fig. 5.13. Factor de vista para superficies emisoras planas

Para cada una de las superficies radiantes (I y II) se determinó la radiación máxima y posteriormente se sumaron, esto mediante las ecuaciones 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6.

$$h_r = \frac{h}{r} \quad 5.3$$

$$X_r = \frac{x}{r} \quad 5.4$$

$$A = \frac{1}{(h_r^2 + X_r^2)^{0.5}} \quad 5.5$$

$$B = \frac{h_r}{(1 + X_r^2)^{0.5}} \quad 5.6$$

Fue necesario determinar los factores de vista, tanto verticales como horizontales, para poder determinar el factor de vista máximo, mediante la obtención de la raíz de la suma de los cuadrados de dichos factores de vista.

En el caso de una superficie horizontal, el factor de vista está dado por la ecuación 5.7.

2011

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{X_r} \right) - AX_r \tan^{-1}(A) \right] \quad 5.7$$

En el caso de una superficie vertical, el factor de vista está dado por la ecuación 5.8.

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \left[h_r A \tan^{-1}(A) + \left(\frac{B}{h_r} \right) \tan^{-1}(B) \right] \quad 5.8$$

El factor de vista máximo se determina mediante la expresión 5.9.

$$F_{max} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2} \quad 5.9$$

Para este caso las áreas son iguales y las dos superficies, es decir el plano que representa al incendio y el plano a analizar son paralelos.

En función de lo anterior, la variable h (ver figura 5.13) será constante para todo momento, sin embargo, X variará (ver figura 5.13) en función del tiempo dado que la flama avanza, en el peor de los escenarios, hacia el receptor. La distancia varía acorde a la expresión 5.10.

En la gasera el sitio que presenta un mayor riesgo de pérdidas humanas es el área de oficinas, la cual se encuentra a una distancia perpendicular a la tangente del tanque más cercano de 43.272 metros. Sin embargo, la zona más cercana en donde se encuentra personal laborando está a 38m. En virtud de lo anterior, la distancia entre flama y receptor se obtiene en cada momento con base en la ecuación 5.10.

$$X = (38+R) - St \text{ [m]} \quad 5.10$$

La tabla 5.7 muestra las distancias calculadas entre flama y receptor a cada 3 segundos desde la ignición.

Tabla 5.7. Distancia entre flama y receptor a cada 3 segundos

tiempo [s]	altura de la flama	Ancho de la flama	Distancia X
0	77.56	0	376.5
3	77.56	191.3338444	362.7
6	77.56	267.7569047	348.9
9	77.56	324.4308247	335.1
12	77.56	370.5312942	321.3
15	77.56	409.6437477	307.5
18	77.56	443.6203783	293.7
21	77.56	473.5679043	279.9
24	77.56	500.2105157	266.1
27	77.56	524.0525165	252.3
30	77.56	545.4612727	238.5
33	77.56	564.7135911	224.7
36	77.56	582.0235047	210.9
39	77.56	597.559838	197.1
42	77.56	611.457799	183.3
45	77.56	623.8268991	169.5
48	77.56	634.7565203	155.7
51	77.56	644.3199205	141.9
54	77.56	652.5771679	128.1
57	77.56	659.5773192	114.3
60	77.56	665.3600529	100.5
63	77.56	669.9568941	86.7
66	77.56	673.3921294	72.9
69	77.56	675.6834762	59.1
72	77.56	676.8425519	45.3
75	77.56	676.8751731	31.5
78	77.56	675.7815032	17.7
81	77.56	673.5560556	3.9
84	77.56	670.1875558	-9.9

El factor de vista tanto horizontal como vertical está en función de X_r y h_r . La tabla 5.8 muestra los valores de X_r y h_r a cada 3 segundos de iniciada la ignición.

En la tabla 5.8 se observa que la flama tarda aproximadamente 84 segundos en llegar al receptor, desde el sitio de ignición hasta el receptor. Se calcularon los factores de vista horizontales y verticales para cada una de las áreas del plano radiante (izquierdo y derecho) y se determinó el valor del factor de vista máximo.

Tabla 5.8. Variables para la obtención del factor de vista a cada 3 segundos

tiempo [s]	altura de la flama	Ancho de la flama	Distancia X	Xr	hr	A	B	Fh	Fv	F
3	77.56	191.3338444	362.7	0.948	1.769	0.498	1.284	0.095	0.170	0.389
6	77.56	267.7569047	348.9	0.652	1.264	0.703	1.059	0.113	0.195	0.452
9	77.56	324.4308247	335.1	0.516	1.043	0.859	0.927	0.124	0.207	0.483
12	77.56	370.5312942	321.3	0.434	0.914	0.989	0.838	0.132	0.214	0.503
15	77.56	409.6437477	307.5	0.375	0.826	1.102	0.774	0.138	0.219	0.518
18	77.56	443.6203783	293.7	0.331	0.763	1.202	0.724	0.144	0.223	0.530
21	77.56	473.5679043	279.9	0.296	0.715	1.293	0.685	0.149	0.226	0.541
24	77.56	500.2105157	266.1	0.266	0.677	1.375	0.654	0.154	0.229	0.551
27	77.56	524.0525165	252.3	0.241	0.646	1.451	0.628	0.159	0.231	0.560
30	77.56	545.4612727	238.5	0.219	0.621	1.520	0.606	0.163	0.233	0.570
33	77.56	564.7135911	224.7	0.199	0.599	1.583	0.588	0.168	0.235	0.578
36	77.56	582.0235047	210.9	0.181	0.582	1.642	0.572	0.173	0.237	0.587
39	77.56	597.559838	197.1	0.165	0.566	1.695	0.559	0.178	0.239	0.595
42	77.56	611.457799	183.3	0.150	0.554	1.744	0.547	0.183	0.240	0.603
45	77.56	623.8268991	169.5	0.136	0.543	1.788	0.538	0.188	0.242	0.612
48	77.56	634.7565203	155.7	0.123	0.533	1.827	0.529	0.192	0.243	0.620
51	77.56	644.3199205	141.9	0.110	0.525	1.863	0.522	0.197	0.244	0.628
54	77.56	652.5771679	128.1	0.098	0.519	1.894	0.516	0.202	0.245	0.636
57	77.56	659.5773192	114.3	0.087	0.513	1.921	0.511	0.207	0.246	0.644
60	77.56	665.3600529	100.5	0.076	0.509	1.944	0.507	0.212	0.247	0.652
63	77.56	669.9568941	86.7	0.065	0.505	1.963	0.504	0.217	0.248	0.659
66	77.56	673.3921294	72.9	0.054	0.503	1.978	0.502	0.223	0.248	0.667
69	77.56	675.6834762	59.1	0.044	0.501	1.989	0.500	0.228	0.249	0.675
72	77.56	676.8425519	45.3	0.033	0.500	1.995	0.500	0.233	0.249	0.682
75	77.56	676.8751731	31.5	0.023	0.500	1.997	0.500	0.238	0.250	0.690
78	77.56	675.7815032	17.7	0.013	0.501	1.996	0.501	0.243	0.250	0.698
81	77.56	673.5560556	3.9	0.003	0.503	1.990	0.503	0.249	0.250	0.705
84	77.56	670.1875558	-9.9	-0.007	0.505	1.980	0.505	-0.246	0.250	0.702

El coeficiente de atenuación por acción del medio se obtuvo con la ecuación 5.11.

$$\tau_a = \log (14.1RH^{-0.108}x^{-0.13}) \quad 5.11$$

donde:

τ_a	Coeficiente de atenuación	[-]
X	Distancia entre el emisor y el receptor	[m]
RH	Humedad relativa	[%]

Con base en la información encontrada en el Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de Tlalnepantla de Baz, se estableció que la humedad relativa promedio diaria es de 55%. Es factible el cálculo del coeficiente de atenuación con base en el cálculo de la distancia entre el emisor y el receptor mostrado en la tabla 5.7. Los coeficientes de atenuación para cada tiempo se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Cálculo del Coeficiente de atenuación

Tiempo [s]	Distancia X	HR %	Ta
3	362.7	55	0.629
6	348.9	55	0.631
9	335.1	55	0.633
12	321.3	55	0.635
15	307.5	55	0.638
18	293.7	55	0.640
21	279.9	55	0.643
24	266.1	55	0.646
27	252.3	55	0.649
30	238.5	55	0.652
33	224.7	55	0.656
36	210.9	55	0.659
39	197.1	55	0.663
42	183.3	55	0.667
45	169.5	55	0.671
48	155.7	55	0.676
51	141.9	55	0.682
54	128.1	55	0.687
57	114.3	55	0.694
60	100.5	55	0.701
63	86.7	55	0.709
66	72.9	55	0.719
69	59.1	55	0.731
72	45.3	55	0.746
75	31.5	55	0.766
78	17.7	55	0.799
81	3.9	55	0.884
84	-9.9	55	#¡NUM!

Una vez calculado el coeficiente de atenuación solo falta conocer el poder emisor del gas LP. En kW/m^2 . En la bibliografía consultada solamente se encontró el valor del poder emisor del propano y del metano que oscila alrededor de 173 kW/m^2

Tabla 5.10. Cálculo de la radiación

Tiempo [s]	Distancia	HR [%]	Ta	E [kW/m ²]	q [kW/m ²]
3	362.7	55	0.629	173	42.274
6	348.9	55	0.631	173	49.278
9	335.1	55	0.633	173	52.839
12	321.3	55	0.635	173	55.235
15	307.5	55	0.638	173	57.113
18	293.7	55	0.640	173	58.727
21	279.9	55	0.643	173	60.197
24	266.1	55	0.646	173	61.586
27	252.3	55	0.649	173	62.932
30	238.5	55	0.652	173	64.258
33	224.7	55	0.656	173	65.580
36	210.9	55	0.659	173	66.911
39	197.1	55	0.663	173	68.260
42	183.3	55	0.667	173	69.636
45	169.5	55	0.671	173	71.047
48	155.7	55	0.676	173	72.503
51	141.9	55	0.682	173	74.012
54	128.1	55	0.687	173	75.589
57	114.3	55	0.694	173	77.248
60	100.5	55	0.701	173	79.012
63	86.7	55	0.709	173	80.912
66	72.9	55	0.719	173	82.994
69	59.1	55	0.731	173	85.337
72	45.3	55	0.746	173	88.077
75	31.5	55	0.766	173	91.504
78	17.7	55	0.799	173	96.427
81	3.9	55	0.884	173	107.871

Los valores calculados mostrados en la tabla 5.10, son susceptibles de graficarse en función del tiempo, obteniéndose la gráfica de la figura 5.14.

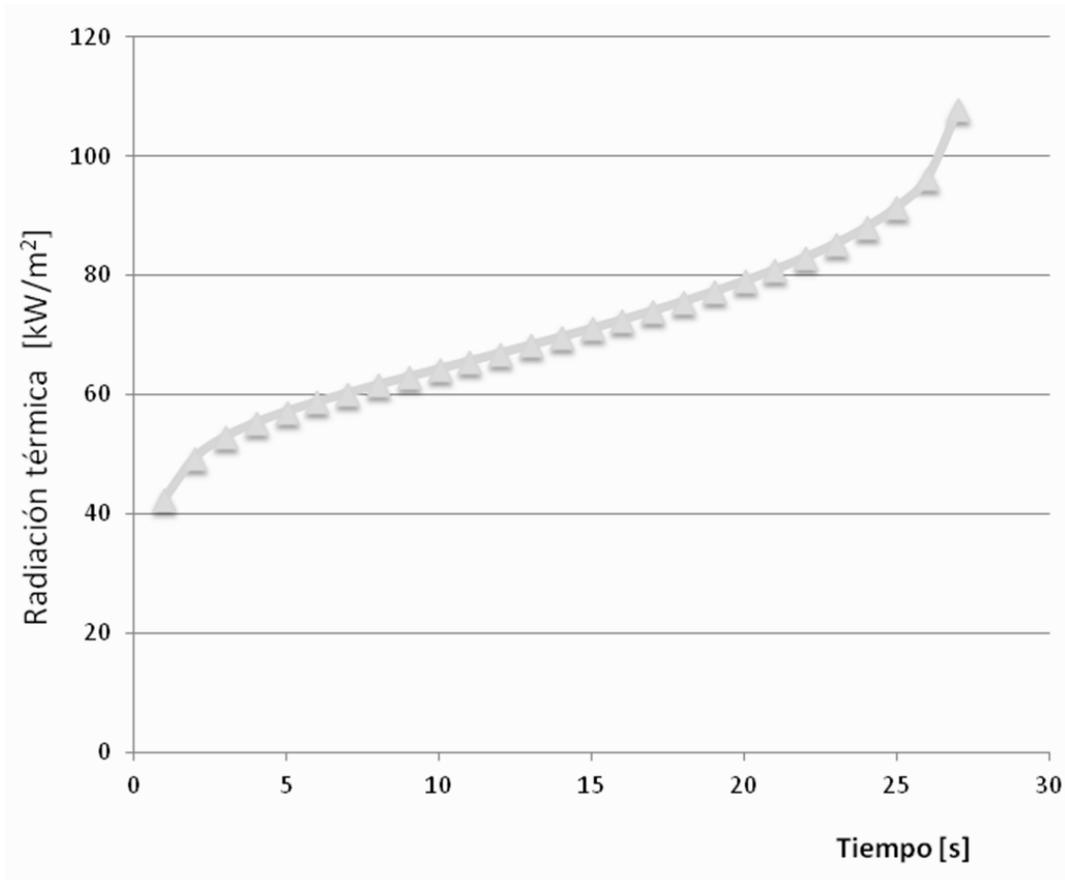


Fig. 5.14. Radiación térmica incidiendo en el receptor en función del tiempo

De la misma forma fue posible conocer la radiación térmica en cada punto en función de la posición, de la localización de la ignición y de la geometría de la flama.

5.6.2.2. ANÁLISIS 2. EXPLOSIÓN DE NUBE DE VAPOR

Una explosión de nube de vapor es uno de los efectos físicos que tiene menor probabilidad de ocurrencia. Ocurrirá siempre y cuando se presenten las condiciones adecuadas de turbulencia y confinamiento. Toda o parte de la nube debe de estar dentro de los límites de inflamabilidad.

Las variables de interés en el análisis de consecuencias de una explosión son:

1. El pico máximo de sobrepresión
2. El impulso de la fase positiva
3. Duración de la fase positiva

Para la predicción de los efectos físicos ocurridos en la gasera por un evento desfavorable se utilizó el modelo “TNT equivalente”.

El método “TNT equivalente” se basa en establecer una relación entre el combustible liberado y la cantidad de trinitrotolueno que provocaría los mismos efectos físicos. Este método permite predecir de forma fácil los daños ocasionados por la explosión de una nube de vapor, haciendo una equivalencia entre la masa de TNT y la cantidad de sustancia explosiva liberada.

La metodología para el cálculo se muestra a continuación:

Existen dos métodos posibles, el método de TNT equivalente y el de multienergía. El primero relaciona el poder explosivo de la nube con la cantidad de combustible presente en la nube, independientemente si éste se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad. Se hace la suposición que la carga de TNT se encuentra en el centro de la nube. El valor del factor de proporcionalidad se deduce de múltiples incidentes documentados. El método de TNT equivalente, por su origen, tiene varias limitaciones.

El segundo método (multienergía) se basa en el criterio de que la turbulencia es la variable más significativa en la determinación del poder explosivo de una nube de vapor. Una variable causante de turbulencia puede ser la salida de material con alta velocidad del contenedor, o bien, de una tubería.

En este apartado se hace la simulación de las consecuencias generadas por la explosión de una nube de vapor provocada por la salida de gas LP de uno de los tanques de almacenamiento. Se considera el escenario más desfavorable, es decir, el tanque está al 85% de su capacidad y se ha fugado la totalidad del contenido.

Variables de partida:

Volumen del contenido	= 212,500 L
Contenido:	= gas LP
Calor de combustión del propano	= 46.3 MJ/kg
Calor específico promedio del propano líquido	= 2.41 kJ/kg/K
Calor latente del propano	= 410 kJ/kg
Temperatura de ebullición del propano a Temp. Amb	= 231 K
Temperatura ambiente	= 295 K

Así entonces, aplicando el método “TNT equivalente” se tiene:

1. Determinación de la carga equivalente

Como ya se ha establecido, es necesario hacer una equivalencia entre la cantidad de combustible presente en la nube con la cantidad de trinitrotolueno que provocaría los mismos efectos. Se hace la suposición que la carga equivalente se encuentra en el centro de la nube. Es necesario conocer la fracción flash presente, con base en los datos termodinámicos de la sustancia, utilizando la ecuación 5.12.

Esta ecuación sirve para conocer la cantidad de combustible presente en la nube susceptible de contribuir con la ignición. La fracción flash se obtiene por medio de las condiciones termodinámicas de la mezcla.

$$F = 1 - e^{\left[\frac{-C_p \Delta T}{L}\right]} \quad 5.12$$

donde:

F	Fracción flash de la mezcla	[kg]
C_p	Calor específico promedio	[kJ/kg K]
ΔT	Diferencia de temperatura entre el punto de ebullición y la temperatura del contenedor	[K]
L	Calor latente de vaporización	[kJ/kg]

El peso del combustible en la nube es igual a la cantidad de veces la fracción flash del combustible liberado. Para considerar la formación de aerosoles y spray el resultado se multiplica por 2.

Así sustituyendo valores en la ecuación 5.12, se obtuvo:

$$F = 1 - e^{\left[\frac{-2.41 \cdot (295 - 231)}{410}\right]} = 0.274 \text{ [kg]}$$

El valor de la fracción flash multiplicado por la cantidad de litros de gas presentes en el contenedor por la densidad de la sustancia en estado líquido representa la masa de gas presente en la nube, tal como lo muestra la siguiente expresión:

$$W_f = 0.274 * 212,500[L] * 2 * 0.5232 \left[\frac{kg}{L} \right] = 60,950.6 [kg]$$

Conocido el peso del combustible en la nube es posible conocer el peso equivalente de TNT, esto a partir de la ecuación 5.13.

$$W_{TNT} = \alpha W_C \frac{\Delta H_C}{\Delta H_{TNT}} \quad 5.13$$

El valor de α es de 0.03, sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación se obtuvo el peso equivalente de TNT.

$$W_{TNT} = 0.03 * 60950.6 \frac{45.8}{4.68} = 17894.47[kg]$$

Con el valor de la masa equivalente de TNT el siguiente paso fue conocer la distancia normalizada y después, utilizando los gráficos de las figuras 5.15 a 5.17, se obtuvo la sobrepresión, la duración de la fase positiva y el impulso.

En este caso, así como en el análisis del incendio flash, fue de interés conocer los efectos provocados en las oficinas de la gasera, mismas que se encuentran a una distancia de 38 metros.

Una vez que fue conocida la masa de TNT equivalente se determinó el valor del pico de sobrepresión generado en un punto, utilizando el gráfico mostrado en la figura 5.15. La distancia normalizada se calculó dividiendo el valor de la distancia, entre el punto de interés y el centro de la nube de vapor, entre la raíz cúbica de la cantidad de TNT calculado, tal como lo expresa la ecuación 5.14.

$$dn = \frac{d}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad 5.14$$

Sustituyendo los valores de la distancia y el obtenido en la ecuación 5.14, se obtuvo la distancia normalizada.

$$dn = \frac{38}{\sqrt[3]{20,258.02}} = 1.394$$

Como se observa en la figura 5.15, el valor del pico de sobrepresión obtenido a partir de la distancia normalizada, es de 5 bares.

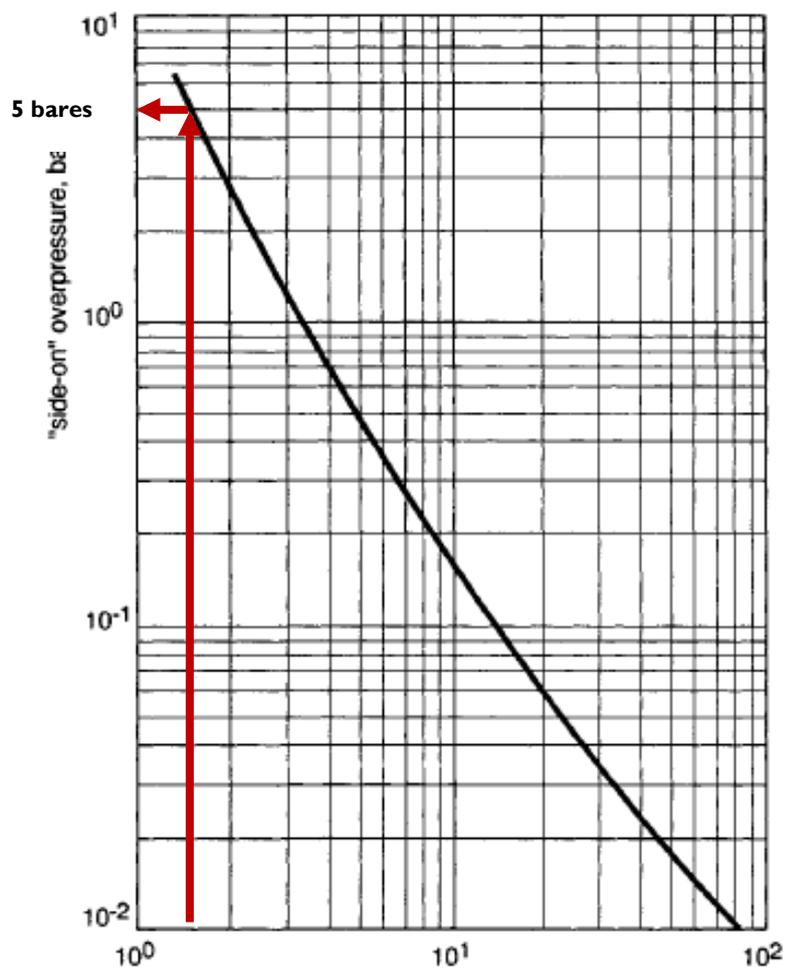


Fig. 5.15. Valor de la sobrepresión en función de la distancia normalizada

Adicionalmente Crowl, Daniel A. en el libro “Chemical Process Safety” desarrolla la ecuación 5.15 a partir del gráfico de la figura 5.15.

$$\frac{P_0}{P_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{d_n}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{d_n}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{d_n}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{d_n}{1.35} \right)^2}} \quad 5.15$$

Esta ecuación es más sencilla de programarse en la computadora, ya que contiene como única variable independiente la distancia normalizada, misma que a su vez, solamente depende de la distancia al centro de la ignición y de la masa equivalente de TNT.

En la tabla 5.11 se muestran las sobrepresiones ejercidas para distintas distancias a partir del centro de la nube.

Considerando los niveles de daño en estructuras en función de la sobrepresión, a tan solo 0.7 bares la destrucción de los edificios es total, por ello, se asegura que los efectos físicos provocados por la onda de choque ocasionada por la explosión de una nube de vapor, producto de la liberación del contenido total de uno de los tanques, es fatal a una distancia de 38m.

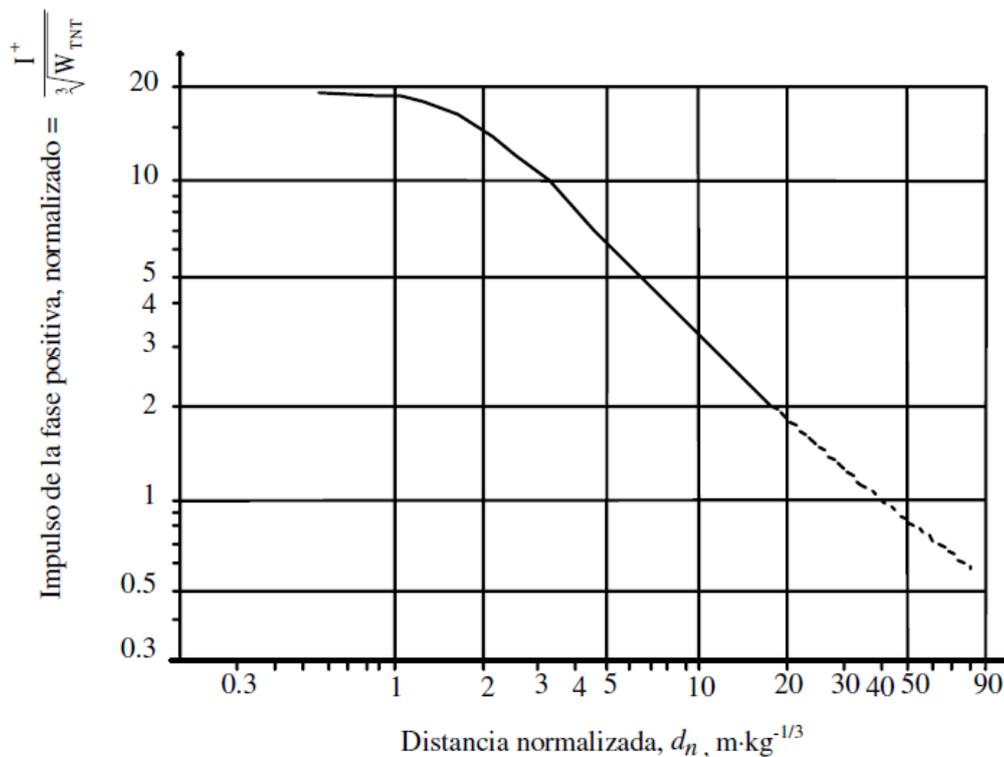


Fig. 5.16. Valor del impulso de la fase positiva en función de la distancia normalizada

Tabla 5.11. Pico de sobrepresión en función de la distancia normalizada

Distancia al centro de la nube [m]	Distancia normalizada	Pico de Sobrepresión [bar]
1	0.038232004	914.5935079
2	0.076464007	608.2713835
3	0.114696011	426.7049225
4	0.152928015	316.4535486
5	0.191160018	244.0764638
6	0.229392022	193.570989
7	0.267624026	156.7578859
8	0.305856029	129.0615822
9	0.344088033	107.716917
10	0.382320037	90.94926606
20	0.764640073	25.14688119
38	1.45281614	5.985256311
40	1.529280147	5.290545895
50	1.911600184	3.059865924
60	2.29392022	1.938370761
70	2.676240257	1.314238028
80	3.058560294	0.939114707
90	3.440880331	0.69956653
100	3.823200367	0.538911182
200	7.646400735	0.105990741
300	11.4696011	0.044003835
400	15.29280147	0.024095325
500	19.11600184	0.015220629
600	22.9392022	0.010493168
700	26.76240257	0.007674993
800	30.58560294	0.005859045
900	34.40880331	0.004620062
1000	38.23200367	0.003736844
2000	76.46400735	0.000929871
3000	114.696011	0.000412917
4000	152.9280147	0.000232195
5000	191.1600184	0.000148584
6000	229.392022	0.000103175
7000	267.6240257	7.57989E-05
8000	305.8560294	5.80318E-05
9000	344.0880331	4.58513E-05
10000	382.3200367	3.7139E-05

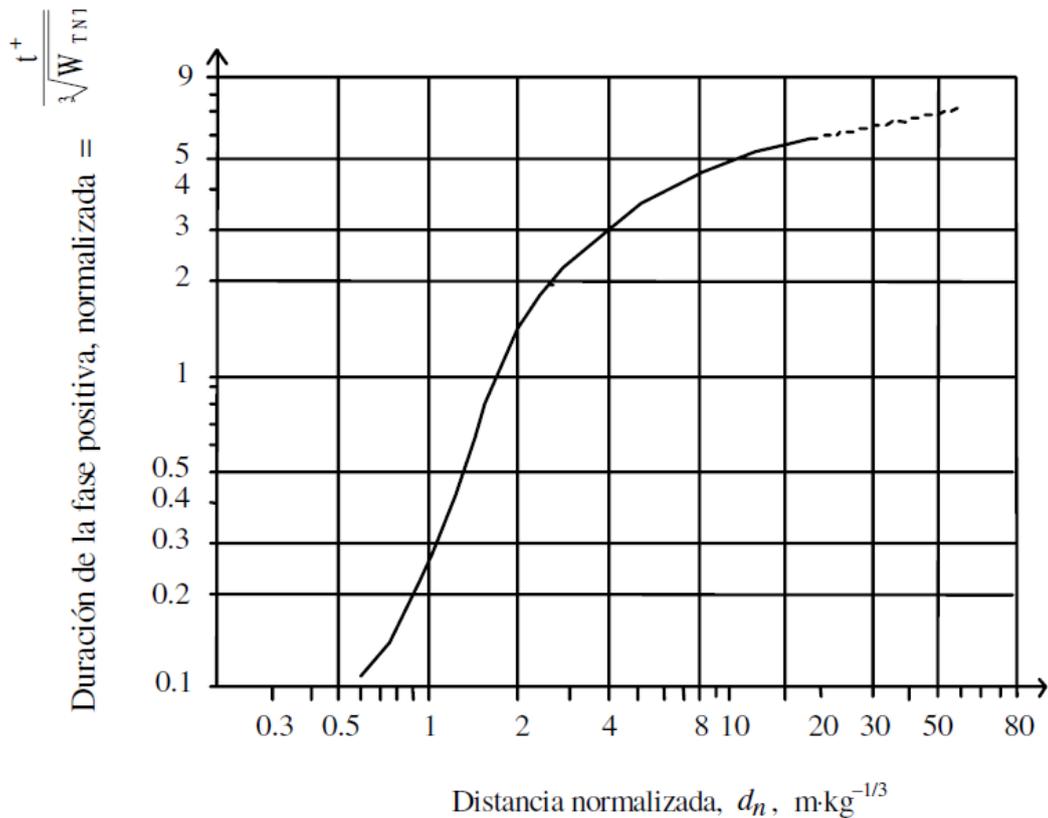


Fig. 5.17. Valor de la duración de la fase positiva en función de la distancia normalizada

5.6.2.3. ANÁLISIS 3. EXPLOSIÓN BLEVE

En el caso de que por algún motivo los rociadores de agua que se accionan al incidir una flama en el exterior de un tanque no funcionen, entonces sucederá, un aumento en la temperatura del gas LP. Esto traerá como consecuencia el aumento de la presión en el interior. El riesgo de que esto ocurra es muy pequeño ya que la probabilidad de ocurrencia es mínima, sin embargo, como se ha establecido desde el inicio de este documento, para el análisis de consecuencias se debe de hacer la suposición de los escenarios más desfavorables, para así calcular las consecuencias más severas.

Una explosión del tipo BLEVE, es una súbita expansión de la sustancia que se encuentra en fase líquida por acción de la pérdida de presión. Esto puede ser producto de la ruptura del contenedor por sobrepasar el límite mecánico. O simplemente por el hecho de elevar la temperatura del gas LP lo que provoca

el aumento de la presión interna provocando el accionamiento de las válvulas de alivio de sobrepresión disminuyendo súbitamente la presión interna. Si este cambio de presión lleva a la sustancia por debajo del límite de sobrecalentamiento para esa presión, entonces todo el contenido cambiará a la fase gaseosa provocando la explosión inmediata, lo que conlleva la generación de una onda de choque y un impulso susceptibles de provocar daños a estructura y pérdidas humanas.

Adicional a la generación de la explosión, si la nube de gas formada se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad, existe el riesgo de ocurrencia de una bola de fuego de grandes dimensiones que provocará radiación en los alrededores.

Se simularon las consecuencias por la explosión BLEVE de uno de los tanques, suponiendo un volumen de gas LP de 85% del volumen del contenedor, mismo que se encuentra envuelto en llamas. El cálculo de la radiación que se produce por la subsecuente bola de fuego se calculó posteriormente.

Tal como se muestra en la tabla 5.7 la temperatura de ebullición del gas LP es de 240.5 K y la temperatura crítica es de 369.8 K. Se hace la suposición de condiciones promedio, es decir, que la temperatura ambiente es de 295K. Se puede inferir que alcanzar la temperatura crítica es relativamente sencillo al estar el contenedor expuesto a un incendio externo. A continuación se describen los pasos utilizados para la predicción de efectos físicos:

Paso 1. Determinación de datos de partida:

La presión máxima es de 1.21 veces la presión a la que se acciona los sistemas de seguridad. Por ello la presión absoluta del tanque se obtiene de la siguiente forma:

$$P_1 = 1.21 * 1.5MPa + 0.073 = 1.888MPa$$

Los datos utilizados son:

Volumen del tanque	=250,000 [L]
Forma del tanque:	=cilíndrica horizontal
Presión atmosférica local	=0.73 bar
Presión máxima de seguridad	=1.5 MPa
Temperatura de accionamiento	=339K
Volumen ocupado por líquido	=85%

Tabla 5.12. Datos termodinámicos del Propano

T_1 (K)	p_1 (MPa)	h_f (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)	v_f (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	s_f (kJ/kg.K)	s_g (kJ/kg.K)
327.7	1.90	674.31	948.32	2.278×10^{-3}	0.0232	4.7685	5.6051
230.9	0.10	421.27	849.19	1.722×10^{-3}	0.419	3.8721	5.7256

Fue necesario determinar la energía de explosión obteniendo, en primer lugar, el trabajo específico que tiene la sustancia en la fase líquida y gaseosa en el momento de la falla, esto con ayuda de las características termodinámicas.

Una vez que fue determinada la energía de explosión se determinó el rango de explosión, involucrando la distancia entre la fuente y el receptor para posteriormente, con ayuda de los gráficos de las figuras 5.19 y 5.20, determinar la sobrepresión y el impulso.

Para este cálculo se siguieron dos metodologías; en la primera se determinó la energía de la explosión por medio de las características termodinámicas del propano obtenidas de la bibliografía y mostradas en la tabla 5.13, haciendo la suposición de que la sustancia involucrada en la explosión es únicamente propano, sin embargo, el gas LP, está formado por propano y butano en una proporción 80% y 20%, respectivamente en la mezcla de vapor. La mezcla líquida está compuesta en un 50% de cada uno de los componentes. La segunda metodología involucró la obtención de la energía de explosión, utilizando el gráfico mostrado en la figura 5.18.

El primer método el cual se basa en determinar las energías internas se muestra a continuación:

Para determinar la energía interna en ambas fases, suponiendo únicamente propano, se utilizó la ecuación 5.16

$$h = u + pv \quad 5.16$$

donde:

h	Entalpía por unidad de masa	[J/kg]
u	Energía interna específica	[J/kg]
p	Presión absoluta al momento de falla	[N/m²]
v	Volumen específico	[m³/kg]

Para determinar las energías internas específicas de cada una de las fases, los valores de la tabla 5.7 se sustituyeron en la ecuación 5.16

Para determinar la energía interna del líquido saturado se sustituyen los valores en la ecuación 5.16.

$$u = h - pv$$

$$u = 674.31E3 - 1.888E6 \left[\frac{N}{m^2} \right] 0.002278[m^3/kg]$$

$$u = 670,009.14E3[J/kg]$$

Para determinar la energía interna del vapor saturado se sustituyen los valores en la ecuación 5.16.

$$u = h - pv$$

$$u = 948.32E3 - 1.888E6 [N/m^2] * 0.0232[m^3/kg]$$

$$u = 904,518.4 [J/kg]$$

Es necesario obtener la energía interna específica después de la expansión a presión ambiental (u_2) y se calculó con la ecuación 5.17.

$$u_2 = (1 - X)h_f + Xh_g - (1 - X)p_0v_f - Xp_0v_g \quad 5.17$$

donde:

u_2	energía interna específica después de la expansión	[J/kg]
X	proporción de vapores	[1]

Fue necesario obtener la proporción de vapores con la expresión 5.18.

$$X = \frac{S_1 - S_f}{S_g - S_f} \quad 5.18$$

2011

donde:

$$S \quad \text{Entropía específica} \quad [1]$$

En la ecuación 5.18, el subíndice 1 significa el estado inicial, f se refiere al líquido y la g al gas.

Se calculó de entropía específica del líquido saturado sustituyendo los valores correspondientes de la tabla 5.12 en la ecuación 5.18.

$$X = \frac{4.7685 - 3.8721}{5.7256 - 3.8721}$$

$$X = 0.4836$$

Así mismo, se sustituyeron los valores en la ecuación de la energía interna u_2

$$u_2 = (1 - 0.4836)421.27E3 + 0.4836 X 849.19E3 \\ - (1 - 0.4836)0.073E6 X 1.722E - 3 - 0.4836 X 0.073E6 X 0.419$$

$$u_2 = 613,355.32 [J/kg]$$

Se obtuvo la proporción de vapores para el vapor saturado sustituyendo en la ecuación 5.18.

$$X = \frac{5.6051 - 3.8721}{5.7256 - 3.8721}$$

$$X = 0.935$$

Por último, sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación de la energía interna u_2 .

2011

$$u_2 = (1 - 0.935) \times 421.27E3 + 0.935 \times 849.19E3 - (1 - 0.935) \times 0.073E6 \times 1.722E - 3 - 0.935 \times 0.073E6 \times 0.419$$

$$u_2 = 792,768.18 \text{ [J/kg]}$$

Se obtuvo el trabajo específico realizado por la expansión con la ecuación 5.19.

$$e_{ex} = u_1 - u_2 \quad 5.19$$

donde:

e_{ex}	Trabajo de expansión	[J/kg]
----------	----------------------	--------

El trabajo específico para el líquido saturado se calculó sustituyendo valores en la ecuación 5.19.

$$e_{ex} = 670,009.14 - 613,355.32$$

$$e_{ex} = 56,653.82 \text{ [J/kg]}$$

El trabajo específico para el vapor saturado se calculó sustituyendo valores en la ecuación 5.19.

$$e_{ex} = 904,518.4 - 792,768.18$$

$$e_{ex} = 111,758.22 \text{ [J/kg]}$$

Con los trabajos específicos de expansión se obtuvo la energía de explosión usando la ecuación 5.20.

$$E_{ex} = 2 * e_{ex} * m1 \quad 5.20$$

donde:

E_{ex}	Energía de expansión	[J]
m	Masa de la sustancia	[kg]
e_{ex}	Trabajo de expansión	[J/kg]

Ahora bien, para el líquido saturado, se tiene:

$$E_{ex} = 2 * 53,653.82 * 0.85 * \frac{250[m^3]}{2.278E - 3[m^3/kg]}$$

$$E_{ex} = 10,010.041 \text{ MJ}$$

Y por último se sustituyen los valores para el vapor saturado:

$$E_{ex} = 2 * 111,758.22 * 0.15 * 250[m^3]/0.0232[m^3/kg]$$

$$E_{ex} = 361.287 \text{ MJ}$$

Suponiendo la condición más desfavorable, misma que se presenta cuando la energía de expansión del vapor y del líquido son simultáneas, entonces se suman las dos energías:

$$E_{ex} = 361.287 + 10,010.041 = 10,371.328 \text{ MJ}$$

Ahora bien, se aplicó el método 2, utilizando el gráfico de la figura 5.18.

El gas LP está formado por propano y butano en una proporción de 80 y 20 % respectivamente. Para determinar el trabajo específico de expansión es necesario conocer la temperatura de la falla. Usualmente la temperatura a la cual se acciona la válvula de alivio es 339 K. El propano tiene una temperatura máxima límite de sobrecalentamiento de 326 K y el butano de 377 K. Solamente una de ellas se encuentra por encima de la temperatura crítica, sin embargo, esto es suficiente para provocar la onda de choque.

A la temperatura de falla se determinan las energías de expansión para ambos componentes para sus dos fases con ayuda de la figura 5.18.

El trabajo específico hecho por los dos fluidos a la temperatura de la falla se determinó con la figura 5.18.

Butano líquido saturado	21	[MJ/m³]
Vapor de butano saturado	2.3	[MJ/m³]
Propano líquido saturado	30	[MJ/m³]
Vapor de propano saturado	7.8	[MJ/m³]

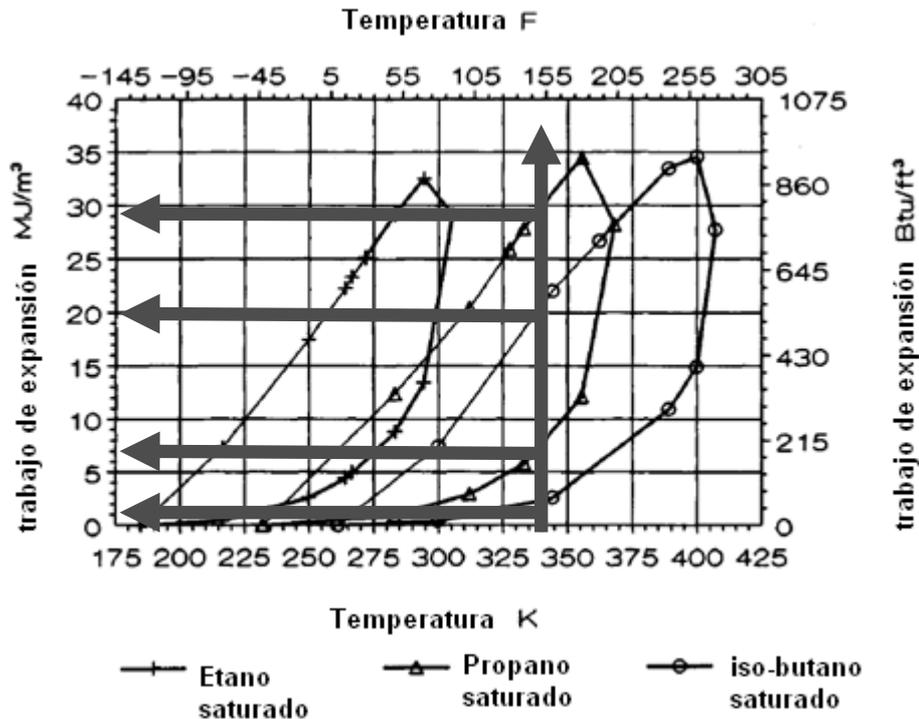


Fig. 5.18. Energía de expansión para distintos gases

Se obtuvo la energía total de expansión utilizando las proporciones de la mezcla y los trabajos específicos.

$$E_{ex} = 2 * e_{ex} * m1$$

Para el propano líquido:

$$E_{ex} = 2 * 30 \left[\frac{MJ}{m^3} \right] * 50\% * 250[m^3] * 85\% = 6375 MJ$$

Para el vapor de propano:

$$E_{ex} = 2 * 7.8 \left[\frac{MJ}{m^3} \right] * 80\% * 250[m^3] * 15\% = 468MJ$$

Para el butano líquido:

$$E_{ex} = 2 * 21 \left[\frac{MJ}{m^3} \right] * 50\% * 250[m^3] * 85\% = 4,462.5MJ$$

Para el vapor de butano:

$$E_{ex} = 2 * 2.3 \left[\frac{MJ}{m^3} \right] * 20\% * 250[m^3] * 15\% = 34.5 MJ$$

2011

La condición más desfavorable es que los cuatro componentes se expandan al mismo tiempo, en ese caso se suman las energías.

$$E_{ex-total} = 6375 + 468 + 4,262.5 + 34.5 = 11,340 MJ$$

Una vez que se determinó la energía total de expansión, para conocer los efectos físicos que inciden en un receptor, se determinó el rango del receptor con la ecuación 5.21.

$$\bar{R} = r \left[\frac{p_0}{E_{ex}} \right]^{1/3} \quad 5.21$$

El receptor se supuso a 38 metros de distancia. Se sustituyeron valores en la ecuación 5.21 para el tanque únicamente lleno de propano.

$$\bar{R} = 38 \left[\frac{0.073E6}{10,371.328E6} \right]^{1/3}$$
$$\bar{R} = 0.728$$

Para el tanque en las condiciones de trabajo obtenidas con el segundo método se obtuvo el rango del receptor.

$$\bar{R} = 38 \left[\frac{0.073E6}{11,340 E6} \right]^{1/3}$$
$$\bar{R} = 0.707$$

Sobrepuestos los valores de los radios en la figura 5.19 y 5.20, se obtuvieron los valores de sobrepresión e impulso. Se observa que para un valor de $R=0.707$, el pico de sobrepresión adimensional es de 0.96.

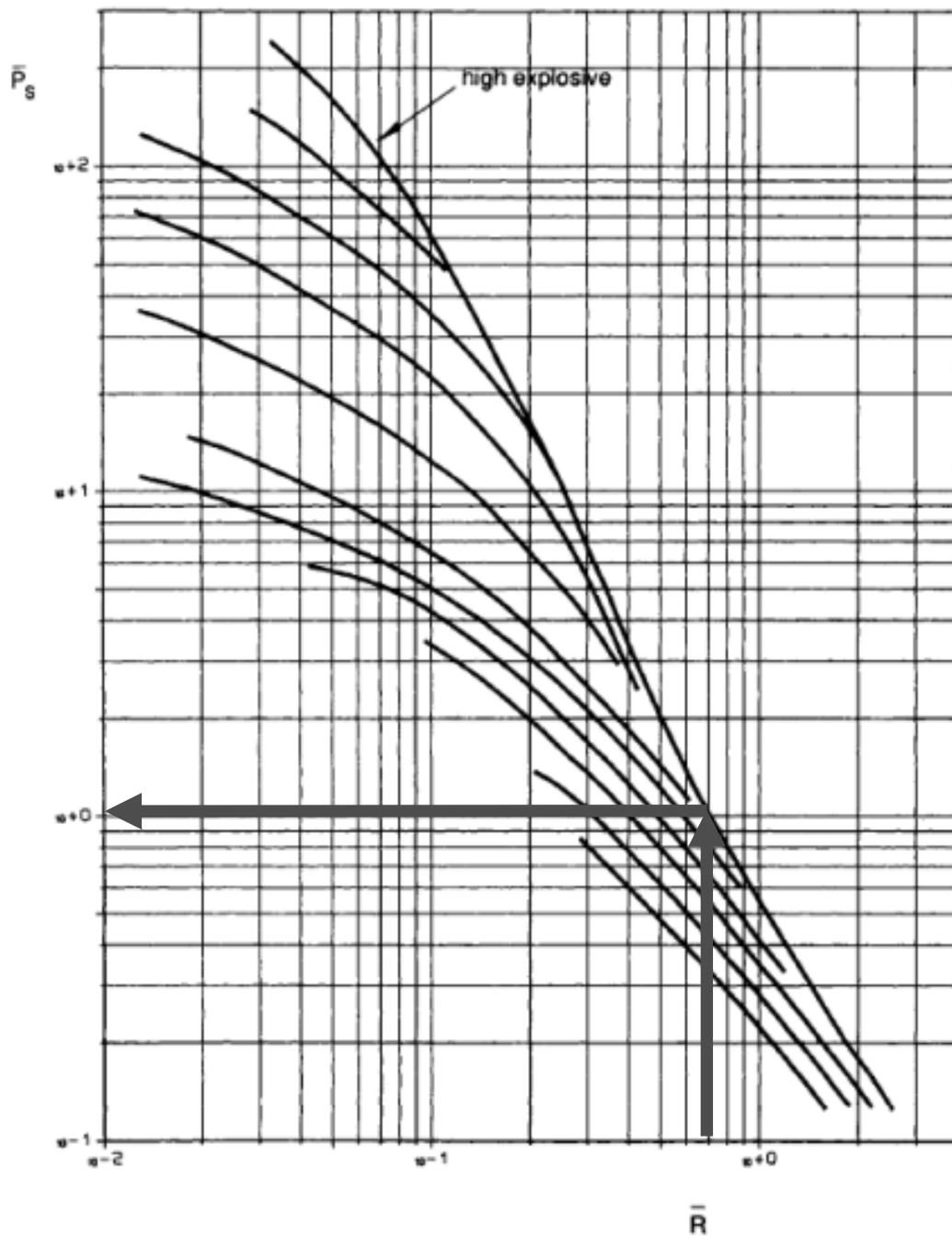


Fig. 5.19. Determinación del pico de sobrepresión a partir del valor del radio

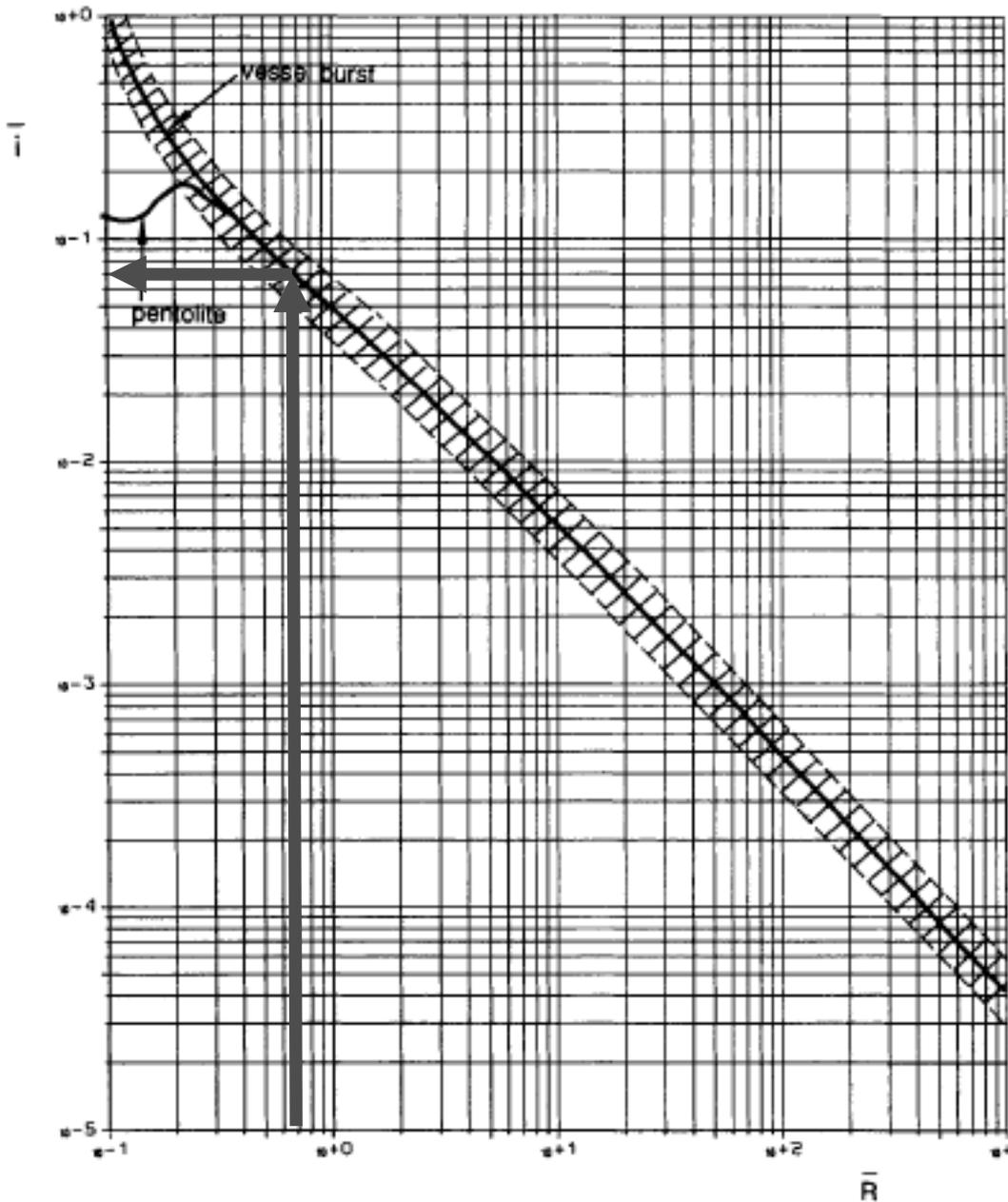


Fig. 5.20. Obtención del impulso adimensional a partir del valor del radio

Al sustituir el valor de $R = 0.707$ en la figura 5.20, se observó que el valor del impulso adimensional fue de 0.07.

Debido a la forma del contenedor, fue necesario ajustar los valores adimensionales del pico de sobrepresión y del impulso con los valores indicados en la tabla 5.13.

Tabla 5.13. Factores de ajuste para formas cilíndricas

\bar{R}	Multiplicar por	
	\bar{P}_s	\bar{I}
<0.3	4	2
$\geq 0.3 \leq 1.6$	1.6	1.1
$> 1.6 \leq 3.5$	1.6	1
>3.5	1.4	1

Dado que $R = 0.707$, fue necesario multiplicar el pico de sobrepresión por 1.6 y el impulso por 1.1.

$$\bar{P}_s = 1.6 * 0.96 = 1.536$$

$$\bar{I} = 1.1 * 0.07 = 0.077$$

Con los valores corregidos se obtienen los efectos físicos:

$$p_s - p_0 = \bar{P}_s * p_0$$

$$i_s = \frac{I p_0^{2/3} * E_{ex}^{1/3}}{a_0}$$

donde:

a_0 =velocidad del sonido local [m/s]

Sustituyendo:

$$p_s - p_0 = 1.536 * 0.73[bar] = 1.1213[bar]$$

$$i_s = \frac{0.077 * 0.073E6^{2/3} * 10,371.328E6^{1/3}}{340}$$

$$i_s = 862.658 [Pa s]$$

5.6.3. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE PSC.

Uno de los resultados esperados del presente estudio fue la construcción de un software para la predicción de consecuencias, usando los modelos matemáticos más convenientes. El software construido se nombró PSC (acrónimo de la frase Programa para la Simulación de Consecuencias).

El software PSC se programó por el autor a la par de la investigación y análisis de los modelos matemáticos mostrados en los capítulos 2, 3 y 4.

La construcción de PSC representó un reto mayúsculo, ya que aunque se contaba con conocimientos básicos de simulación de fenómenos físicos, no se contaba aún con los conocimientos de programación suficientes para abordar directamente la realización del software. Se recurrió al aprendizaje de programación para cumplir con este reto.

5.6.3.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

PSC está construido con lenguaje de programación C, las ventanas fueron construidas con API's de Windows y el compilador utilizado fue Pelles C.

PSC es una herramienta útil para dar respuesta a un evento extraordinario ocurrido en un proceso industrial o durante el transporte de sustancias peligrosas. Además, PSC puede utilizarse para el análisis de riesgo en la simulación de consecuencias. Por último, como herramienta para la elaboración de programas de respuesta y prevención de eventos extraordinarios en una industria ya establecida.

PSC puede predecir las consecuencias de la liberación de una sustancia peligrosa que tiene como efecto físico la dispersión, tanto de gases ligeros como densos, también simula explosiones.

PSC es perfectible ya que aún no cuenta con la programación de incendios.

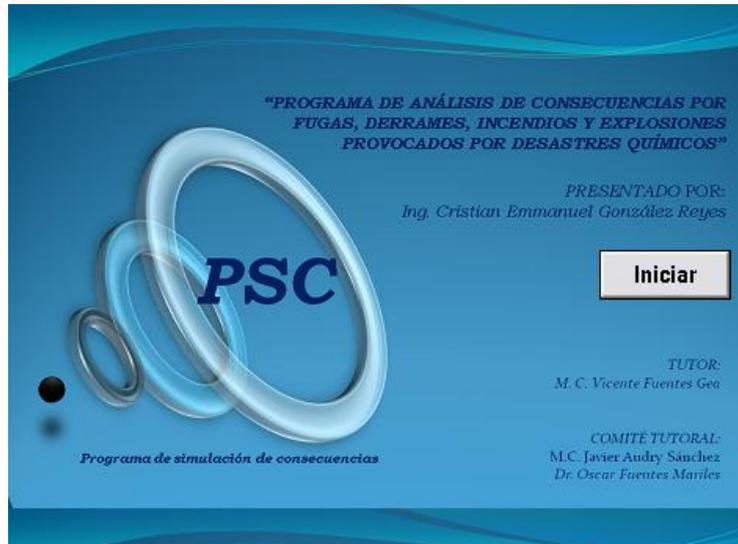


Fig. 5.21. Pantalla de inicio de PSC

5.6.3.1. SIMULACIÓN DE DISPERSIÓN

El gas LP tiene un peso molecular mayor al del aire, por ello al ser liberado al ambiente presenta un comportamiento acorde al de un gas denso. Conociendo esta característica, al predecirse los efectos físicos por la liberación del contenido de uno de los tanques de almacenamiento de la gasera, el análisis deberá de hacerse con el uso de modelos propios de gases densos. En ese sentido PSC utiliza el modelo SLAB para el análisis de dispersión de un gas denso.

PSC cuenta con una base de datos de sustancias peligrosas y sus características termodinámicas. Dicha información se almacena en el software, lo cual facilita el acceso a las mismas para simulaciones posteriores. La figura 5.22 muestra la ventana de la base de datos y las características de la sustancia solicitadas.



Fig. 5.22. Ventana de base de datos

PSC contiene un menú para la elección del tipo de consecuencia a analizar. Se puede observar en la figura 5.23 que PSC analiza explosiones y dispersión de gases ligeros y densos. Para el caso del análisis de la liberación instantánea del contenido de un tanque de almacenamiento de la gasera, se decidió realizar la simulación de gas denso.

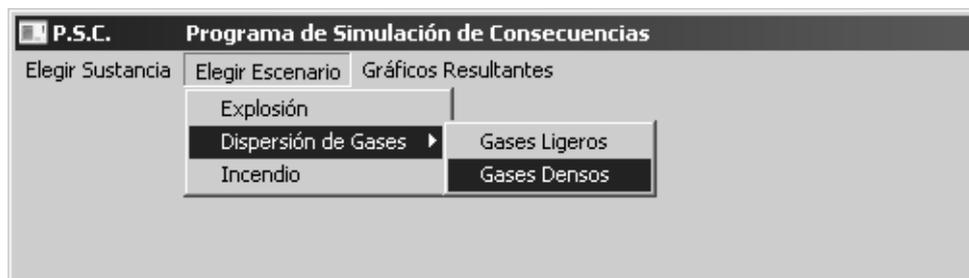


Fig. 5.23 Menú principal de PSC

Después de la elección del escenario, PSC muestra una ventana, misma en la que solicita que el usuario introduzca datos adicionales para la generación de resultados gráficos. Estos datos son: 1) propiedades de la sustancia, 2)

propiedades de la liberación, 3) parámetros de cálculo, 4) altura de los planos de interés y 5) los parámetros meteorológicos. La figura 5.24 muestra la ventana de datos, misma que fue llenada con los datos del escenario propuesto.

Default	Clase	Valor	Descripción
A:F	1.0 - 6.0	Inestable-Estable	

Fig. 5.24. Solicitud de datos para la modelación de gas denso en PSC

Una vez ingresados los datos solicitados por PSC, este realiza la simulación.

PSC genera resultados gráficos mostrando líneas de igual concentración, mismas que de acuerdo a su color representan una concentración. Estas son dibujadas sobre una imagen de fondo que muestra el lugar de interés. La imagen a utilizar debe de estar referida a una escala.

PSC genera resultados gráficos sobre cualquier imagen que el usuario cargue.

Para obtener una imagen de buena calidad, de fácil acceso, de forma gratuita y con información de escala, se recomienda utilizar el software Google earth. Este software es de dominio público y contiene imágenes satelitales de cualquier lugar del mundo con calidad suficiente.

Siguiendo la recomendación anterior la imagen utilizada por PSC para el análisis de consecuencias por la liberación de gas LP se tomó del software Google earth. La figura 5.25 muestra la imagen que se utilizó para la simulación de las consecuencias en la gasera. Se recomienda al usuario que la fuente del efecto físico quede en el centro de la imagen, tal como en este caso en el que los diez tanques con los que cuenta la gasera se muestran en el centro. Google earth muestra una leyenda de escala en la base de la imagen. Este número es importante identificarlo y conservarlo, ya que se utilizará posteriormente para escalar los resultados.

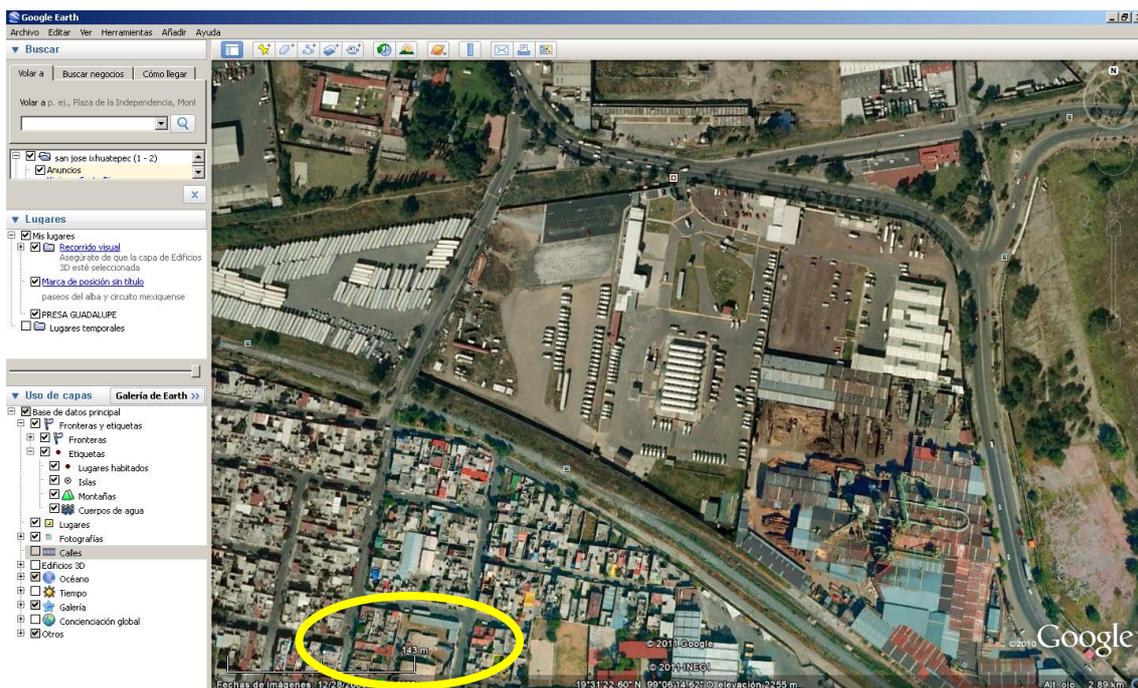


Fig. 5.26 Imagen aérea de la gasera tomada de Google earth

Una vez encontrado el sitio de interés en Google earth, colocada la fuente en el centro e identificada la leyenda de escala, entonces es necesario guardar dicha imagen. Google earth solo permite guardar las imágenes con extensión jpg. PSC solicita las imágenes de fondo con extensión bmp (mapa de bits) por ello será necesario convertir la imagen a dicha extensión con ayuda de algún

convertidor de extensiones, o bien, abrir la imagen en el software Paint y ahí guardarla con extensión bmp.

En PSC en el menú Gráficos Resultantes dar click en la opción Isolíneas. Aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 5.27.

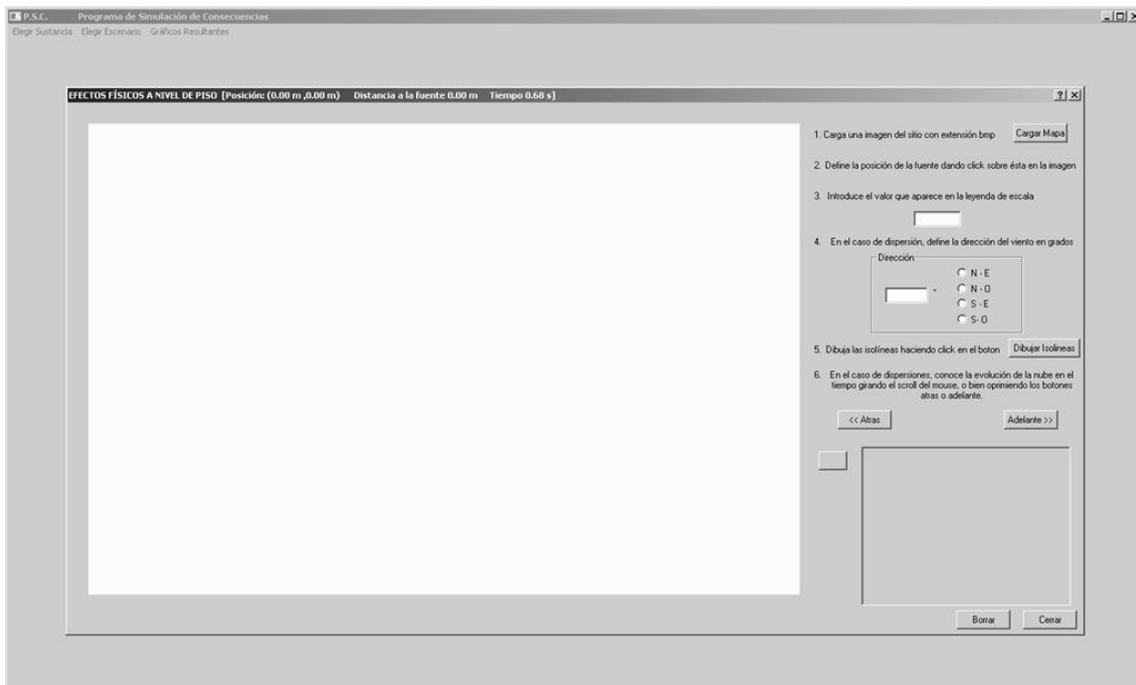


Fig. 5.27 Ventana de resultados gráficos “isolíneas”

En la ventana emergente aparecen en el lado derecho los pasos a seguir para generar los resultados. Los pasos mostrados son los siguientes:

- 1) Cargar una imagen del sitio con extensión bmp.
- 2) Dar click en el botón “Cargar mapa”. Aparecerá una ventana como la mostrada en la figura 5.28



Fig. 5.28. Ventana para cargar la imagen de fondo

3) Seleccionar la imagen del sitio de interés con extensión bmp. En el caso del análisis de la gasera la imagen cargada se muestra en la figura 5.29.

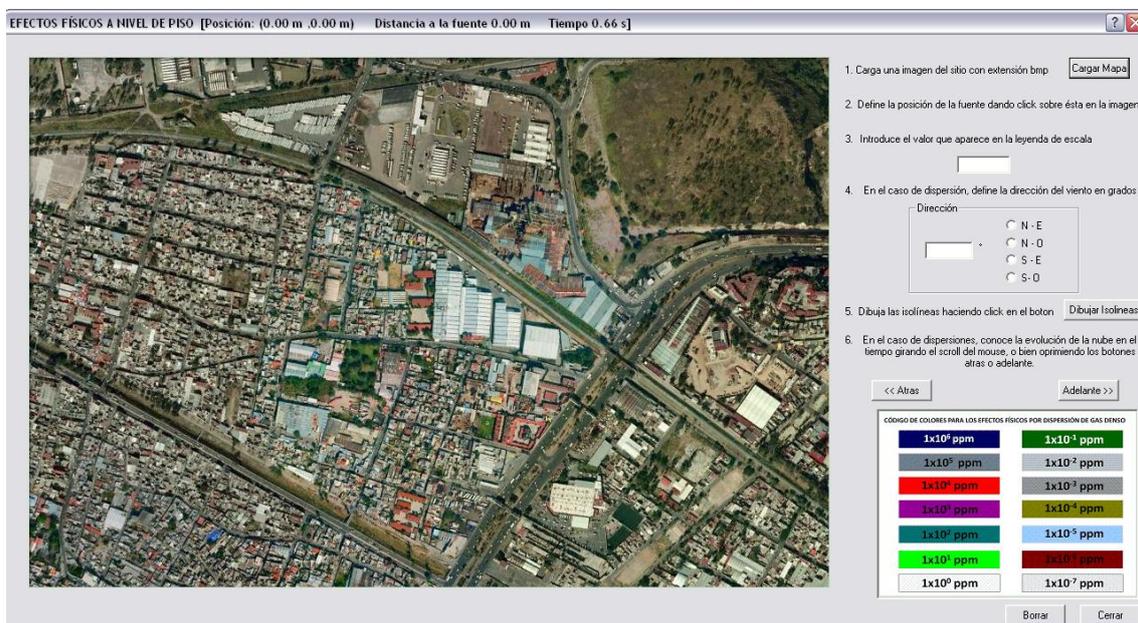


Fig. 5.29. Imagen que muestra el sitio de interés cargada en PSC

4) Introducir el valor mostrado en la leyenda de escala de Google earth. En este caso esta imagen está relacionada con una escala de 318.

5) Introducir los valores de la dirección del viento, es decir, los grados con respecto a los ejes.

6) Dar click en el botón dibujar isolíneas. Se generarán líneas alrededor de la fuente, mismas que representan una concentración en función de su color. El código de colores con respecto a la concentración representada, se muestra en la figura 5.30.

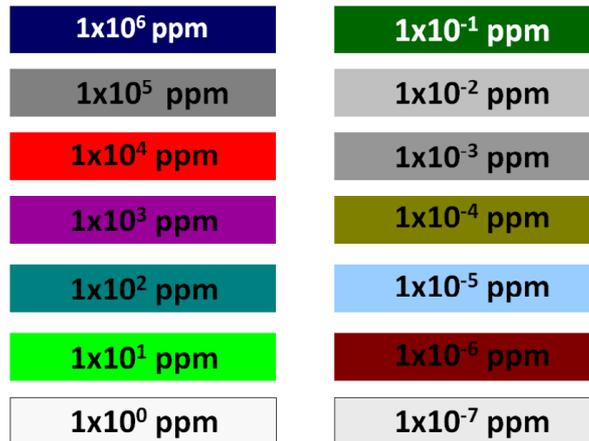


Fig. 5.30. Código de colores de concentraciones

7) Variar el tiempo de análisis, es decir, variar la cantidad de segundo después de la liberación y mostrar las isolíneas en cada caso. La variación del tiempo de análisis se realiza con los botones atrás y adelante. Otra forma de variar el tiempo es mediante el botón scroll en el mouse, moviéndolo hacia atrás o adelante.

Las isolíneas generadas para el análisis de la gasera se muestran en la figura 5.31. Se observa que las isolíneas generadas corresponden a un tiempo de 45 segundos posterior a la liberación.

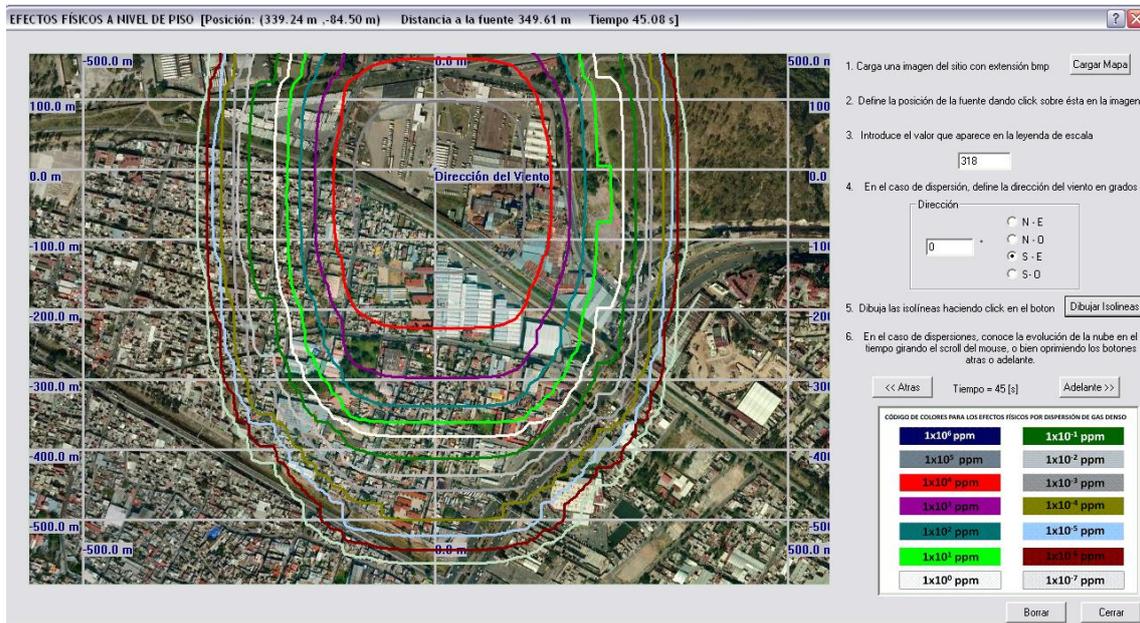


Fig. 5.31. Isolíneas que representan concentraciones para un tiempo de 45[s]

PSC también genera un gráfico referente al perfil de concentración a lo largo del eje de la pluma. Es importante conocer la evolución de las concentraciones en este eje, ya que en este se generan las máximas. En el caso del análisis de la gasera, el gráfico generado por PSC es el que se muestra en la figura 5.32.

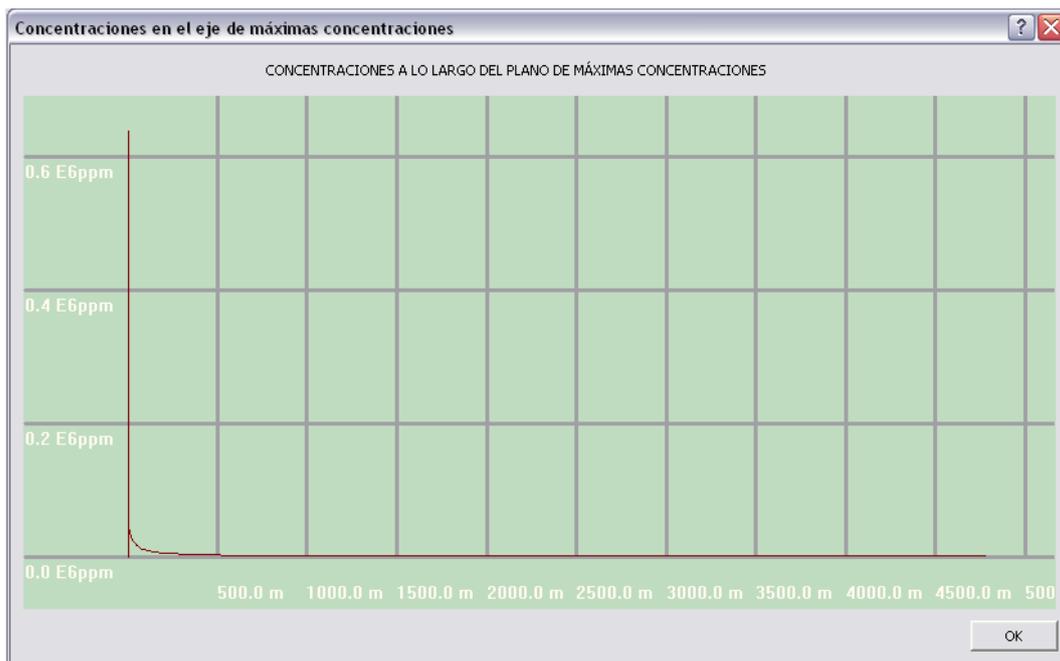


Fig. 5.32. Concentraciones en el eje de la pluma

5.6.3.1. MODELACIÓN DE EXPLOSIÓN CON PSC

PSC utiliza el modelo de TNT equivalente para generar los resultados gráficos. Para la simulación es necesario introducir los datos de la sustancia involucrada, en caso de que no se hayan tomado de la base de datos. La ventana que solicita datos es la que se muestra en la figura 5.34. Para ello será necesario elegir la opción de “Explosión” en el menú, mismo que se muestra en la figura 5.33.



Fig. 5.33 Elección de explosión en el menú

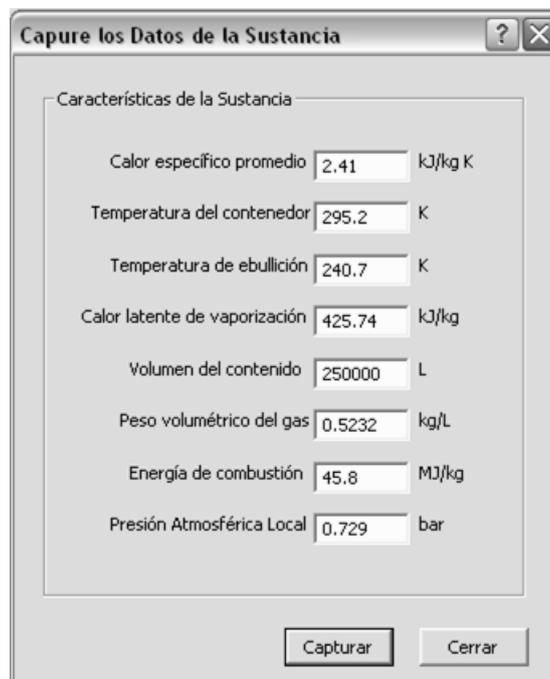
A screenshot of a dialog box titled 'Capture los Datos de la Sustancia'. The dialog box contains a section titled 'Características de la Sustancia' with several input fields and their corresponding units: 'Calor específico promedio' (2,41 kJ/kg K), 'Temperatura del contenedor' (295,2 K), 'Temperatura de ebullición' (240,7 K), 'Calor latente de vaporización' (425,74 kJ/kg), 'Volumen del contenido' (250000 L), 'Peso volumétrico del gas' (0,5232 kg/L), 'Energía de combustión' (45,8 MJ/kg), and 'Presión Atmosférica Local' (0,729 bar). At the bottom of the dialog box are two buttons: 'Capturar' and 'Cerrar'.

Fig. 5.34. Ventana de datos de la sustancia involucrada en la explosión

Los resultados gráficos generados por PSC que muestran los efectos físicos de una explosión también se dibujan sobre una imagen de fondo, misma que deberá contener al sitio de interés. Los resultados se representan con círculos

concéntricos que parten de la fuente de explosión. Cada círculo representa una sobrepresión característica, misma que genera cierta consecuencia en edificaciones. El código de colores referido a su sobrepresión característica se muestra en la figura 5.35.



Fig. 5.35. Código de colores de las sobrepresiones y sus consecuencias en edificaciones

El procedimiento para cargar la imagen de fondo es el mismo que para el análisis de dispersión. Para generar los círculos concéntricos debe de darse click en el botón dibujar isolíneas.

Los círculos concéntricos que representan sobrepresiones en el análisis de la gasera, se muestran en la figura 5.36.

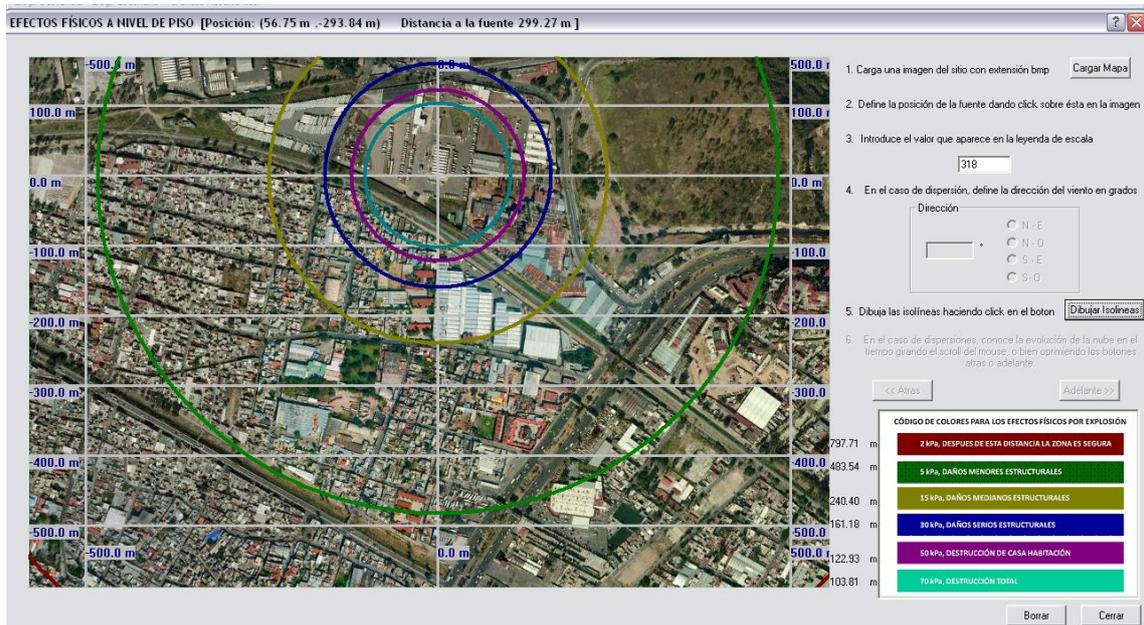


Fig. 5.36. Sobrepresiones producto de una explosión de una nube de gas

En la figura 5.36 se observan los efectos físicos provocados a las edificaciones vecinas.

6.0. CONCLUSIONES

Se investigaron y analizaron los modelos matemáticos más utilizados para la predicción de consecuencias por la liberación instantánea de una sustancia peligrosa. Los modelos más convenientes, son aquellos que involucran una mayor cantidad de variables, tanto de la sustancia, como del tipo y condiciones de liberación, además de las características atmosféricas en el momento de la liberación.

De los fenómenos posteriores a un evento extraordinario, es decir, explosión, incendio y dispersión, el primero es el que involucra las consecuencias mayores con alcances superiores a los demás fenómenos.

A partir del análisis de los modelos más utilizados se elaboró un programa de computadora capaz de predecir las consecuencias por un evento extraordinario. Este simulador se desarrolló en lenguaje C para Windows y los resultados que genera son visuales, claros y con una interfaz intuitiva.

Se ejemplificaron los procedimientos para la simulación de los efectos físicos posibles producto de un evento extraordinario en una planta industrial, en principio utilizando las ecuaciones de los modelos analizados, después utilizando el software libre ALOHA y por último mediante el software creado por el autor. Con base en dicho análisis se concluye que, tanto en el interior como en el exterior del predio de la gasera, se ocasionaría presencia de concentraciones tóxicas en el aire y la demolición de edificación en el caso de que ocurriera una explosión.

7.0 BIBLIOGRAFÍA

Capítulo 1.

SEMARNAT, Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente, México, 1988.

TSSA, "Guidelines for the Implementation of the Risk and Safety Management Plan", USA, 2009.

Capítulo 2

DIAZ ALONSO, Fernando, "Análisis de Consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales", Murcia, 2006.

CCPS/AIChE. 1994, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs, New York, 1994.

CCPS/AIChE, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd Edition", New York, 2000.

LEES, F.P. "Loss Prevention in the process industries, vol. 1-2, ISBN, 0-408-10604-2, Butterworths, Londres, 1986.

J. Casal, E. Montiel, E. Planas, J.A. Vílchez, "Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales", Universitat Politècnica de Catalunya, 1999

Capítulo 3

CCPS/AIChE. 1994, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs, New York, 1994.

LEES, F.P. "Loss Prevention in the process industries, vol. 1-2, ISBN, 0-408-10604-2, Butterworths, Londres, 1986.

TNO, CPR 14E, "Methods for the calculation of physical effects, Yellow Book", Netherlands, 2005.

2011

J. Casal, E. Montiel, E. Planas, J.A. Vílchez, “Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales”, Universitat Politècnica de Catalunya, 1999

Capítulo 4

SEMARNAP, INE, PROFEPA, “Gestión Ambiental hacia la Industria”, México, 2000.

CCPS/AIChE. 1995, “Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases, New York, 1995.

D. BRUCE TURNER, “Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, An Introduction to Dispersion Modeling, Second Edition”, North Carolina, 1994

R.E. Briter, J. McQuaid, HSE, “Workbook on the Dispersion of Dense Gas” Reyno Unido, 1988.

LEES, F.P. “Loss Prevention in the process industries, vol. 1-2, ISBN, 0-408-10604-2, Butterworths, Londres, 1986.

J. Casal, E. Montiel, E. Planas, J.A. Vílchez, “Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales”, Universitat Politècnica de Catalunya, 1999

Capítulo 5

LEES, F.P. “Loss Prevention in the process industries, vol. 1-2, ISBN, 0-408-10604-2, Butterworths, Londres, 1986.

ioMosaic, “Understand LNG Fire Hazards”, USA, 2007.

D.L. Eremark, “Users Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases”, 1990.

M. Fingas, Ph.D. “Handbook of Hazardous Materials Spills Technology”, Mc Graw Hill, New York 2002.