



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS CONSECUENCIAS DE  
ACCIDENTES DE PROCESO EN LA INDUSTRIA QUÍMICA,  
MEDIANTE PHAST Y EXCEL.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:**

**JULIETA GARCÍA MENDOZA**

**ASESOR: DR. M. JAVIER CRUZ GÓMEZ**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## *Este trabajo está dedicado:*

A Dios, porque Él es el que permite que las cosas sucedan, el que traza nuestros destinos, que camina a nuestro lado y al que le debemos todas nuestras acciones, por ello, esta tesis la ofrendo a Él, gracias Señor por todo lo que me has concedido, y pongo en ti toda mi fe porque sé, que seguirás colmándome de bendiciones como hasta ahora.

A mis padres, por todo lo que me han dado, no hay modo de agradecerles toda una vida consagrada a mí y a mis hermanas. Sí, es cierto que todos tenemos un destino que cumplir, yo creo que nosotras, sus hijas, constituimos la tarea que Dios les encomendó para esta vida. Mi más sincero agradecimiento por todo lo que han procurado por nosotras.

A mis hermanas, por ser mis mejores amigas, por todo lo que hemos compartido y vivido juntas. Ojala que sepamos resistir los embates del tiempo.

Mama, Papa, Lili, Sandra, Esther, no lo olviden somos nuestra única familia, ojala así sea por siempre. Los quiero.

Sinceramente

Julieta

23/Noviembre/2010

## Agradezco:

Al Dr. M. Javier Cruz Gómez, por haberme permitido ser parte de su grupo de trabajo, y por la confianza otorgada.

Al Dr. Néstor Noé López Castillo, por toda la ayuda brindada para la realización de esta tesis, y por ser además un gran amigo.

A la Ing. Claudia Mendoza Monroy, por la ayuda que me dio, y porque lo que me enseñó constituye una parte fundamental de este trabajo.

A Tere Ruiz, por sus valiosos comentarios y aportaciones a esta tesis.

A la UNAM, que me ha dado tanto.

A la FES-Cuautitlán, mi casa durante cuatro años y medio.

A mis maestros de FES-Cuautitlán, porque me dieron las bases, para llegar hoy a esta meta.

A mis maestros de la preparatoria, la secundaria, la primaria, el preescolar, porque todos han contribuido, para ser hoy, como soy.

A mis amigas de la secundaria Araceli y Thalia, a mi amigui de la prepa Anayeli, y a mis amigos de la uni, Lya, Sandra, Ana, Liz y Jonathan. A mis otras amigas de la uni, Maru, Karina y Naye. A tod@s ustedes: ¡gracias por ser parte de mi vida!

Al resto de mis compañeros de la carrera, porque fueron cuatro años y medio compartiendo nuestras vidas.

A mis compañeros del Lab. 212, Adriana, Oscar García, Olga, Fabiola, Daniel, Alejandro, Alma Delia.

A mi jurado, por sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo.

Al Sr. Arturo Sch. que forma parte de este logro, ya que al ser la gran persona que es, nos brindó su valiosa hospitalidad sin esperar retribuciones, mi más sincero agradecimiento.

# ÍNDICE

Pág.

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE TABLAS .....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
RESUMEN .....	VIII
OBJETIVO GENERAL.....	IX
OBJETIVOS PARTICULARES .....	IX
HIPÓTESIS .....	IX
INTRODUCCIÓN.....	X
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 EL ANÁLISIS DE RIESGOS DE PROCESO (ARP) .....	2
1.1.1 Etapas del análisis de riesgos .....	2
1.2 ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS.....	3
1.2.1 Etapas de un análisis de consecuencias .....	3
1.3 MODELOS DE CONSECUENCIA Y EFECTO .....	5
1.4 MODELOS DE LIBERACIÓN.....	5
1.4.1 Rapidez de descarga.....	6
1.4.2 Fases de descarga.....	6
1.4.3 Modelo termodinámico .....	6
1.4.4 Ecuaciones fundamentales.....	8
1.5 EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA Y CONTINUA .....	13
1.5.1 Evaporación de líquidos sobrecalentados.....	14
1.5.2 Evaporación de líquidos hirvientes .....	14
1.5.3 Evaporación de líquidos no hirvientes .....	14
1.5.4 Vaporización súbita .....	14
1.5.5 Efecto del arrastre de aerosoles.....	15
1.5.6 Cálculos para determinar la evaporación.....	15
1.5.7 Difusión de un charco.....	16
1.6 MODELOS DE DISPERSIÓN .....	17
1.6.1 Parámetros que afectan a la dispersión de gases.....	18
1.6.2 Modelos de nube boyante positiva y neutral, liberada instantánea o continuamente .....	22
1.6.3 Dispersión de gas denso .....	24
1.7 INCENDIOS Y EXPLOSIONES.....	24
1.7.1 Explosión de nube de vapor (VCE, por sus siglas en inglés Vapor Cloud Explosion).....	24
1.7.2 Flamazos (Flash fires) .....	31
1.7.3 Explosiones físicas .....	31
1.7.4 BLEVE y bolas de fuego .....	32

1.7.5	Explosiones confinadas .....	36
1.7.6	Charcos de fuego .....	36
1.7.7	Dardos de fuego (Jet fires) .....	40
1.8	MODELOS DE EFECTOS .....	41
1.8.1	Funciones de dosis-respuesta .....	42
1.8.2	Funciones probit.....	42
1.8.3	Efectos de gases tóxicos .....	43
1.8.4	Aplicación de ecuaciones probit .....	45
1.8.5	Efectos térmicos.....	45
1.8.6	Efectos de la explosión .....	47
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS BÁSICOS DEL SOFTWARE PHAST .....		48
2.1	LOS MATERIALES .....	48
2.2	ECUACIONES DE ESTADO .....	48
2.3	ALMACENAMIENTO .....	49
2.4	ESCENARIOS PARA LOS MODELOS DE DESCARGA .....	49
2.4.1	Emisión instantánea o ruptura catastrófica .....	49
2.4.2	Fuga por orificio.....	49
2.4.3	Venteo de espacio de vapor.....	49
2.4.4	Rupturas de línea.....	49
2.4.5	Liberación de 10 minutos .....	50
2.4.6	Rupturas de disco .....	50
2.4.7	Válvulas de alivio .....	50
2.4.8	Tubería larga (ducto).....	50
2.4.9	Falla de techo de tanque .....	51
2.5	PARÁMETROS DE DESCARGA .....	51
2.6	MODELO DE DESCARGA .....	52
2.7	MODELO DE DISPERSIÓN .....	52
2.7.1	Características específicas .....	53
2.7.2	Perfil atmosférico .....	53
2.7.3	Datos del clima .....	53
2.7.4	Tiempo promedio.....	54
2.7.5	Aerosoles y condensación .....	54
2.8	EVAPORACIÓN DE CHARCO .....	54
2.8.1	Segmentos de nube múltiples.....	55
2.8.2	Geometría del charco .....	55
2.8.3	Balance de masa.....	55
2.8.4	Balance de calor .....	55
2.8.5	Formación de capa de hielo .....	56
2.9	EXPLOSIÓN DE NUBE DE VAPOR .....	56
2.9.1	Parámetros que describen la naturaleza de la explosión .....	56

2.9.2	Modelo de explosión TNT.....	56
2.9.3	Modelo de explosión “Multi-Energy” de TNO.....	57
2.9.4	Modelo de explosión Baker-Strehlow .....	57
2.10	MODELOS INFLAMABLES .....	57
2.10.1	Dardos de fuego .....	57
2.10.2	Dardos de fuego .....	57
2.10.3	BLEVE.....	59
2.11	MODELO DE RADIACIÓN .....	59
2.11.1	Radiación a una distancia de interés.....	59
2.11.2	Cálculo del nivel de letalidad.....	59
2.12	MODELOS DE EFECTOS TÓXICOS .....	60
CAPÍTULO III. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS EN PHAST Y EN EXCEL61		
3.1	Descarga de un líquido a través de un orificio.....	61
3.2	Descarga de un gas a través de un orificio .....	64
3.3	Vaporización de charco .....	66
3.4	Liberación continua .....	69
3.5	Liberación instantánea (Puff) .....	73
3.6	Equivalencia TNT. ....	75
3.7	Métodos TNO y Baker–Strehlow .....	78
3.8	BLEVE (Flujo térmico) .....	83
3.9	Radiación de un incendio de charco.....	86
3.10	Flujo radiante para una ráfaga de fuego .....	89
3.11	Porcentaje de fatalidades de una relación fija de concentración-tiempo establecida.....	91
3.12	Fuga de amoníaco .....	93
3.13	Explosión de carro tanque cargado con GLP ( <i>Gas Licuado de Petróleo</i> ).....	100
CONCLUSIONES .....		111
ANEXOS .....		114
APÉNDICE A (Tablas).....		114
APÉNDICE B (Figuras).....		120
APÉNDICE C.....		124
APÉNDICE D .....		126
BIBLIOGRAFÍA .....		127

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Ejemplos de accidentes de mayor impacto social por su gravedad.....	1
Tabla 1.2 Condiciones meteorológicas para definir las clases de estabilidad Pasquill-Gifford.....	19
Tabla 1.3 Fuerza de detonación de sub-explosión.....	29
Tabla 1.4 Velocidad de la flama en número Mach para fuentes de ignición.....	30
Tabla 1.5 Tiempo de exposición necesario para alcanzar el umbral de dolor.....	45
Tabla 1.6 Diseño recomendado para niveles de radiación de quemadores excluyendo la radiación solar.	46
Tabla 1.7 Efectos de la radiación térmica.....	46
Tabla 2.1 Posibles escenarios de fuga de acuerdo a las diferentes condiciones de almacenamiento.....	51
Tabla 3.1 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.1.....	62
Tabla 3.2 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.....	62
Tabla 3.3 Cuadro comparativo de los resultados PHAST y Excel del caso 3.1.....	63
Tabla 3.4 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.2.....	65
Tabla 3.5 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.....	65
Tabla 3.6 Cuadro comparativo de los resultados PHAST y Excel del caso 3.2.....	66
Tabla 3.7 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.3.....	67
Tabla 3.8 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.....	67
Tabla 3.9 Cuadro comparativo de los resultados PHAST y Excel del ejemplo 3.3 de vaporización de charco.....	68
Tabla 3.10 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.4.....	69
Tabla 3.11 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.....	69
Tabla 3.12 Calculo de la concentración en ppm, a 500 m en la dirección del viento para condiciones rurales.....	70
Tabla 3.13 Calculo de la concentración en ppm, a 500 m en la dirección del viento para condiciones urbanas.....	71
Tabla 3.14 Resultados de la concentración con diversas condiciones climáticas obtenidos en PHAST.....	71
Tabla 3.15 Parámetros modificados de la simulación anterior.....	71
Tabla 3.16 Resultados obtenidos en PHAST para diversas condiciones de estabilidad, con datos de entrada descritos en la tabla 3.15.....	72
Tabla 3.17 Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en PHAST y en Excel para el clima especificado 2/F. ....	72
Tabla 3.18 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.5. ....	73
Tabla 3.19 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, caso 3.5.....	73
Tabla 3.20 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.....	74
Tabla 3.21 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.6, cuando se desconoce la distancia a una sobrepresión generada. ....	75
Tabla 3.22 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.....	76
Tabla 3.23 Resultados del modelo en Excel, <i>distancia a una sobrepresión dada</i> .....	76
Tabla 3.24 Resultados del modelo en Excel cuando se desconoce la sobrepresión a una distancia dada..	76
Tabla 3.25 Resultados más significativos para el caso 3.6.....	77
Tabla 3.26 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.7, método de TNO. ....	78
Tabla 3.27 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.7, método de Baker-Strehlow...	79
Tabla 3.28 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.7 incisos (a) y (b). ....	79

Tabla 3.29 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.....	80
Tabla 3.30 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.8.....	83
Tabla 3.31 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.8. ....	83
Tabla 3.32 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.....	84
Tabla 3.33 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.9.....	86
Tabla 3.34 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.9.....	87
Tabla 3.35 Cuadro comparativo de los resultados más significativos para el problema 3.9.....	87
Tabla 3.36 Variables de entrada para el modelo en Excel, ejemplo 3.10.....	89
Tabla 3.37 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.10.....	90
Tabla 3.38 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.....	90
Tabla 3.39. Variables de entrada para el modelo en Excel para el problema 3.11.....	91
Tabla 3.40 Valores de las constantes a, b y n para usar en la ecuación probit.....	91
Tabla 3.41 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, ejemplo 3.11.....	91
Tabla 3.42 Resultados obtenidos de la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.11.....	92
Tabla 3.43 Valores de las constantes a, b y n para la ecuación Probit empleados por PHAST.....	92
Tabla 3.44 Variables de entrada para el modelo en Excel, <i>descarga a través de una tubería</i> .....	95
Tabla 3.45 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.....	95
Tabla 3.46 Resultados de flujo másico de descarga para la fuga de amoniaco.....	96
Tabla 3.47 Cuadro comparativo del error obtenido respecto a la realidad a partir de las simulaciones.....	97
Tabla 3.48 Datos de entrada para el modelo en Excel de la fuga de LPG de una pipa. ....	101
Tabla 3.49 Resultados del modelo en Excel de un dardo de fuego producido por fuga de GLP.....	102
Tabla 3.50 Datos de entrada para el modelo en Excel de una BLEVE ocasionada en un tanque de GLP.....	102
Tabla 3.51 Resultados en Excel del modelo de <i>BLEVE</i> , que involucra LPG de una pipa.....	103
Tabla 3.52 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, para la fuga de GLP.....	103
Tabla 3.53. Resultados de la descarga y dardo de fuego, tras la liberación de GLP de una pipa, como consecuencia de un accidente carretero. ....	104
Tabla 3.54 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, para la fuga de GLP.....	104
Tabla 3.55 Resultados para la BLEVE que ocurre en la segunda pipa. ....	105
Tabla A1. Correlaciones para el Factor de Expansión Y, y la relación de caída de presión sónica (P1-P2)/P1 como una función de pérdida en la cabeza $K_f$ . ....	113
Tabla A2. Parámetro de rugosidad de la superficie, $z_0$ . ....	113
Tabla A3. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de los coeficientes de dispersión de Pasquill-Guifford de dispersión de emisiones continuas (Plumas). ....	114
Tabla A4. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de coeficientes de dispersión Pasquill-Guifford, de liberaciones instantáneas (Puff).....	114
Tabla A5. Ecuaciones para las funciones de los parámetros de explosión en la figura B1.....	115
Tabla A6. Daño estimado para estructuras comunes basado en sobrepresiones.....	116
Tabla A7. Fracción de energía total convertida a radiación para hidrocarburos.....	117
Tabla A8. Valores de las constantes a,b y n en la ecuación probit para algunas sustancias.....	117
Tabla A9. Conversión de Probits a porcentajes.....	118
Tabla C1. Propiedades constantes de los materiales incluidos en PHAST. ....	123
Tabla C2. Ecuaciones DIPPR para el cálculo de propiedades variables de las sustancias.....	124

Tabla C3. Propiedades fundamentales calculadas a partir de las ecuaciones DIPPR.....	124
Tabla D1. Parámetros $a_{\text{Monin}}$ y $b_{\text{Monin}}$ como una función de la clase de estabilidad.....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1.1 Efectos de la estabilidad en la dispersión de la pluma.....	20
Figura 1.2 Tetraedro del fuego.....	25
Figura 2.1 Forma de la flama de un charco de fuego. ....	57
Figura 2.2 Forma de la flama para el modelo de Shell-Thornton.....	58
Figura 2.3 Forma de la flama para el modelo de API.....	59
Figura 3.1 Descarga de líquido a través de un orificio. ....	61
Figura 3.2 Descarga de gas a través de un orificio.....	64
Figura 3.3 Concentración en ppm en función del tiempo que le toma a la nube dispersarse en la dirección del viento para una estabilidad de clima de 1.5/F, obtenido de PHAST. Ejemplo 3.5. ....	75
Figura 3.4 Sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor de propano en función de la distancia, empleando un modelo TNT.....	78
Figura 3.5 Gráfico de la sobrepresión en función de la distancia método TNO Multi-energía.....	81
Figura 3.6 Gráfico de la duración del impulso en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método TNO Multi-Energía .....	81
Figura 3.7 Gráfico de la sobrepresión en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método de Baker-Strhlow. ....	82
Figura 3.8 Gráfico de la duración del impulso en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método de Baker-Strehlow. ....	82
Figura 3.9 Nivel de radiación en $\text{kW}/\text{m}^2$ como una función de la distancia en la dirección del viento para una clase de estabilidad de 1.5/F. ....	85
Figura 3.10. Elipses de radiación, la externa muestra un nivel de radiación de $1.4 \text{ kW}/\text{m}^2$ , la media un nivel de radiación de $5 \text{ kW}/\text{m}^2$ y la interior $37.5 \text{ kW}/\text{m}^2$ . Para una estabilidad 2/F. ....	85
Figura 3.11 Relación del nivel de radiación en función de la distancia, obtenido en PHAST para una categoría 1.5/F, por incendio de un charco en el suelo de aceite de transformador. ....	88
Figura 3.12 (a) Curva de relación de número probit en función de la distancia en la dirección del viento.....	93
Figura 3.12 (b) Muestra la probabilidad de fatalidad en función de la distancia en la dirección del viento.....	94
Figura 3.13 Concentración (ppm), en función de la distancia en la dirección del viento (m) para la fuga de amoniaco suscitada en Nanchital, Veracruz, en 2005. ....	97
Figura 3.14 Para una categoría 2/D la relación de concentración como una función de la distancia en la dirección del viento.....	98
Figura 3.15 Isopleta de la nube formada por la liberación de amoniaco a una concentración de 500 ppm.....	99
Figura 3.16 Nube formada por la liberación de amoniaco. Estabilidad de categoría 2D.....	99
Figura 3.17 Probabilidad de muerte en función de la distancia en la dirección del viento. Para la fuga de amoniaco.....	100
Figura 3.18 Concentración (ppm) en función de la distancia para la liberación de Gas LP de una Pipa. Categoría de 6.5/B.....	106
Figura 3.19 Concentración en la dirección perpendicular al viento en función de la distancia en la dirección del viento, para la fuga de amoniaco. ....	106
Figura 3.20 Isopleta de la nube en la vertical (altura de la nube) en función de la distancia en la dirección del viento, para la fuga de GLP.....	107

Figura 3.21 Niveles de radiación generados por el dardo de fuego, consecuencia de la ignición del material fugado de la pipa de LPG. ....	108
Figura 3.22 Niveles de Radiación generados por la explosión BLEVE del segundo tanque.....	108
Figura 3.23 Nivel de sobrepresión en función de la distancia en la dirección del viento.....	109
Figura 3.24 Radios de sobrepresión en función de la distancia en la dirección del viento. El radio externo muestra una sobrepresión de 0.03447 bar.....	110
Figura 3.25 Radios de afectación debido al flamazo de la nube formada como consecuencia de la fuga en la primera pipa de GLP. Radio exterior a 8993 ppm, y radio interno a 1.799E4 ppm.....	104
Figura B1. Parámetros de la onda de choque para una explosión esférica de TNT en una superficie a nivel del mar.....	119
Figura B2. Sobrepresión escala de Sachs en función de la distancia escalada.....	120
Figura B3. Duración de la fase positiva en función de la distancia escalada de Sachs.....	120
Figura B4. Sobrepresión escalada como una función de la distancia escalada.....	121
Figura B5. Impulso escalado como una función de la distancia escalada.....	121
Figura B6. Factor de visión máximo para un receptor a nivel de suelo de una radiación proveniente de un cilindro circular. ....	122
Figura B7. Muestra el factor de visión máximo para un receptor a nivel de suelo de una radiación proveniente de un cilindro circular inclinado. ....	122
Figura D1. Longitud de Monin-Obukhov en función de la rugosidad de la superficie.....	125

## RESUMEN

En la actualidad, las personas, los bienes materiales y el medio ambiente que se encuentran próximos a un establecimiento industrial en el que se manejan sustancias peligrosas, están sometidos a un riesgo por la sola presencia de dicha instalación industrial y de las sustancias que se manejan. A pesar de ello, los beneficios que suponen la utilización de muchos productos fabricados en este tipo de industrias, establece la necesidad de decidir qué tipo y nivel de riesgo estamos dispuestos a admitir con respecto a los beneficios que suponen la utilización de esos productos.

Por lo tanto, para poder decidir si este tipo de riesgos es aceptable o no, se requiere estimar su magnitud, por lo que se hace necesario realizar un análisis sistemático y lo más completo posible de todos los aspectos que implica para la población, el medio ambiente y los bienes materiales, la presencia de un determinado establecimiento, las sustancias que utiliza, los equipos, los procedimientos, etc. Se hace inevitable analizar estos riesgos y valorar si su presencia es o no admisible.

El trabajo realizado está centrado en el análisis de consecuencias (AC), que es parte de la administración de la seguridad industrial y la protección ambiental; se encuentra dividido en tres capítulos. En el capítulo I, se describe la importancia que tiene el AC, cuando se realiza un análisis de riesgos de proceso; se detalla qué es el AC, sus etapas y los modelos matemáticos que lo describen. En el capítulo II, se proporciona una descripción general de los modelos empleados por el software PHAST.

El capítulo III, contiene el estudio de once casos teóricos de accidentes, para los cuales se evaluaron sus consecuencias, empleando los modelos descritos en el capítulo I y el software PHAST. Los modelos descritos en el capítulo I, fueron sistematizados en una hoja de cálculo en Excel, a partir de la cual fue posible facilitar el uso de dichos modelos, y obtener de forma rápida y precisa los resultados de interés.

Para todos los casos se presentan en tablas los datos de entrada para los modelos, así como las tablas con los resultados obtenidos. También se presentan gráficas de importancia para algunos de los escenarios. Finalmente se hace un análisis de los resultados.

En el capítulo III, se presentan también dos casos que muestran situaciones reales ocurridas en México, para las cuales se da previamente una descripción del evento, posteriormente se procede del mismo modo que en los teóricos, se presentan en tablas los datos de entrada, los de salida y se realiza una discusión de los resultados.

En las conclusiones se detalla que los modelos propuestos representan una alternativa ante el uso del software PHAST, el cual requiere del pago de una licencia de elevado costo, ya que en el análisis de consecuencias los resultados son una previsión de lo que pudiera ocurrir, por ello no precisa de valores exactos, sino más bien de que los resultados sean coherentes en magnitud y acordes a la realidad que se estudia.

## **OBJETIVO GENERAL**

Programar en una hoja de cálculo de Excel las ecuaciones matemáticas mediante las cuales es posible realizar un análisis de consecuencias, tales como balances de energía mecánica, de dispersión de nubes contaminantes y de calor irradiado; y comparar los resultados obtenidos con los predichos mediante el uso del software PHAST, para evaluar la confiabilidad del modelo.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Analizar los modelos teóricos, que constituyen un análisis de consecuencias, descritos en la literatura y seleccionar los más adecuados.
- Programar en una hoja de cálculo de Excel, los modelos teóricos seleccionados.
- Realizar un análisis de consecuencias tanto con los modelos en Excel como en PHAST, a partir de un ejemplo teórico.
- Comparar los resultados obtenidos.
- Validar los modelos en Excel como una herramienta que permita un análisis de consecuencias, con la misma validez y credibilidad que proporciona el uso de PHAST.

## **HIPÓTESIS**

Si se programan en Excel los diferentes modelos que constituyen un análisis de consecuencias de accidentes ocasionados por la liberación no controlada de sustancias químicas peligrosas, y se comparan los resultados de dicho modelo, con los obtenidos de simular en PHAST el mismo evento, se deberían obtener resultados tan válidos como los obtenidos en PHAST.

## INTRODUCCIÓN

La industria química es percibida como una industria de alto riesgo; sin duda alguna la principal causa de esto son los conocidos efectos e impactos sociales de los grandes accidentes relacionados a la manufactura y transporte de productos químicos, algunos de los cuales han sobrepasado los límites de las industrias involucradas, y por ello caen en la categoría de accidentes mayores.

Pese a ello, la industria desempeña un papel básico en el desarrollo de la sociedad, la mayor parte de los productos o materiales que utilizamos en nuestra vida cotidiana procede de la tecnología industrial química, pero su desarrollo conlleva la aparición de diversas situaciones de riesgo que, en ocasiones, se materializan en accidentes que ocasionan una gran cantidad de víctimas, pérdidas materiales y daños severos al medio ambiente.

Los riesgos de estas actividades están relacionados con las características peligrosas de las sustancias o productos utilizados (inflamables, tóxicos, explosivos, etc.), con las condiciones de trabajo (temperatura, presión, etc.) y con el elevado volumen de producción necesario para satisfacer la demanda cada vez mayor del mercado. Estos riesgos pueden materializarse en accidentes como consecuencia de errores humanos, fallos materiales, aparición de condiciones imprevistas o desviación de las variables de proceso, entre otros.

Cuando el hombre decide exponerse al peligro con el propósito de obtener un beneficio, debe considerar que esta exponiendo a otros seres humanos al mismo peligro, pero que en muchos casos estos no han decidido. Se vuelve entonces necesario regular ciertas actividades del hombre, por el hombre mismo. Dichas regulaciones sirven para controlar los riesgos que son inherentes a la industria, aunque a pesar de ello, no es posible garantizar plenamente la eliminación de la probabilidad de ocurrencia, por lo que, además, es necesario adecuar las medidas de protección internas y externas -Planes de Emergencia- para mitigar en su caso los daños producidos, cuyas consecuencias pueden hacerse patentes en zonas muy extensas de su entorno. Por tal razón es necesario disponer de metodologías que permitan determinar las zonas que pueden verse afectadas para prever los medios y métodos de actuación.

Para prever las zonas de afectación se recurre a un análisis sistemático, que involucra evaluar la gravedad de los riesgos que genera la industria química, estudiar, o por lo menos estimar su magnitud, lo más completo posible de todos los aspectos que pueden iniciar y desencadenar sucesos no deseados (accidentes) que afecten a las personas, los bienes y el medio ambiente.

Este análisis sistemático se conoce como "Análisis de consecuencias", y constituye la parte central de este trabajo, mediante el cual a través de diversos casos teóricos, se espera dar una alternativa de software para realizar análisis de consecuencias, ya que por Ley en nuestro país las industrias que realizan actividades altamente peligrosas están obligadas a realizar un estudio de Riesgo Ambiental en el cual se determinan las posibles causas que darían origen a un accidente y las distancias de afectación resultantes en caso de que ocurriera dicho evento.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

Cualquier actividad humana conlleva ciertos riesgos, la industria química, desde el punto de vista estadístico, tiene un nivel de seguridad más elevado que otras actividades humanas. Sin embargo, esta industria es la responsable de los accidentes de carácter más grave ocurridos en los últimos años, los cuales siguen presentes en la mente de muchas personas, además de que todavía se están notando sus consecuencias en humanos y medio ambiente. Algunos de estos accidentes se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Ejemplos de accidentes de mayor impacto social por su gravedad

Ubicación	Eventos	Consecuencias
<u>Flixborough (UK), 1974</u>	Explosión de vapor no confinada (UVCE) de ciclohexano.	28 muertos y cientos de heridos. Destrucción completa de las instalaciones.
<u>Cubatao (Brasil), 1974</u>	Bola de fuego de gasolina por fuga de un oleoducto.	Al menos 500 muertos. Graves daños al medio ambiente.
<u>Seveso (Italia), 1976</u>	Reacción química fuera de control que provoca el venteo de un reactor, con liberación a la atmósfera de dioxina.	Sin muertes. Evacuación de más de 1.000 personas. Abortos espontáneos y contaminación del suelo. Las autoridades no se localizaron (fin de semana). Las primeras medidas se tomaron a los cuatro días.
<u>Campo Los Alfaques, San Carlos de la Rápita (España), 1978</u>	Explosión BLEVE de un camión sobrecargado de propileno al chocar contra un campo recreativo.	215 muertos. Destrucción completa del campo recreativo.
<u>San Juan de Ixhuatepec, México D.F. (México), 1984</u>	Numerosas explosiones de depósitos y tanques de LPG (Gas Licuado de Petróleo) debidas a una fuga y posterior explosión no confinada de GLP.	Más de 500 muertos Más de 4,500 heridos. Más de 1,000 desaparecidos. Destrucción masiva de viviendas. Efecto dominó procedente de la primera UVCE (Explosión de nube de vapor no confinada).
<u>Bhopal (India), 1984</u>	Escape de isocianato de metilo en una planta que fabricaba insecticidas.	3,500 muertes directas y el mismo número de personas en condiciones críticas. Unas 150,000 personas requirieron tratamiento médico Efectos a largo plazo: cegueras, trastornos mentales, lesiones hepáticas y renales. La nube tóxica atravesó una de las vías de evacuación.
<u>Guadalajara (México), 1992</u>	Serie de explosiones en la red de alcantarillado de la ciudad de Guadalajara por vertidos incontrolados de combustible procedente de la planta de Petróleos Mexicanos, PEMEX.	190 muertos y 470 heridos. 6,500 damnificados. Destrucción de 1,547 edificaciones. Daños en 100 escuelas y 600 vehículos. Entre 13 y 14 kilómetros de calles destruidas.

Fuente: (GUIAR, 2010)

## 1.1 EL ANÁLISIS DE RIESGOS DE PROCESO (ARP) <sup>[1][16]</sup>

En materia de seguridad, las palabras riesgo y peligro son mencionadas continuamente sin hacer distinción alguna; peligro es cualquier condición física o química capaz de causar daños a las personas, al medio ambiente o a la propiedad y riesgo es la posibilidad de sufrir pérdidas, es decir, se puede considerar como una medida de pérdida económica o daño a las personas, expresada en función de la probabilidad del suceso y la magnitud de sus consecuencias. Según la Administración para la salud y seguridad ocupacional, OSHA (Occupational Safety Health Administration) el riesgo se define como: “la medida de la probabilidad y severidad del daño que se puede causar a las personas y a sus propiedades”. De esta manera el riesgo puede ser estimado mediante:

$$R = P \times C \qquad 1.1$$

Donde:

- R Nivel de riesgo
- P Probabilidad de ocurrencia y
- C Consecuencias o totalidad de las pérdidas que se producen.

El análisis de riesgos es un esfuerzo organizado para identificar, a través de una serie de técnicas sistemáticas, las debilidades asociadas con el diseño u operación del equipo o proceso que podrían conducir a consecuencias no deseadas, tales como perjuicios personales o daños materiales, así como para determinar las medidas necesarias para controlar dichos riesgos y eliminar o mitigar sus consecuencias.

El objetivo del análisis es evaluar los riesgos que se pueden presentar en los procesos, ordenándolos jerárquicamente, generando así la información adecuada para tomar decisiones e implementar las medidas necesarias, preventivas y de control, que nos permitan mejorar y garantizar la seguridad, tomando en cuenta la relación costo-beneficio asociadas a dichas medidas.

Una evaluación de riesgos no elimina los riesgos, sino que ayuda a manejarlos. Las evaluaciones de riesgos, se concentran en las formas en que los equipos fallan, problemas con el sistema de control, errores humanos y factores externos que pueden causar incendios, explosiones y fugas de materiales tóxicos o energía.

### 1.1.1 Etapas del análisis de riesgos

En la evaluación y administración de riesgos, generalmente la metodología del análisis es:

- A. Identificación de riesgos.
- B. Análisis de consecuencias.
- C. Control de los riesgos y peligros identificados.

La información que aquí se genera permite saber si los riesgos identificados son reales o no y su probabilidad de ocurrencia. El siguiente paso es establecer las acciones necesarias para implementar las medidas correctivas emitidas durante el análisis. La implementación a tiempo de estas medidas permitirá prevenir los riesgos encontrados, reduciendo su probabilidad y controlándolos mediante una serie de

acciones administrativas con programas, procedimientos y normas. En este trabajo solo se tratará del análisis de consecuencias.

## **1.2 ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS** <sup>[1] [2] [15]</sup>

Tras identificar los peligros y riesgos por alguna técnica de identificación de análisis de riesgos, mediante sus causas y efectos, surge la necesidad del análisis de consecuencias de los incidentes que pueden ocurrir. El análisis de consecuencias es la segunda etapa del análisis de riesgos de procesos y se encarga de evaluar todos aquellos efectos que se derivan de la toxicidad de las sustancias, de los problemas de sobrepresión y de los altos niveles de radiación térmica producidos por la combustión de materiales inflamables, que pueden resultar de un incidente como: fuga, incendio, explosión o derrame accidental de una sustancia química.

El análisis de consecuencias es un proceso “con visión futura”, ya que sirve para identificar las posibles formas de progresión de eventos que involucren sustancias peligrosas, cuantificar la magnitud y alcance de sus efectos sobre las personas, las instalaciones y el ambiente. Los análisis de consecuencias son estrictamente teóricos, se basan en la aplicación de modelos matemáticos con base en balances de momento, masa y calor conjuntados con algunas consideraciones heurísticas y de simplificación; los resultados obtenidos de las simulaciones son solo aproximaciones de las consecuencias que puede traer el evento si se llegara a suscitar, por lo que nos ayudan en la toma de decisiones para la inversión en seguridad.

El análisis de consecuencias genera información muy útil, ya que proporciona las herramientas adecuadas y métodos matemáticos para la correcta determinación de las consecuencias de los accidentes que se pueden producir en los establecimientos en los que se encuentren presentes sustancias peligrosas. Dentro de esta información se incluye la rapidez de descarga del material, la cantidad total que es descargada y el estado físico del material. Esta información es valiosa para evaluar el diseño de nuevos procesos y en el caso de procesos en operación, evalúa los sistemas de seguridad existentes en la instalación.

Las incertidumbres que surgen, durante el procedimiento de modelar las consecuencias, son tratadas mediante la asignación de valores más altos a algunas de estas incógnitas, para obtener un resultado que asegure que el diseño ingenieril resultante que mitigará o removerá el peligro esta sobrediseñado. Lo más importante en un análisis de consecuencia es saber interpretar los resultados que se han obtenido, para que estos sean realistas.

### **1.2.1 Etapas de un análisis de consecuencias**

1.- Selección de los eventos indeseables a analizar: la selección de eventos se hace a partir de los resultados del estudio de Peligros y Operación, HazOp (Hazard and Operability), del juicio del analista de riesgos o de la evaluación de un encabezado de un árbol de eventos (o de algún otro estudio de riesgos).

2.- Especificación de los escenarios: en esta etapa se recolecta información sobre las sustancias, el equipo y su configuración, así como detalles de las características del evento incluyendo aquellos que

afectan al entorno como son la dirección de la fuga, la dimensión del orificio y las condiciones climatológicas, entre otros. También se identifican todas las posibles formas de evolución del evento, debido a que deben evaluarse por completo las posibles consecuencias. La información recolectada se emplea para realizar una simulación de los fenómenos físicos y determinar sus consecuencias.

3.- Determinación de la mecánica de liberación o exposición del material: en esta etapa se busca predecir, mediante modelos de dinámica de fluidos, a partir de las características del escenario, los parámetros que definen los detalles de la liberación.

Es importante determinar, entre otros parámetros, los que se refieren a la composición de cada fase, al flujo y la cantidad liberada; así como la temperatura, la presión y el volumen específico. Los cálculos que se deben realizar en esta etapa son largos y repetitivos, por lo que es recomendable emplear programas de cómputo.

4.- Determinación de la dispersión del material: una vez liberada la sustancia peligrosa, existe la posibilidad de que se forme una nube que se disperse a medida que avanza. Por una parte, al viajar cubre mayores distancias, y por otra, a medida que viaja se diluye. La determinación de la dispersión del material se puede determinar calculando el perfil de concentración de la nube, para conocer el alcance de concentraciones peligrosas, ya sea por su toxicidad o porque se pueden generar mezclas inflamables con el aire y encontrar fuentes de ignición. Para esta última contingencia se deben conocer los perfiles de la energía térmica y de la sobrepresión, suponiendo que ocurre la ignición de la mezcla inflamable.

De la misma forma que en la etapa anterior, los perfiles de concentración de la energía térmica y de la sobrepresión, se calculan empleando modelos de dispersión, de incendios y de explosiones. Otra opción es el uso de modelos termodinámicos y de difusión.

5.- Cuantificación de las consecuencias sobre el entorno: en esta etapa se estima el daño que el evento analizado podría infringir a personas, equipo y ambiente. Esto se hace a partir de los perfiles de la concentración, de la intensidad de la radiación y de la sobrepresión obtenidos en la etapa anterior; así como de dos formas complementarias de evaluación: las relaciones magnitud-efecto y del método Probit. Las relaciones magnitud-efecto son reportes tabulares que asocian la intensidad de las variables, radiación, sobrepresión o concentración, con consecuencias conocidas de forma experimental y publicadas por diversos organismos internacionales, tales como el Instituto Americano del Petróleo y el Banco Mundial.

6.- Emisión de recomendaciones: en esta etapa se genera una lista de acciones y mejoras enfocadas a prevenir y mitigar las consecuencias de los eventos analizados. Cuando es necesario, las recomendaciones se deben soportar con un conjunto de normas, estándares y prácticas recomendadas aplicables.

7.- Documentación del análisis de consecuencias: en esta etapa se genera un reporte que contiene la siguiente información: un listado de los escenarios analizados, la descripción detallada de cada escenario, una memoria de las simulaciones y cálculos efectuados y un resumen de las consecuencias

de los escenarios evaluados, que muestre las zonas de seguridad para los efectos por toxicidad, radiación térmica y/o sobrepresión.

### 1.3 MODELOS DE CONSECUENCIA Y EFECTO <sup>[1] [14] [15] [19]</sup>

Los accidentes comienzan con un incidente, el cual usualmente resulta en la pérdida de contención de material de proceso en depósitos y tuberías que almacenan y transportan productos en forma gaseosa o líquida, lo que produce la fuga o derrame de esta sustancia cuya consecuencia puede ser la formación de nubes tóxicas, incendios y/o explosiones, puesto que en la mayoría de los casos estas sustancias son peligrosas. También es posible un incendio previo o simultáneo a una fuga o incluso, una explosión previa a la fuga o al incendio. No obstante, en la mayoría de los casos el primer suceso consiste en una fuga o derrame incontrolado de producto de su lugar de confinamiento (depósitos, tuberías, reactores, válvulas, bombas, etc.), por lo que hay que prestar una especial atención a este fenómeno.

Los eventos de gran magnitud que pueden tener lugar en una industria, con efectos graves son los siguientes:

- 1) Fugas o derrames de sustancias peligrosas.
- 2) Evaporación de líquidos derramados.
- 3) Dispersión de nubes de gases, vapores y aerosoles.
- 4) Incendios de charco o "Pool fire".
- 5) Dardos de fuego o "Jet fire".
- 6) Flamazos o "Flash fires".
- 7) Explosiones de nubes de vapor no confinada o "UVCE" (por sus siglas en inglés Unconfined Vapor Cloud Explosion).
- 8) Explosiones por expansión de vapores de líquido en ebullición "BLEVE" (por sus siglas en inglés Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).

Esta sección presenta una revisión de modelos disponibles en la literatura para análisis de consecuencias. Los incidentes pueden incluir la ruptura o corte de una tubería, un orificio en tanque o tubería, reacciones fuera de control, fuego externo a tanque, etc. Una vez que se define el tipo de incidente, se selecciona el modelo fuente para describir como se descarga el material del proceso. El modelo provee una descripción de la rapidez de descarga, la cantidad total descargada (o tiempo total de descarga), y el estado de la descarga, que puede ser sólido, líquido, vapor o una combinación.

Un modelo de dispersión es usado subsecuentemente para describir cómo se transporta el material en la dirección del viento hasta alcanzar un nivel de concentración específico. Para liberaciones de materiales inflamables, los modelos de fuego y explosión convierten los resultados del modelo de dispersión en efectos en las personas (lesión o muerte) y en las estructuras. Adicionalmente se proporcionan modelos para los análisis de vulnerabilidad. Los impactos ambientales, no se consideran aquí.

### 1.4 MODELOS DE LIBERACIÓN <sup>[1] [19]</sup>

Los modelos de liberación son usados para definir cuantitativamente el escenario de descarga estimando la rapidez de descarga, la cantidad total descargada (o duración total), grado de vaporización súbita y evaporación de un charco de líquido y formación de aerosol. Los modelos de dispersión convierten los

resultados del modelo de descarga en concentraciones en la dirección del viento. Los modelos de descarga y dispersión están fuertemente relacionados.

#### **1.4.1 Rapidez de descarga**

Los modelos de descarga son la primera fase en el desarrollo de la mayoría de los estimados de las consecuencias. El estimado de la rapidez de descarga y cantidad total descargada (o duración de la descarga) son esenciales como entrada para otros modelos. La cantidad total liberada puede ser mayor o menor que el volumen del tanque esto depende principalmente de las condiciones de almacenamiento.

#### **1.4.2 Fases de descarga**

Los modelos de rapidez de descarga requieren una cuidadosa consideración de la fase de descarga del material. La fase de descarga es dependiente de las condiciones del proceso y puede ser determinada usando diagramas termodinámicos, o un modelo de equilibrio líquido-vapor y la ruta termodinámica durante la descarga. El punto inicial es definido por las condiciones iniciales del material de proceso antes de ser liberado. Estas pueden ser condiciones de proceso normal o un estado anormal alcanzado por el material de proceso antes de la liberación. El punto final de la ruta seguida será normalmente a la presión final de una atmósfera.

Hay que distinguir tres tipos de fugas atendiendo al fluido de que se trate:

##### 1) Fugas de líquidos:

- Orificio en un tanque de almacenamiento atmosférico.
- Orificio en tanque o tubería que contiene líquido presurizado debajo de su punto normal de ebullición.

##### 2) Fugas de gas:

- Orificio en equipo (tubería o tanque) que contiene gas bajo presión.
- Válvula de relevo (de vapor únicamente).
- Evaporación de charco líquido.
- Generación de productos tóxicos de combustión como resultado de un fuego.

##### 3) Fugas bifásicas: mezclas de gas y líquido a menudo resultantes de la ebullición del líquido en las condiciones de descarga.

- Orificio en un tanque de almacenamiento (o tubería) a presión que contiene un líquido sobre su punto normal de ebullición.
- Válvula de relevo (p. ej. debido a una reacción fuera de control).

#### **1.4.3 Modelo termodinámico**

El objetivo principal de un modelo de fugas consiste en describir adecuadamente dos variables:

- La cantidad de fluido liberada, y
- Las condiciones de presión y temperatura de la sustancia fugada.

Los modelos aplicados tratan dos tipos de procesos:

- **Isotérmico:** es aquel que se produce sin cambio de temperatura. Se suele producir cuando no hay cambios importantes de densidad (líquidos), o el proceso es lento y el fluido en el recipiente tiene una inercia térmica suficiente o cuando la presión en el recipiente se mantiene casi constante durante la fuga.
- **Adiabático:** es aquel proceso que se realiza sin transferencia de calor con el exterior. Se produce cuando el fluido sufre grandes cambios de densidad muy rápidamente o cuando el recipiente está térmicamente aislado. Es el caso de los procesos en los que el calor que recibe el recipiente desde el exterior, durante el tiempo que dure la fuga, es prácticamente despreciable frente a la energía del fluido que contiene el recipiente. Para el caso adiabático,  $\Delta S=0$  para un proceso reversible únicamente.

Para descargas de gases a través de tuberías son válidos tanto el modelo de flujo adiabático como isotérmico. Para descargas de gases a la misma temperatura y presión, el modelo de flujo adiabático predice un flujo mayor, que el isotérmico. El flujo real está en un sitio intermedio entre estos valores. Las fugas durante el trasiego, carga y transporte de productos peligrosos, se analizan generalmente utilizando los modelos isotérmicos.

Para definir completamente el modelo de liberación, debe proporcionarse información respecto a la geometría de la liberación, esto es, el tamaño del orificio; la duración de la fuga, las propiedades físicas de la sustancia, entre otros.

**Tamaño del orificio.** Un dato de entrada para cálculos de descarga es el tamaño del orificio. Para liberaciones a través de un sistema de relevo, pueden ser usadas las dimensiones reales de la válvula o tubería. Para determinar el diámetro del orificio de la descarga de un equipo o tubería, el analista puede guiarse en un análisis de riesgos o empleando alguna metodología, por ejemplo, el Banco Mundial (1985) sugiere diversos diámetros de orificio, para tuberías, propone un rango del 20 a 100% del diámetro.

**Duración de la fuga.** De acuerdo con los estándares de seguridad federales del Departamento de Transporte de Gas Natural Licuado de los EU (1980) se establece que la duración de una fuga es de 10 minutos, sin embargo, se puede usar un tiempo de 3 minutos si hay un sistema de detección de fugas combinado con válvulas aisladas de actuación remota. Otros analistas usan una duración menor. La duración real de la liberación depende de la detección y tiempo de reacción de dispositivos de aislamiento automatizados y tiempo de respuesta de operadores para aislamiento manual. La rapidez de cierre de válvulas en tuberías largas puede influenciar el tiempo de respuesta. Debido al efecto de golpe de ariete, los diseñadores pueden limitar la velocidad de cierre en tuberías de líquido.

Según la duración y tamaño del escape se pueden clasificar las fugas en:

- Fuga instantánea: colapso del recipiente por vertido muy rápido de su contenido.
- Fuga continua o semicontinua: pérdida de contenido de magnitud y duración limitadas.

**Otras variables.** Otras variables especiales a considerar cuando se analizan descargas incluyen las siguientes:

- Dependencia del tiempo de descargas transientes (transitorias): rapidez de liberación decreciente debido a que decrece la presión después del orificio.
- Reducción del flujo: válvulas, bombas u otras restricciones en la tubería que pueden reducir la velocidad de flujo debajo de la estimada por la caída de presión y área de descarga.
- Inventario en la tubería o equipo de proceso entre la fuga y cualquier dispositivo de aislamiento.

#### 1.4.4 Ecuaciones fundamentales

Los modelos de descarga están basados en un balance de energía mecánica. Una forma general de este balance es:

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c}(z_2 - z_1) + \frac{1}{2g_c}(v_2^2 - v_1^2) + \Sigma e_f + \frac{W_s}{\dot{m}} = 0 \quad 1.2$$

Donde:

$P$  Presión (fuerza/área)

$\rho$  Densidad (masa / volumen)

$g$  Aceleración debida a la gravedad (longitud / tiempo<sup>2</sup>)

$g_c$  Constante gravitacional (fuerza/ masa-aceleración)

$z$  Altura vertical de algunos datos de referencia (longitud)

$v$  Velocidad del fluido (longitud / hora)

$e_f$  Término de pérdidas de energía mecánica por fricción (longitud<sup>2</sup> / tiempo<sup>2</sup>)

$W_s$  Trabajo realizado (energía mecánica/tiempo)

$\dot{m}$  Flujo másico (masa/hora)

El término de pérdidas por fricción,  $\Sigma e_f$  representa las pérdidas de energía mecánica debida a la fricción e incluye pérdidas debidas al flujo a través de la longitud de la tubería; accesorios tales como válvulas, codos, orificios, entradas y salidas de tubería.

##### 1.4.4.1 Descargas de líquido

Para descargas de líquidos, la fuerza impulsora para la descarga es normalmente la presión, la energía de la presión se convierte en energía cinética durante la descarga. Ya que la densidad permanece constante durante la descarga, el término de presión de la Ecuación de energía mecánica (1.2), se puede integrar directamente resultando la ecuación 1.3 (cuando la densidad,  $\rho$ , es constante).

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{g}{g_c} \cdot (Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2 \cdot g_c} \cdot (V_2^2 - V_1^2) + \Sigma e_f + \frac{W_s}{\dot{m}} = 0 \quad 1.3$$

Donde  $\Sigma e_f$  representa las pérdidas de energía mecánica por fricción; si se considera que no hay pérdidas por fricción y que no hay trabajo, la ecuación resultante es la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{g}{g_c} (z_2 - z_1) + \frac{1}{2g_c} (v_2^2 - v_1^2) = 0 \quad 1.4$$

Si el balance se realiza a través de dos puntos en una tubería de sección transversal constante, entonces  $v_2 = v_1$  y la Ec. (1.4) se puede simplificar aún más. El modelo es desarrollado a partir del balance de energía mecánica, Ec. (1.2), suponiendo que el término de pérdida por fricción es representado por un coeficiente de descarga,  $C_D$ . El resultado es la ecuación 1.5, y dicho coeficiente,  $C_D$ , cuando se trata de líquidos, está entre 0.6 y 0.8.

$$\dot{m} = AC_D \sqrt{2\rho g_c (P_1 - P_2)} \quad 1.5$$

Donde:

- $\dot{m}$  Velocidad de descarga de líquido (masa/ hora)
- $A$  Área del orificio (longitud<sup>2</sup>)
- $C_D$  Coeficiente de descarga (adimensional)
- $\rho$  Densidad del líquido (masa/volumen)
- $g_c$  Constante gravitacional (fuerza/ masa-aceleración)
- $P_1$  Presión antes del orificio (fuerza/área)
- $P_2$  Presión después del orificio (fuerza/área)

Multiplicando la ecuación de balance de energía por  $g_c$  se obtiene la ecuación para el cálculo de la velocidad final en la descarga ( $V_2$ ):

$$e_f = k_f * \left( \frac{V_2^2}{2 * g_c} \right) \quad 1.6$$

Donde:

- $e_f$  representa el término por pérdidas de energía mecánica por fricción (longitud<sup>2</sup> / tiempo<sup>2</sup>)
- $k_f$  son las pérdidas en la energía hidráulica debido a la fricción en la tubería o accesorios (adimensional)
- $v$  es la velocidad del fluido (longitud/tiempo)

El cálculo del flujo másico es estimado mediante:

$$\dot{m} = \rho * v_2 * A \quad 1.7$$

La ecuación 1.4 puede ser usada para modelar cualquier liberación de líquido a través de un orificio, siempre que las presiones, el área de orificio y el coeficiente de descarga son conocidos o estimados.

Para orificios en tanques, la presión antes del orificio depende de la presión sobre la cabeza del líquido y la presión sobre el líquido en el espacio vapor.

Para orificios en tanques, la descarga de material a través del orificio da como resultado una pérdida de líquido y un descenso en el nivel de líquido. Un balance de masa total de líquido en el tanque para obtener una expresión general para el tiempo de vaciado del tanque es la ecuación 1.8.

$$t = \frac{1}{AC_D \sqrt{2g}} \int_{V_2}^{V_1} \frac{dV(h_L)}{\sqrt{h_L}} \quad 1.8$$

Donde:

t Tiempo de vaciado del tanque del volumen  $V_2$  al Volumen  $V_1$  (tiempo)

V Volumen de líquido en el tanque sobre el orificio (longitud<sup>3</sup>)

H Altura de líquido sobre la fuga (longitud)

Esta ecuación (1.8) supone un área de fuga constante,  $A$ , y un coeficiente de descarga constante  $C_D$ . Esta ecuación puede ser integrada, una vez que se especifica el volumen en función de la altura,  $V = V(h)$ . La rapidez de descarga de la masa de líquido de un orificio en un tanque es determinado usando la siguiente ecuación (1.9) que supone que, la fricción es representada por un coeficiente de descarga,  $C_D$  y se incluye para la presión debida a la cabeza de líquido encima el agujero.

$$m = \rho v A = \rho A C_D \sqrt{2 \left( \frac{g_c P_g}{\rho} + g h_L \right)} \quad 1.9$$

Donde:

$m$  Velocidad de descarga de líquido (masa/ tiempo)

$A$  Área del orificio (longitud<sup>2</sup>)

$v$  Velocidad del fluido (longitud /tiempo)

$C_D$  Coeficiente de descarga (adimensional)

$\rho$  Densidad del líquido (masa/volumen)

$g_c$  Constante gravitacional (fuerza/ masa-aceleración)

$P_g$  Presión manométrica en la parte superior del tanque (fuerza/área)

$g$  Aceleración debida a la gravedad (longitud/tiempo<sup>2</sup>)

$h_L$  Altura de líquido por encima del orificio (longitud)

Esta ecuación se aplica a cualquier tanque de cualquier geometría. La descarga de masa disminuye con el tiempo conforme el nivel de líquido desciende. El caudal máximo ocurre al inicio cuando se produce la fuga.

#### 1.4.4.2 Descargas de gas

Descargas de gas pueden derivarse de varias fuentes: desde un orificio de un tanque o cercano a este, de una tubería, válvulas de alivio o venteos del proceso. La mayoría de las descargas de gas de plantas de proceso será sónica o estrangulada.

Se supone que el producto fugado se comporta como un gas perfecto. Por tanto, el método es aplicable únicamente para gases y vapores que se encuentren a presiones y temperaturas suficientemente alejadas de las críticas. La integral de la presión en el balance de energía mecánica, Ecuación 1.2, requiere una ecuación de estado y una especificación de ruta termodinámica para completar la integración; especialmente para tuberías es importante saber si la liberación ocurre adiabática o isotérmicamente.

### Método isotérmico

Para descargas de gas a través de orificios, la Ec. (1.2) se integra a lo largo de una ruta isoentrópica para determinar el flujo másico descargado. Esta ecuación supone un gas ideal, y que no hay transferencia de calor ni trabajo externo.

$$\dot{m} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_1} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \right]} \quad 1.10$$

Donde:

- $m$  Flujo másico de gas descargado a través del orificio (masa/ tiempo)
- $A$  Área del orificio (longitud<sup>2</sup>)
- $C_D$  Coeficiente de descarga (adimensional)
- $P_1$  Presión antes del orificio (fuerza/área)
- $P_2$  Presión después del orificio (fuerza/área)
- $g_c$  Constante gravitacional (fuerza/ masa-aceleración)
- $M$  Peso molecular del gas (masa/mol)
- $k$  Relación de la capacidades caloríficas,  $C_p/C_v$  (adimensional)
- $R_g$  Constante de gas ideal (presión-volumen/mol-grado)
- $T_1$  Temperatura inicial del gas antes del orificio (grado)

El máximo flujo liberado se produce cuando la velocidad de descarga del gas alcanza la velocidad sónica. En este punto, el flujo pasa a ser independiente de la presión después del orificio y depende sólo de la presión antes del orificio. La ecuación que representa el caso sónico, o estrangulado, y que siempre predice un flujo máximo de descarga es:

$$\dot{m}_{choked} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{k g_c M}{R_g T_1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/k-1}} \quad 1.11$$

La relación de presión necesaria para lograr el estrangulamiento está dada por:

$$\frac{P_{estrangulado}}{P_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad 1.12$$

### Método adiabático

Para calcular el flujo másico adiabático el primer cálculo es el de las pérdidas por fricción debidas únicamente a los efectos de entrada y salida del flujo por el orificio. Para el número de Reynolds mayor que 10,000; HFL1= 0.5 y HLF2 = 1.0.

$$k_f = HLF1 + HLF2 \quad 1.13$$

Usando la expresión de Darcy para flujo en condiciones sónico y subsónico:

$$m = Y * A * \sqrt{\frac{2 * g_c * \rho * (P_1 - P_2)}{k_f}} \quad 1.14$$

Donde:

$m$  Flujo másico de gas (masa/ tiempo)

$A$  Área del orificio (longitud<sup>2</sup>)

$\rho$  Densidad del gas antes del orificio (masa/volumen)

$P_1$  Presión antes del orificio (fuerza/área)

$P_2$  Presión después del orificio (fuerza/área)

$g_c$  Constante gravitacional (fuerza/ masa-aceleración)

$Y$  Factor de expansión de gas (adimensional)

$K_f$  Sumatoria de los términos de pérdida de energía hidráulica, incluyendo entradas y salidas de la tubería, longitudes de tubería y accesorios (adimensional).

Cuando se considera un flujo turbulento, el factor de fricción es independiente del número de Reynolds. El factor de expansión "Y", depende de las pérdidas de fricción y la capacidad calorífica:

$$Y = e^{0.0006 * \ln(k_f)^3 - 0.0185 * \ln(k_f)^2 + 0.1141 * \ln(k_f) - 0.5304} \quad 1.15$$

Para determinar a qué presión se obtiene el flujo sónico se hace uso de la ecuación 1.16; donde A, B, C y D son constantes. Los valores de éstas se muestran en la tabla A1 del apéndice A.

$$P_s = e^{A(\ln(k_f))^3 + B(\ln(k_f))^2 + C * \ln(k_f) + D} \quad 1.16$$

Para flujos reales en tubería desde un origen a una presión y temperatura dada, el caudal real será menor que en la predicción adiabática y mayor que la predicción isotérmica. El modelo adiabático siempre predecirá un flujo mayor que el real.

#### 1.4.4.3 Descarga a dos fases

El flujo a dos fases requiere un área de alivio más grande en comparación con el venteo de vapor únicamente. Cuando se descarga a la presión atmosférica, cualquier líquido presurizado, por encima de su punto normal de ebullición, iniciará una vaporización súbita y tendrá como resultado un flujo a dos fases; también es probable que ocurra por una despresurización del espacio de vapor por encima de un líquido volátil, especialmente si el líquido es viscoso (por ejemplo, más de 500 cP) o tiene una tendencia a formar espuma.

Los flujos de dos fases, se clasifican como reactivos o no reactivos. El caso reactivo es típico de relevos de emergencia de reacciones químicas exotérmicas. El caso no reactivo supone la vaporización súbita de los líquidos, conforme se liberan. El líquido puede estar almacenado bajo su propia presión de vapor o puede estar subenfriado; en tal caso, el flujo descargado es estrangulado desde su presión de vapor de saturación a la temperatura ambiente. Ambas situaciones se consideran por la siguiente expresión:

$$\dot{m} = A \sqrt{G_{SUB}^2 + \frac{G_{ERM}^2}{N}} \quad 1.17$$

Donde

$m$  Flujo másico descargado a dos fases (masa/tiempo)

$A$  Área de descarga (longitud<sup>2</sup>)

$G_{SUB}$  Flujo másico subenfriado (masa/área-tiempo)

$G_{ERM}$  Flujo másico en equilibrio (masa/área-tiempo)

$N$  Parámetro de no equilibrio (adimensional).

#### 1.4.4.4 Descarga de tanques expuestos a fuego

Cuando la descarga es un relevo debido a exposición a fuego en un sistema no reactivo, puede emplearse un método empírico dado por la Asociación Nacional de Protección contra el fuego, NFPA (por sus siglas en inglés National Fire Protection Association), donde una suposición clave de estos métodos es el flujo de gas únicamente.

$$Q_f = 34,500 FA^{0.82} \quad 1.18$$

Donde

$Q_f$  Calor de entrada a través de la pared del tanque debido a exposición a fuego externo (BTU/Hr)

$A$  Área superficial total del tanque (ft<sup>2</sup>)

$F$  Factor de medio ambiente (adimensional).

Para una instalación resistente al fuego, o un tanque subterráneo o enterrado  $F=0.3$ . Los valores superiores para  $F$  no son multiplicativos si en un lugar se combinan sistemas de protección. El área,  $A$ , es el área superficial entera del tanque, no el área superficial mojada.

La velocidad de descarga del gas,  $m$ , en unidades de masa/tiempo, a través de una válvula de alivio, se obtiene dividiendo el calor de entrada a través de la pared del tanque debido a exposición a fuego externo  $Q_f$ , por el calor latente de vaporización a la presión de relevo,  $h_{fg}$  (energía/masa), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$m = \frac{Q_f}{h_{fg}} \quad 1.19$$

### 1.5 EVAPORACIÓN INSTANTÁNEA Y CONTINUA <sup>[1][19]</sup>

El propósito de los modelos de vaporización súbita o continua es estimar el vapor total o velocidad de vapor que forma una nube como consecuencia de una fuga de líquido o de líquido y gas, para su uso como entrada a modelos de dispersión. Los modelos matemáticos intentan predecir la cantidad de gas o vapor que se desprende de un derrame de líquido en determinadas condiciones de presión, temperatura, velocidad del viento, tipo de suelo y otras variables. Por tanto, se distinguen varios casos posibles de vaporización de líquidos que se mencionan a continuación.

### 1.5.1 Evaporación de líquidos sobrecalentados

Cuando se produce una pérdida de contención o fuga en un depósito con un gas licuado bajo presión en su interior, si el líquido se almacena por encima de su punto de ebullición normal (sobrecalentado), ocurrirá parcialmente una vaporización súbita cuando se descargue a presión atmosférica. El vapor producido puede introducir una cantidad significativa de líquido como gotas. Algo de este líquido puede precipitarse en el suelo y algo puede permanecer suspendido como un aerosol con posible evaporación posterior. El líquido restante en el suelo es probable que forme un charco en ebullición que se evaporará, resultando en vapor adicional que se carga en el aire. Un ejemplo de una descarga sobrecalentada es una descarga de cloro líquido o amoníaco desde un contenedor presurizado almacenado a temperatura ambiente.

### 1.5.2 Evaporación de líquidos hirvientes

Esta situación se produce en la evaporación de derrames de gases licuados por refrigeración (enfriamiento) que se encuentran a su temperatura de ebullición y en la evaporación de derrames procedentes de gases licuados a presión después de la evaporación súbita inicial. La evaporación se produce por la presencia de un líquido que se encuentra a su temperatura de ebullición.

### 1.5.3 Evaporación de líquidos no hirvientes

Son aquellas sustancias líquidas a temperatura ambiente y que se almacenan a esta temperatura. El resultado es la formación de un charco líquido no hirviente, a partir del cual tiene lugar una evaporación más o menos intensa. La evaporación del líquido se produce por la difusión de sus propios vapores, así como por efecto de arrastre del viento.

El modelo para una fuga o derrame de un líquido que se evapora está basado en la ecuación de Dispersión Gaussiana de un gas o vapor.

### 1.5.4 Vaporización súbita

Para predecir la fracción de líquido que se vaporiza súbitamente se considera que el calor sensible contenido dentro del líquido sobrecalentado, debido a su temperatura por encima de su punto de ebullición normal, es usado para vaporizar una fracción de líquido. Este análisis isoentálpico conduce a la ecuación 1.20 para la fracción vaporizada:

$$F_v = C_p \frac{(T - T_b)}{h_{fg}} \quad 1.20$$

Donde:

$C_p$  Capacidad calorífica del líquido, promediada sobre  $T$  a  $T_b$  (energía / masa grados)

$T$  Temperatura inicial del líquido (grados)

$T_b$  Punto de ebullición atmosférico del líquido (grados)

$h_{FG}$  Calor latente de vaporización del líquido a  $T_b$  (energía / masa)

$F_v$  Fracción de masa de líquido descargado vaporizado (adimensional)

$F_v$ , no representa la masa total de material en la nube de vapor, ya que esta puede verse incrementada debido a la posible presencia de líquido entrante como gotas (aerosol), entre otros factores.

### 1.5.5 Efecto del arrastre de aerosoles

El arrastre de aerosoles tiene efectos muy significativos en la dispersión de la nube, que incluyen:

- La nube tendrá una mayor masa total.
- La evaporación de aerosoles puede reducir la temperatura por debajo de la temperatura atmosférica (contribuyendo a una mayor densidad de la nube).
- El enfriamiento de la nube puede causar condensación adicional de la humedad atmosférica (contribuyendo a una mayor densidad de la nube).

En conjunto, estos efectos tienden a aumentar significativamente la densidad real de la nube de vapor que se formó a partir de la vaporización en la descarga. La predicción de estos efectos es necesaria para iniciar correctamente los modelos de dispersión. Una práctica común para estimar la formación de aerosoles es asumir que la fracción de aerosol es igual a algún múltiplo de la fracción vaporizada típicamente 1 ó 2.

### 1.5.6 Cálculos para determinar la evaporación

La evaporación de derrames en tierra está mejor definido que en agua ya que muchos de los derrames ocurren en un dique o en otro sistema de retención que permite que el tamaño del charco sea bien estimado. Los derrames en agua no están limitados y los cálculos son más empíricos. La vaporización de un charco se determina mediante un balance de energía total en el charco:

$$mC_p \frac{dT}{dt} = H - Lm_v \quad 1.21$$

Donde:

$m$  Masa del charco (masa)

$C_p$  Capacidad calorífica del líquido, promediada sobre  $T$  a  $T_b$  (energía / masa grados)

$T$  Temperatura del líquido en el charco (grados)

$t$  Tiempo (tiempo)

$H$  Flujo de calor total dentro del charco (energía/tiempo)

$L$  Calor de vaporización del líquido (energía / masa)

$m_v$  Velocidad de evaporación (masa / tiempo)

Para líquidos que tienen un punto normal de ebullición cercano o por encima de la temperatura ambiente, el mecanismo limitante es la transferencia de masa. La rapidez de vaporización puede ser evaluada mediante la ecuación 1.22.

$$m_{masa} = \frac{M * k_g * A * P_{sat}}{R_g * T_L} \quad 1.22$$

Donde:

- $m_{\text{masa}}$  Velocidad de evaporación de transferencia de masa (masa/tiempo)
- M Peso molecular del material vaporizándose (masa-mol)
- $k_g$  Coeficiente de transferencia de masa (longitud/tiempo)
- A Área del charco (longitud<sup>2</sup>)
- $P_{\text{sat}}$  Presión de vapor de saturación del líquido (Fuerza/área)
- $R_g$  Constante de gas ideal (Presión-Volumen/mol-grado)
- $T_L$  Temperatura del líquido (grados abs.)

Es necesario especificar el coeficiente de transferencia de masa,  $k_g$ , por lo que se usa un material de referencia, que generalmente es el agua, para estimar el cambio en el coeficiente de transferencia de masa y el cambio del peso molecular. La ecuación que nos permite calcular el coeficiente de transferencia es la siguiente:

$$k_g = k_o * \left( \frac{M_o}{M} \right)^{1/3} \quad 1.23$$

Donde:

- $k_o$  Coeficiente de transferencia de masa de la sustancia de referencia (longitud/tiempo)
- $M_o$  Peso molecular de la sustancia de referencia (masa/mole)
- M Peso molecular de la sustancia (masa/mole)

La fase inicial de vaporización generalmente se controla mediante la transferencia de calor desde el suelo. Esto es especialmente para un derrame de líquido con un punto de ebullición normal por debajo de la temperatura ambiente o la temperatura de la tierra (es decir, el líquido hirviendo).

### 1.5.7 Difusión de un charco

Si el líquido está contenido dentro de un dique o de otra área limitada físicamente, el área del charco se determina por estos límites físicos si el derrame tiene un volumen lo suficientemente grande como para rellenar el área. Si el charco no está limitado, entonces se esperará que el charco se propague y crezca en el área como una función del tiempo. El tamaño del charco y su propagación son altamente dependientes del nivel de rugosidad de la superficie del terreno. La mayoría de los modelos asumen una superficie plana y lisa.

Una aproximación es asumir un espesor de líquido constante a lo largo del charco. El área del charco, es entonces, determinada directamente del volumen total del material. Resolviendo las ecuaciones de movimiento y de continuidad establecen una ecuación para determinar el radio del charco. Esta ecuación (Ec. 1.24) supone que el derrame es sobre una superficie plana, el crecimiento del charco no está restringido, y el crecimiento del charco será radial y uniforme desde el punto del derrame.

$$r = \left[ \frac{t^3}{C^3 \pi^2 / 6g} \times \frac{\rho Q_{AF}^2}{\mu} \times \cos \beta \sin \beta \right]^{1/5} \quad 1.24$$

Donde:

$r$  Radio del charco (longitud)

$t$  Tiempo después del derrame (tiempo)

$C$  Constante desarrollada a partir de datos experimentales (adimensional)

$g$  Aceleración debida a la gravedad (longitud/tiempo<sup>2</sup>)

$\rho$  Densidad del líquido (masa/volumen)

$Q_{AF}$  Flujo volumétrico de descarga después de la vaporización (volumen/tiempo)

$\mu$  Viscosidad del líquido (masa/longitud-tiempo)

$\beta$  Ángulo entre la superficie del charco y el eje vertical perpendicular al suelo (grados)

$C$ , tiene un valor de 2 para un número de Reynolds superior a 25 y un valor de 5 para un número de Reynolds menor o igual a 25. El número de Reynolds está dada por:

$$N_{Re} = \frac{2Q_{AF}\rho}{\pi \cdot r \cdot \mu} \quad 1.25$$

El ángulo superficial del charco y el eje vertical perpendicular al suelo,  $\beta$ , está dado por

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \left( (0.25 + B)^{0.5} - 0.5 \right)^{0.5} \right] \quad 1.26$$

$$B = \frac{22.489r^4 \rho}{Q_{AF} \mu} \quad 1.27$$

La solución a este modelo es iterativa ya que varios de los parámetros en la ecuación (1.24) dependen del valor del radio del charco, que es el resultado deseado.

## 1.6 MODELOS DE DISPERSIÓN <sup>[1] [7] [13] [19]</sup>

Una predicción precisa de la dispersión atmosférica de los vapores es fundamental para la estimación de consecuencias en un análisis cuantitativo de riesgos de procesos químicos, CPQRA (por sus siglas en inglés Chemical process quantitative risk analysis). Normalmente, los cálculos de dispersión proporcionan un estimado del área afectada y las concentraciones de vapor promedio esperadas.

Los cálculos más simples requieren una estimación de la rapidez de descarga del gas (o la cantidad total liberada), las condiciones atmosféricas (velocidad del viento, hora del día y cobertura de nubes), la rugosidad de la superficie, temperatura, presión y quizás diámetro de descarga. Se pueden definir tres tipos de comportamiento de nubes de vapor y tres diferentes modos de descargas dependientes del tiempo:

Comportamiento de nube de vapor:

- Gas neutro o pasivo: densidad similar a la del aire.
- Gas ligero: densidad menor a la del aire.

- Gas denso (o negativamente) boyante: densidad mayor a la del aire.

#### Duración de la descarga

- Instantánea (puff).
- Liberación continua (plumas).
- Variable continua en el tiempo.

### 1.6.1 Parámetros que afectan a la dispersión de gases

Los parámetros que afectan a la dispersión de gases incluyen: (1) estabilidad atmosférica, (2) velocidad del viento, (3) efectos locales del terreno, (4) altura de la descarga sobre el suelo, (5) geometría de la liberación, es decir, de un punto de una línea o de un área superficial, (6) momentum del material liberado y (7) la boyancia del material liberado.

#### 1.6.1.1 Estabilidad atmosférica

Las condiciones meteorológicas en el momento de la descarga tienen una gran influencia sobre el grado de dispersión. Algunos de estos efectos se muestran en la figura de 1.1, donde el comportamiento de la pluma cambia notablemente dependiendo de la estabilidad de la atmósfera, esto es un estimado del mezclado turbulento; las condiciones atmosféricas estables dan lugar a la menor cantidad de mezclado y condiciones inestables.

La estabilidad comúnmente se define en términos del gradiente vertical de temperatura atmosférica. El gradiente de temperatura vertical se refiere a la distribución vertical de temperatura en la atmósfera. La temperatura, generalmente, disminuye con el incremento de la altitud debido a que aumenta la distancia de la fuente de calor que es la superficie terrestre.

Las condiciones atmosféricas normalmente se clasifican en seis clases de estabilidad de Pasquill (denotadas por las letras A a F, donde A representa la condición menos estable, mientras F representa la más estable) como se muestra en la tabla 1.2. Las clases de estabilidad están correlacionadas a la velocidad del viento y la cantidad de luz solar. Durante el día, aumenta la velocidad del viento lo que resulta en una menor estabilidad atmosférica, mientras que por la noche, sucede lo contrario. Esto es debido a un cambio en el perfil vertical de temperatura del día a la noche.

Las condiciones de estabilidad A y B son llamadas también condiciones superadiabáticas, corresponden a vientos ligeros con insolación como la observada en una tarde de verano. La categoría C es una condición ligeramente inestable muy similar a A y B con vientos moderados a fuertes. La categoría D es neutra con vientos fuertes durante el día o la noche. Las categorías estables E y F ocurren durante la noche con brisas ligeras de cielos despejados o con baja nubosidad.

En una atmósfera inestable se cuenta con una dispersión vertical, la cual dispersa humo, polvo y otros productos de emisión peligrosa; cuando existe poca o nula actividad vertical para el ascenso de dichas sustancias estas se acumulan en la parte más baja de la atmósfera impidiendo una visibilidad aceptable y sobre todo la acumulación de contaminantes a nivel de piso puede producir incendios y explosiones.

Tabla 1.2 Condiciones meteorológicas para definir las clases de estabilidad Pasquill-Gifford.

Velocidad superficial del viento		Radiación solar durante el día.			Cobertura de nubes en la noche		A cualquier hora
(m/s)	(MPH*)	Fuerte	Moderada	Ligera	Ligeramente nublado > 4/8 nubes bajas	≥3/8 niebla	Nublado espeso
<2	< 5	A	A-B	B	F	F	D
2-3	5-7	A-B	B	C	E	F	D
3-4	7-11	B	B-C	C	D	D	D
4-6	11-13	C	C-D	D	D	D	D
>6	> 13	C	D	D	D	D	D

Fuente: (DeVaul, George E., et-al, 1995)

Nota:\*Millas por hora

Donde

- A Condiciones extremadamente inestables-soleado, vientos ligeros.
- A-B Inestable - como con A solo que menos sol o más viento.
- B Moderadamente inestable-como con A-B solo que con menos sol o más viento.
- B-C Moderadamente inestable-moderadamente soleado y moderadamente ventoso.
- C Ligeramente inestable-mucho viento/soleado o nublado/poco viento.
- C-D Ligeramente inestable-moderadamente soleado y alto viento.
- D Neutral-poco sol y fuerte viento o nublado/noche ventosa.
- E Condiciones Estables-noche menos nublada y menos ventosa que D.
- F Estable-noche con nubes moderadas y viento ligero-moderado.

### 1.6.1.2 Capa de inversión

Existen varios tipos de inversión térmica. Uno de estos tipos de inversión es a nivel de superficie terrestre, este caso tiende a ocurrir en noches de cielos despejados y vientos ligeros, en cuyo caso la superficie (suelo) y el aire pierden calor por radiación. Esta condición es igualmente llamada inversión por radiación.

Otro tipo de inversión es la llamada inversión elevada. Cuando una gran masa de aire frío fluye hacia una zona con poca altitud que se encuentre entre valles, esta masa desplaza aire caliente del lugar a una altura que va de los 500m a 1 Km.

La temperatura del aire, por lo tanto, disminuye de manera normal del nivel de piso hasta alguna altura, supóngase 600m, cuando el aire frío que se encuentra en la parte inferior de la atmósfera alcanza al aire caliente que se ubica arriba del mismo, la temperatura del aire aumenta con la altura. A esta región de incremento de la temperatura con la altura se le llama capa de inversión. El aire contaminado denso y frío que se encuentre debajo de esa capa no podrá ascender o elevarse; la capa de inversión actúa como una especie de pared o tapa, con la consecuente presencia de contaminantes a concentraciones elevadas al nivel del suelo.

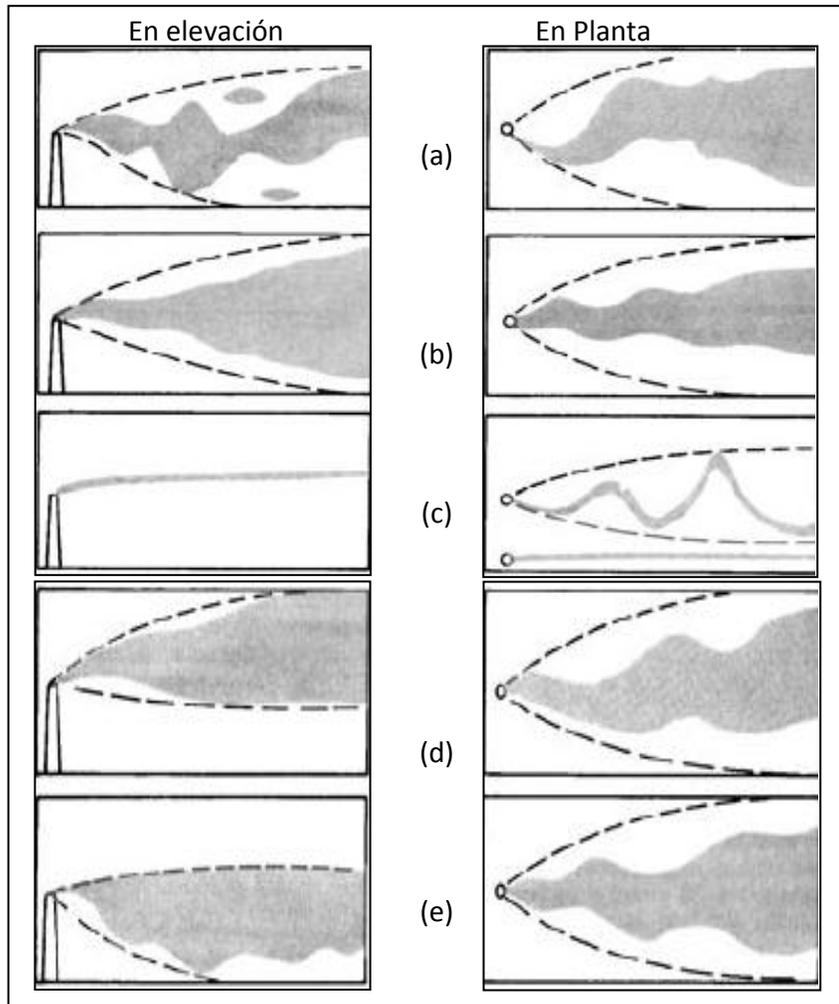


Figura. 1.1. Efectos de la estabilidad atmosférica en la dispersión de la pluma **(a)** inestable (sinuoso, estabilidades clase A,B); **(b)** Neutral (enconado, estabilidad clase D); **(c)** Estable (Horizontal, estabilidades clase E,F); **(d)** Estable (Elevado); **(e)** Muy estable (fumigado). (Lees, 1986)

### 1.6.1.3 Turbulencia

El flujo de aire es un movimiento en dirección horizontal que se caracteriza por ser un flujo laminar, pero cuando se presentan las condiciones necesarias para deshacer el flujo laminar del aire, se causa turbulencia dichas condiciones son:

- Efectos fricciónales, los cuales pueden producirse por irregularidades topográficas (montañas, cerros o superficies de piso irregular) o por barreras artificiales (construcciones y chimeneas industriales, entre otros).
- Cambios térmicos, los cuales se producen cuando la superficie de la tierra es más caliente o más fría que el aire lo cual resulta en una corriente de aire.
- Masa de aire, son indicadores de un cambio de clima. Los disturbios frontales pueden ser débiles o fuertes, siendo muy comunes en algunas áreas y raros en otras.

#### **1.6.1.4 Velocidad del viento**

La velocidad del viento es importante ya que cualquier gas emitido será diluido inicialmente por volúmenes de aire transitorios. Conforme se incrementa la velocidad del viento, el material es llevado en la dirección del viento más rápidamente, pero el material es así mismo diluido más rápido por una mayor cantidad de aire.

Cuando la temperatura desciende, tienden a reunirse las partículas de aire ejerciendo lógicamente mayor presión que cuando la temperatura es alta y las partículas se hayan dispersas. Al haber diferente temperatura y presión entre dos lugares, se origina el viento, que puede definirse como: el aire en movimiento horizontal, es decir, con curso paralelo a la superficie de la tierra.

En base a los elementos termodinámicos del clima (temperatura, presión y vientos) activados por la insolación (cantidad de energía solar absorbida por la superficie de la corteza terrestre), se ha formulado un modelo de circulación atmosférica.

- Movimiento convectivo de aire: movimientos perpendiculares, ya sea en ascenso o descenso.
- Moviendo advectivo del aire: movimientos paralelos al plano de referencia hacia la derecha o hacia la izquierda.

Normalmente, los cálculos de dispersión se efectúan considerando la velocidad del viento a una altura de 10m sobre el suelo; sin embargo, para descargas de materiales densos, los cuales permanecen cerca del nivel del suelo, los datos del viento deben corregirse a la altura adecuada, pues las velocidades del viento se reducen sustancialmente conforme disminuye la altura, debido a los efectos de fricción.

#### **1.6.1.5 Efectos locales del terreno**

Las características del terreno afectan el mezclado mecánico del aire que fluye sobre el suelo. Por lo tanto, la dispersión sobre un lago es considerablemente diferente de la dispersión en un bosque o en una ciudad de altos edificios. La mayoría de los datos de campo y prueba de dispersión son en terrenos planos y rurales. Valores observados para la rugosidad de la superficie,  $Z_0$ , se muestran en la tabla A2 del Apéndice A.

#### **1.6.1.6 Altura de la descarga sobre el suelo**

A medida que aumenta la altura de descarga, la concentración a nivel de suelo disminuye ya que la longitud de la pluma en la dirección del viento se incrementa, teniendo así más distancia para mezclarse con aire fresco antes de tocar el suelo. Obsérvese que la concentración inmediatamente en la dirección del viento a la altura de la descarga permanece sin cambio.

#### **1.6.1.7 Geometría de la descarga**

Una descarga ideal para un modelo de dispersión Gaussiano sería de un punto fijo, sin embargo, las descargas reales son más propensas a presentarse como una liberación en línea (a partir de un chorro de material escapando), o como un área (de un charco de líquido en ebullición). Conforme se incrementa la altura de la liberación, la distancia en la dirección del viento se incrementa, lo que permite mayor dispersión y menor concentración a nivel de suelo.

### 1.6.1.8 Momentum y boyancia del material liberado

Una pluma de gas presenta una combinación de comportamiento de gas denso y Gaussiano, inicialmente la pluma asciende debido al momentum, seguido por una inclinación y hundimiento de la pluma debido a los efectos de gas denso. Lejos de la descarga, en la dirección del viento, debido al mezclado con aire fresco, la pluma se comportará como una nube neutral boyante.

### 1.6.2 Modelos de nube boyante positiva y neutral, liberada instantánea o continuamente

El modelo de dispersión Gaussiana es el método más común para estimar la dispersión de un gas. El método aplica solo para nubes boyantes neutrales y provee un estimado de las concentraciones promedio de vapor y perfiles de tiempo en la dirección del viento.

Las concentraciones predichas por los modelos de Gauss son promedios de tiempo. El tiempo promedio se define como el “intervalo de tiempo especificado por el usuario sobre el cual la concentración instantánea, velocidad de liberación de masa, o cualquier otra variable es promediada”. La mayoría de los modelos Gaussianos Pasquill- Guifford incluyen un tiempo promedio implícito en los coeficientes de dispersión de 10 minutos.

Dado que las concentraciones predichas son en tiempo promedio, se debe considerar que la concentración en algún punto pudiera ser mayor que este promedio; este resultado es importante cuando se estima la dispersión de materiales altamente tóxicos o inflamables donde las fluctuaciones de la concentración local pueden tener un impacto significativo en las consecuencias.

Los coeficientes de dispersión,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , y  $\sigma_z$ , son definidos como la desviación estándar de la concentración en la dirección del viento, perpendicular al viento, y en la vertical (x, y, z) respectivamente. Los coeficientes de dispersión son una función de las condiciones atmosféricas y la distancia en la dirección del viento desde la liberación. Los coeficientes de dispersión  $\sigma_y$ , y  $\sigma_z$ , para difusión de plumas Gaussianas pueden ser estimados empleando la tabla A3 del apéndice A, donde x, representa la distancia en la dirección del viento.

Las emisiones de corta duración se dispersan de modo diferente respecto a las continuas, por ello es necesario el uso de coeficientes de dispersión adecuados para este tipo de emisiones ( $\sigma_y$ , y  $\sigma_z$ ); las ecuaciones para obtener dichos coeficientes a una distancia requerida, son proporcionadas en la tabla A4 del apéndice A.

#### 1.6.2.1 Modelo para liberaciones instantáneas

La solución al modelo instantáneo, el cual describe las liberaciones instantáneas de material, depende de la cantidad total de material liberado, de las condiciones atmosféricas, de la altura de la descarga sobre el suelo, y la distancia desde la descarga. La ecuación para la concentración promedio para este caso es:

$$\langle c \rangle(x, y, z) = \frac{G^*}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] x \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad 1.28$$

Donde:

- ⟨C⟩ Concentración promedio en el tiempo (masa/volumen)
- G\* Masa total del material liberado (masa)
- $\sigma_x, \sigma_y, \text{ y } \sigma_z$ , Coeficientes de dispersión en las direcciones x, y, y z (longitud)
- y Dirección perpendicular al viento (longitud)
- z Distancia por encima del suelo (longitud)
- H Altura de descarga por encima del suelo (longitud)

La Ecuación 1.28 asume la dispersión desde un punto elevado sin absorción del suelo o reacción. El centro del sistema de coordenadas sigue estando en el centro de la nube liberada instantáneamente conforme se mueve en la dirección del viento.

La velocidad del viento no aparece explícitamente en la ecuación 1.28. Está implícita a través de los coeficientes de dispersión, ya que estos son una función de la distancia en la dirección del viento desde la liberación inicial y las condiciones de estabilidad atmosférica.

Los límites de la nube a una concentración fija se denominan *isopletas*. Las ubicaciones de estas se encuentran dividiendo la ecuación ⟨C⟩(x, 0, 0, t) (concentraciones a lo largo de línea central), por la ecuación de concentración general a nivel de suelo 1.28, la expresión resultante se resuelve para y, resultando la ecuación 1.29.

$$y = \sigma_y \sqrt{2 \ln \left( \frac{\langle C \rangle(x, 0, 0, t)}{\langle C \rangle(x, y, 0, t)} \right)} \quad 1.29$$

Donde y es la distancia al centro a la isopleta (longitud), ⟨C⟩(x, 0, 0, t), es la concentración en la línea central en la dirección del viento (masa/volumen), y ⟨C⟩(x, y, 0, t), es la concentración en la isopleta. Esta ecuación aplica a descargas a nivel del suelo y elevadas.

### 1.6.2.2 Modelo para liberaciones continuas

La solución al modelo de pluma, el cual describe una descarga continua de material, depende de la rapidez de descarga, de las condiciones atmosféricas, de la altura de la descarga sobre el suelo, y de la distancia desde la descarga. En este caso, el viento se mueve a velocidad constante, u, en la dirección x, por lo que la ecuación para la concentración promedio para este caso es:

$$\langle C \rangle(y, z) = \frac{G}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad 1.30$$

Donde:

- ⟨C⟩ (y,z) Concentración promedio (masa /volumen)
- G Velocidad de descarga continua (masa/tiempo)
- $\sigma_y, \text{ y } \sigma_z$ , Coeficientes de dispersión en las direcciones y y z (longitud)
- y Dirección perpendicular viento (longitud)
- z Distancia por encima del suelo (longitud)
- u Velocidad del viento (longitud/tiempo)

### H Altura de descarga por encima del suelo más la elevación de la nube (longitud)

La ecuación 1.30 considera la dispersión desde una fuente puntual elevada sin absorción en el terreno o reacción. Para descargas a nivel de suelo, la concentración máxima ocurre en el punto de descarga. Para concentraciones sobre el nivel del suelo, la concentración máxima en el suelo ocurre a lo largo de la línea central en la dirección del viento.

Los modelos gaussianos representan bien la naturaleza aleatoria de turbulencia. Los coeficientes de dispersión  $\sigma_y$ , y  $\sigma_z$ , son empíricos, pero los resultados concuerdan bien con los datos experimentales así como con otros modelos más teóricos. Estos son normalmente limitados a predicciones entre 0.1 y 10 Km.

El resultado principal del modelo de pluma es la concentración al tiempo promedio a una localización específica (en las tres coordenadas espaciales: x,y,z) en la dirección del viento desde la fuente. Para nubes tóxicas o inflamables puede ser deseable trazar una isopleta particular correspondiente a la concentración de interés. Esta isopleta usualmente toma la forma de una elipse sesgada.

#### 1.6.3 Dispersión de gas denso

Un gas denso se define como cualquier gas cuya densidad es mayor que la densidad del aire ambiente a través del cual se está dispersando. Este resultado puede ser debido a un gas con un peso molecular mayor que el del aire, o de un gas con una baja temperatura debido a auto-refrigeración durante la descarga, u otros procesos.

Los gases pesados muestran una elevación inicial de la pluma debido al impulso de salida. Los mecanismos de dispersión de gas denso difieren notablemente de las nubes neutrales boyantes. La mayoría de las descargas inflamables no siguen un comportamiento neutral o Gaussiano ya que la mayoría de ellas son más pesadas que el aire. Como la descarga se mezcla con el aire, se diluye, dado que la turbulencia atmosférica normal predomina sobre las fuerzas gravitacionales y el modelo gaussiano aplicará finalmente, pero la nube ya no será inflamable. Dos de los modelos más empleados son el de caja y el de Britter McQuaid.

### 1.7 INCENDIOS Y EXPLOSIONES

El objetivo de esta sección es revisar los tipos de modelos disponibles para estimar las consecuencias de explosiones accidentales e incidentes de fuego.

#### 1.7.1 Explosión de nube de vapor (VCE, por sus siglas en inglés Vapor Cloud Explosion) <sup>[1] [3] [12]</sup> <sub>[25] [31] [32] [34]</sub>

Las explosiones se clasifican en deflagraciones o detonaciones, dependiendo de sus velocidades relativas de sonido y del frente de combustión en la mezcla que no ha sido consumida. Si la velocidad de propagación de la flama es menor que la propagación del sonido en la mezcla que no ha reaccionado, se produce una deflagración, si es superior ocurre una detonación.

Las detonaciones de las mezclas de gas combustible con aire requieren de cierto grado de confinamiento. Una detonación puede ocurrir directamente, o como una transición de deflagración, si ha ocurrido en el

proceso una aceleración de la rapidez de reacción; evento, este último que puede ocurrir en tuberías, las presiones alcanzadas en las detonaciones son mucho más altas y por lo mismo sus efectos más destructivos.

El fuego es una consecuencia visible de la combustión en determinadas circunstancias y la combustión es una reacción química en la que se libera energía a partir de la oxidación de un material determinado. Para que el fuego se produzca tienen que coexistir tres elementos: combustible, comburente y energía de activación que conforman el conocido "triángulo del fuego"; y para que progrese, la energía desprendida en el proceso tiene que ser suficiente para que se produzca la reacción en cadena. Estos cuatro factores forman lo que se denomina el "tetraedro del fuego", el cual se esquematiza en la figura 1.2.

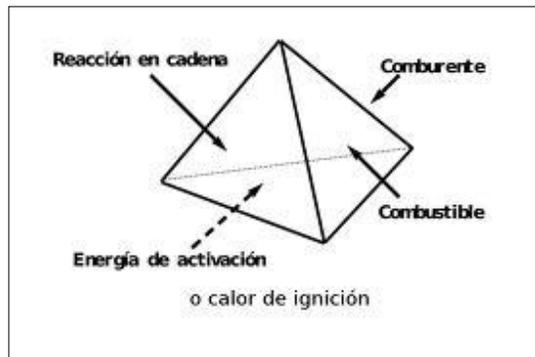


Figura 1.2 Tetraedro del fuego. (Villa, 2010)

Mientras exista energía suficiente, combustible y oxígeno en las proporciones necesarias, el fuego continuará, solamente se extinguirá cuando se consuma uno de los tres componentes, sus parámetros estén fuera de los valores necesarios o intencionalmente se elimine uno de ellos.

Los parámetros importantes en el análisis de incidentes de combustión son las propiedades del material: límites inferior y superior de inflamabilidad (LFL y UFL), punto de inflamación, temperatura de autoignición, calor de combustión, peso molecular y estequiometría de combustión.

La inflamabilidad de una sustancia se refiere a si el combustible puede arder o no en un comburente con una fuente de ignición. El riesgo de que la sustancia arda, depende de los límites de inflamabilidad, los cuales nos proporcionan el intervalo de concentraciones del combustible a la cual la mezcla puede entrar en ignición y arder. De manera que, si una mezcla está por debajo del Límite Inferior Inflamabilidad (LFL), la cantidad de combustible no es suficiente como para propagar la combustión, análogamente si la concentración es mayor al Límite Superior de Inflamabilidad (UFL) no hay cantidad suficiente de comburente para que la reacción se propague lejos de la fuente de ignición. Generalmente estos valores son determinados experimentalmente, pero en caso de que no se puedan determinar, existen ecuaciones empíricas para su estimación, por ejemplo las ecuaciones de Jones:

$$\text{LFL} = 0.55 C_{\text{est}} \quad 1.31$$

$$\text{UFL} = 3.50 C_{\text{est}} \quad 1.32$$

Donde  $C_{\text{est}}$  es la concentración estequiométrica del punto inflamable. Otra relación empírica utilizada en aire es la de Spakowski:

$$\text{LFL}*(-\Delta H_{\text{comb}}) = 4.354 \times 10^{-3} \quad 1.33$$

Donde  $(-\Delta H_{\text{comb}})$  es el calor de combustión estándar expresado en KJ/mol.

Los límites de inflamabilidad pueden modificarse por las condiciones ambientales, tal como la presión, la temperatura y la concentración de oxígeno.

#### **1.7.1.1 Factores que generan una Explosión de Nube de Vapor**

Cuando se libera rápidamente una gran cantidad de líquido o gas inflamable vaporizando, se forma una nube de vapor y se dispersa con el aire circundante. Si esta nube se enciende antes de que la nube se diluya debajo de su límite inferior de inflamabilidad (LFL), ocurrirá un flamazo o una VCE. La principal consecuencia de una VCE es una sobrepresión que resulta mientras la principal consecuencia de un flamazo es el contacto directo con la flama y la radiación térmica.

Hay cuatro características que deben estar presentes para que se produzca una VCE. En primer lugar, el material de liberación debe ser inflamable. En segundo lugar, se debe formar una nube de suficiente tamaño antes de la ignición, retrasos de 1 a 5 minutos son los más probables para generar explosiones de nube de vapor, pero pueden ir de 6s, hasta 60 minutos. Tercero, una cantidad suficiente de la nube debe estar dentro del rango inflamable. Cuarto, debe existir suficiente confinamiento o mezclado turbulento de una porción de la nube de vapor.

Una configuración industrial con densas concentraciones de equipos de proceso en las plantas químicas o refinerías y grandes grupos de acoplamiento de ferrocarril, contribuyen a causar estallidos fuertes en explosiones de nube de vapor. También pueden actuar como generadores de estallido ciertas estructuras en configuraciones no industriales, por ejemplo, túneles, puentes, alcantarillas y estacionamientos llenos.

#### **1.7.1.2 Fuentes de ignición**

Todos los materiales poseen una energía mínima de ignición, la cual es particular y varía con las condiciones ambientales como presión y composición de la mezcla combustible; por tanto, para que ocurra la inflamación de una sustancia o mezcla se le debe suministrar dicha energía mínima de ignición.

Las nubes de vapor inflamable pueden ser encendidas por un número de fuentes que pueden ser continuas por ejemplo, superficies calientes, pilotos de llamas, chispas y calor debidos a la fricción; u ocasionales tal como, fumar, vehículos, sistemas eléctricos, descarga estática, ignición espontanea, ignición intencionada. Un sitio con muchas fuentes de ignición en o alrededor de ella tiende a impedir que las nubes alcancen su grado de riesgo completo, como la mayoría de esas nubes encontraría una fuente de ignición, antes de que esto ocurra. Por el contrario, pocas nubes en un sitio como tal se dispersan con seguridad antes de ignición.

### 1.7.1.3 Modelos de VCE's

#### 1.7.1.3.1 Modelo de equivalencia de TNT

El modelo equivalente en TNT es utilizado en la predicción de sobrepresiones a una distancia determinada del centro de explosión. Ese modelo puede aplicarse a la estimación de efectos de una UVCE y se basa en la ley de escalado (establecida empíricamente), que establece que los efectos de dos explosiones son los mismos sobre puntos que se encuentran a la misma distancia reducida (o escalada) expresada como:

$$z = \frac{R}{(W_{TNT})^{1/3}} \quad 1.34$$

Donde:

z Distancia escalada (m/Kg<sup>1/3</sup>)

R Distancia a la cual se desea estimar el efecto de la explosión (m)

W<sub>TNT</sub> Masa equivalente de TNT (Kg)

El modelo de equivalencia de TNT se basa en el supuesto de equivalencia entre el material inflamable y el TNT, factorizado por un término de eficiencia de explosión:

$$W_{TNT} = \frac{\eta M E_C}{E_{TNT}} \quad 1.35$$

Donde:

W<sub>TNT</sub> Masa equivalente de TNT (Kg o lb)

η Eficiencia de explosión empírica (adimensional)

M Masa de hidrocarburos (Kg o lb)

E<sub>C</sub> Calor de combustión de gas inflamable (KJ/kg o Btu/lb)

E<sub>TNT</sub> Calor de combustión de TNT (4437-4765 KJ/Kg o 1943-2049 Btu/lb).

η es el cociente entre la energía en la onda de choque y la energía teóricamente disponible en la explosión, este rendimiento de la explosión de la nube inflamable es empírico, tomando como base de cálculo la cantidad total de vapor inflamable en la nube, está entre 1 y 10% para la gran mayoría de las explosiones.

Los parámetros importantes para caracterizar a la onda de sobrepresión generada por una explosión son, el pico de sobrepresión p<sup>0</sup>, tiempo de llegada, t<sub>a</sub>, la duración de la fase positiva, t<sub>d</sub>, y el impulso de sobrepresión, i<sub>p</sub>, el cual es definido como el área bajo el pulso de duración positivo. Varios de estos parámetros de explosión son correlacionados como una función de la distancia escalada, Z, mediante la ecuación 1.34.

Una vez que se conoce la distancia escalada se puede hacer uso de la figura B1 del apéndice B, para obtener los parámetros escalados y combinando dicho resultado con la ecuación apropiada (Ecuaciones

1.36-1.39), será posible obtener el parámetro real. O bien, en lugar de la figura B1 del apéndice B, se puede emplear la tabla A5 del apéndice A, la cual provee las ecuaciones mediante las cuales es posible obtener de maneja analítica, los mismos resultados que usando la figura B1 del apéndice B.

$$p_s = \frac{p^0}{p_a} \quad 1.36$$

$$i_s = \frac{i_p}{W^{1/3}} \quad 1.37$$

$$\tau_d = \frac{t_d}{W^{1/3}} \quad 1.38$$

$$\tau_a = \frac{t_a}{W^{1/3}} \quad 1.39$$

Los parámetros estimados mediante las ecuaciones 1.36 a 1.39, son importantes porque describen a la onda de sobrepresión. Por ejemplo, el impulso es un aspecto importante de la habilidad de causar daño de un estallido en estructuras, ya que esto es indicativo de la energía total contenida dentro de la onda de choque. Por su parte, el pico de sobrepresiones es importante pues se utiliza para estimar el daño resultante para estructuras generales utilizando la tabla A6 del apéndice A, no cuentan para el impulso del estallido o la estructura particular involucrada.

#### 1.7.1.3.2 Método Multi-Energy de TNO

El modelo de multi-energía desarrollado por TNO (*The Netherlands Organization*) considera que la energía de explosión es altamente dependiente del nivel de congestión y menos dependiente del combustible en la nube. Requiere de la selección de un factor de gravedad, según el grado de confinamiento, el cual suele fijarse entre 1 y 10; al considerar una fuerza de explosión de 10 se estará considerando un escenario de detonación.

La posibilidad de detonación de nubes de vapor no confinadas debe ser considerada si: a) las condiciones ambientales y atmosféricas son tales que la dispersión de la nube de vapor es lenta, y (b) es probable un retraso largo de ignición. Sin embargo, un factor de 7 para la fuerza de explosión representa con más precisión la experiencia real, la tabla 1.3 muestra una guía para seleccionar la fuerza de detonación.

Una vez que se ha determinado el factor de gravedad asociado a la fuerza de la explosión se calcula la energía total de combustión, Ecuación 1.40, donde  $3.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3$  es el valor promedio más común de calor de combustión para una mezcla estequiométrica hidrocarburo-aire y  $V_n$  representa los volúmenes individuales de la mezcla.

$$E_T = 3.5 \times 10^6 * V_n \quad 1.40$$

Se calcula la distancia escalada distancia de la carga (combustible-aire) "R<sub>s</sub>" mediante la ecuación 1.41.

$$R_s = \frac{R_R}{\left(\frac{E_i}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad 1.41$$

Conociendo "R<sub>s</sub>" y considerando que el factor de gravedad es de 7, dado que la fuerza destructiva descrita por dicho factor, es la más representativa para explosiones combustible-aire, se obtiene la sobrepresión escalada de Sach "ΔP<sub>s</sub>" de la figura B2 del apéndice B.

Tabla 1.3 Fuerza de detonación de sub-explosión.

Factor de gravedad de la explosión	Grado de confinamiento	Características
1	No confinada	Campo Abierto
2	Casi confinada	Campo Abierto, pocos árboles
7	Ligeramente confinada	Patio de tanques
10	Moderadamente confinada	Equipo de proceso

Fuente: (PHAST Help System, v6.1).

Una vez que se conoce el valor de "ΔP<sub>s</sub>", se calcula el pico de sobrepresión de la explosión "P<sub>s</sub>" usando la ecuación 1.42; la duración corregida de Sach "t<sub>d0</sub>" se estima de la figura B3. Finalmente se hace uso de la ecuación 1.43 para estimar la duración real de la fase positiva de la onda de explosión.

$$P_s = \Delta \overline{P}_s \cdot P_a \quad 1.42$$

$$t_d = \overline{t}_d \left[ \frac{(E/P_a)}{c_0} \right] \quad 1.43$$

### 1.7.1.3.3 Método de Baker-Strehlow

El método de Baker se utiliza para el cálculo de la sobrepresión e impulso generado en el estallido de recipientes, el grado de confinamiento es la base de la determinación del tamaño de la nube de vapor inflamable que contribuye a la generación de la onda de sobrepresión.

Para determinar la velocidad de la flama, se pueden correlacionar la reactividad de combustible, la densidad de obstáculo y el grado de confinamiento, para una expansión de la flama en una de las tres posibles dimensiones. Estos parámetros describen un conjunto de 27 posibles combinaciones, los cuales se muestran en la tabla 1.4, y se expresan en unidades de número Mach.

La reactividad se clasifica como baja, media y alta de acuerdo con las siguientes recomendaciones del TNO. El metano y el monóxido de carbono son los únicos materiales considerados de baja reactividad, mientras que el hidrógeno, acetileno, etileno, óxido de etileno y óxido de propileno se consideran altamente reactivo. Todos los demás combustibles se clasifican como reactividad media. Las mezclas de combustible se clasifican según la concentración del componente más reactivo.

El confinamiento se basa en tres simetrías:

**Punto-simetría (3D)**, también conocido como geometría esférica o no confinada, tiene el menor grado de confinamiento de la llama. La llama es libre de expandir esféricamente de una fuente de ignición puntual. Por lo tanto, las velocidades de flujo son bajas y los disturbios de campo de flujo por obstáculos son pequeños.

**Línea-simetría (2D)**, es decir, una llama cilíndrica entre dos placas, el área total de superficie de llama es proporcional a la distancia desde el punto de ignición. Por consiguiente, la deformación de la superficie de llama tendrá un efecto más fuerte que en el caso de punto-simetría.

**Simetría-plana (1D)**, es decir, una flama plana en un tubo, el área de superficie de llama proyectada es constante. Hay apenas decaimiento de campo de flujo, y la deformación de llama tiene un efecto muy fuerte en la aceleración de la llama.

Tabla 1.4 Velocidad de la flama en número Mach para fuentes de ignición.

Expansión de la flama 1D		Densidad de Obstáculos		
		Alta	Media	Baja
Reactividad	Alta	5.2	5.2	5.2
	Media	2.265	1.765	1.029
	Baja	2.265	1.029	0.294
Expansión de la flama 2D		Densidad de Obstáculos		
		Alta	Media	Baja
Reactividad	Alta	1.765	1.029	0.588
	Media	1.235	0.662	0.118
	Baja	0.662	0.471	0.079
Expansión de la flama 3D		Densidad de Obstáculos		
		Alta	Media	Baja
Reactividad	Alta	0.588	0.153	0.071
	Media	0.206	0.100	0.037
	Baja	0.147	0.100	0.037

Fuete: (Baker, 1994)

La densidad de obstáculo se clasifica como baja, media y alta, en función de la proporción de la obstrucción y el espaciamiento. La relación de obstrucción se define como el cociente entre el área bloqueada por obstáculos al área total de la sección transversal. El espaciamiento se define como la distancia entre los sucesivos obstáculos o filas de obstáculos.

Una baja densidad asume pocos obstáculos en la ruta de acceso de la llama, o los obstáculos están ampliamente espaciados (proporción de obstrucción menos de 10%), y sólo hay una o dos capas de obstáculos. La densidad media cae en una proporción de obstrucción de entre 10% y 40%, de dos a tres capas de obstáculos.

Una densidad de obstáculo alta se produce cuando hay tres o más capas espaciadas bastante cerca de obstáculos con una proporción de obstrucción de 40% o más por capa. Puede ocurrir en una unidad de proceso en la cual hay muchos miembros estructurales espaciados muy cercanamente, tubería, válvulas y otros generadores de turbulencia. También se deben considerar de alta densidad los racks de tubería en los cuales hay múltiples capas de tuberías poco espaciadas.

Una vez que se determina la velocidad de la flama, se calcula la distancia Sachs-escalada "D" mediante:

$$D = \frac{R_R}{\left(\frac{E}{P_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad 1.44$$

Conocido el valor de la distancia escalada "D", se obtienen los valores escalados de sobrepresión "P<sub>E</sub>" e impulso "ip", utilizando las gráficas B4 Y B5 del apéndice B.

Conocido "P<sub>E</sub>" se calcula la sobrepresión real "P<sub>A</sub>" mediante:

$$P_A = P_E * P_0 \quad 1.45$$

Finalmente se calcula el impulso "I" usando "ip" con la siguiente ecuación:

$$I = ip * \left(P_0\right)^{\frac{2}{3}} * E^{\frac{1}{3}} \quad 1.46$$

### 1.7.2 Flamazos (Flash fires) <sup>[1]</sup> <sup>[3]</sup>

Un flamazo es la combustión no explosiva de una nube de vapor resultante de una liberación de material inflamable en el aire libre. Los experimentos han mostrado que las nubes de vapor solo explotan en áreas donde se desarrolla la combustión turbulenta intensamente y sólo si se cumplen ciertas condiciones. Los riesgos mayores de flamazos son la radiación térmica y contacto con la llama directa.

La combustión súbita de una nube de vapor normalmente dura no más que unas pocas décimas de segundo. Por lo tanto, la radiación total recibida por un objeto cerca de un flamazo es sustancialmente menor que en el caso de un charco de fuego.

### 1.7.3 Explosiones físicas <sup>[1]</sup>

Una explosión física se refiere a la ruptura catastrófica de un tanque llenado con un gas presurizado. La energía almacenada es liberada, y puede producir una onda de choque y acelerar los fragmentos del tanque (proyectiles). Si el contenido es inflamable es posible que la ignición del gas liberado pueda resultar en efectos de consecuencia adicional; la ruptura puede ocurrir por reducción de espesor del tanque (corrosión, erosión, ataque químico); reducción en la fuerza del tanque debido a (sobrecalentamiento, defectos en el material con el posterior desarrollo de fractura, ataque químico, fatiga inducida por debilitamiento del tanque, etc.); falla de regulación de la presión y equipos de alivio de presión (sobrepresurización física) o reacción fuera de control.

Los efectos son más similares a una detonación que una explosión de nube de vapor (VCE). La amplitud de una onda de choque depende de la fase del contenido del tanque originalmente presente.

Hay una cantidad máxima de energía en el incendio de un tanque que puede ser liberada. Esta energía es asignada a lo siguiente:

- Estiramiento y ruptura del tanque.
- Energía cinética de fragmentos.

- Energía en la onda de choque.
- Residuos de energía (calefacción del aire de los alrededores).

Para determinar la energía requerida para elevar la presión del gas a su volumen constante de una presión atmosférica,  $P_0$ , a una presión de ruptura  $P_1$ , se emplea la siguiente ecuación:

$$E = \frac{(P_1 - P_0)V}{k - 1} \quad 1.47$$

La energía disponible representa la energía mecánica máxima que puede ser extraída de un material conforme se mueve en equilibrio con el ambiente.

#### 1.7.4 BLEVE y bolas de fuego <sup>[1] [3] [10] [14]</sup>

Un caso especial de la ruptura catastrófica de un tanque presurizado, es una Explosión de Líquido Saturado a Vapor Expandido, BLEVE (por sus siglas en inglés Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). Una BLEVE es una liberación repentina de una gran cantidad de masa de líquido presurizado supercalentado a la atmósfera. La causa primaria es generalmente una flama externa incidiendo en un tanque sobre el nivel del líquido, debilitando el contenedor y conduciendo a una repentina ruptura de la coraza.

Una válvula de relevo no protege contra este tipo de falla, ya que la falla en la coraza probablemente ocurre a una presión debajo de la presión especificada del sistema de relevo. Debe notarse, sin embargo, que una BLEVE, puede ocurrir debido a cualquier mecanismo que resulte en una falla repentina del contenedor, incluyendo impacto por un objeto, corrosión, defectos de manufactura, sobrecalentamiento interno, etc.

La falla repentina del contenedor permite al líquido supercalentado una vaporización súbita, debido a la despresurización del tanque, incrementado su volumen más de 200 veces. Esto es suficiente para generar una onda de presión y fragmentos. Si el líquido liberado es inflamable, puede resultar una bola de fuego.

Para toda BLEVE se deben determinar la presión y los fragmentos, además para un material inflamable debe ser considerada la intensidad térmica de bolas de fuego. Esto requiere de que se determinen el diámetro de la bola de fuego y su duración.

Para que se origine una BLEVE tienen que ocurrir las condiciones siguientes interdependientes entre si:

- **Material líquido sobrecalentado.** Cuando la temperatura es superior a la que correspondería si se hallara en equilibrio con su presión de vapor. Esta situación de inestabilidad se presenta bajo una exposición del recipiente a un incendio en un recipiente sobrellenado. No toda temperatura de sobrecalentamiento permite la formación de BLEVE. Debe superarse una temperatura límite. En caso de fisura de un depósito, incluso pequeña, y producirse un descenso de la presión para igualarse a la atmosférica, el gas licuado estará entonces sobrecalentado.
- **Bajada súbita de la presión (isoentrópica) en el interior del recipiente.** Tal descenso de presión puede ser debido a causas tales como: desprendimiento del disco de ruptura, pérdida de resistencia del recipiente en un incendio con la consiguiente ruptura del mismo, perforación del

recipiente por impacto, ruptura por sobrellenado, corrosión e incluso disparo de válvulas de seguridad mal diseñadas. A mayor caída de presión, mayores son los efectos de la BLEVE en caso de producirse. El tamaño de la abertura inicial del depósito es determinante en la rapidez del descenso de presión y en la zona afectada por la nucleación. En determinadas condiciones de presión y temperatura, un líquido sobrecalentado que se ha expuesto a un descenso súbito de presión, puede evaporarse de forma violenta al cambiar de estado masivamente por un proceso de formación espontanea y generalizada de burbujas de vapor (nucleación).

#### 1.7.4.1 Ecuaciones empíricas para diámetro de BLEVE-bola de fuego, duración y altura.

Para caracterizar la bola de fuego se usan correlaciones empíricas que describen la relación del diámetro de la BLEVE con la duración y la masa:

El cálculo del diámetro máximo de la bola de fuego " $D_{\max}$ " es:

$$D_{\max} = 5.8 * M^{\frac{1}{3}} \quad 1.48$$

Donde M representa la masa inflamable del liquido (kg).

La duración de combustión de la bola de fuego " $t_{BLEVE}$ " esta dada por:

$$t_{BLEVE} = 0.45 * M^{\frac{1}{3}} \quad \text{Para } M < 30,000 \text{ kg} \quad 1.49$$

$$t_{BLEVE} = 2.6 * M^{\frac{1}{6}} \quad \text{Para } M > 30,000 \text{ kg} \quad 1.50$$

La altura del centro de la bola de fuego " $H_{BLEVE}$ " es establecida por:

$$H_{BLEVE} = 0.75 * D_{\max} \quad 1.51$$

El diámetro inicial a nivel del suelo " $D_{inicial}$ " es:

$$D_{inicial} = 1.3 * D_{\max} \quad 1.52$$

Las fórmulas particulares para el diámetro y duración de la bola de fuego no incluyen el volumen de oxígeno para la combustión. Esto, por supuesto, varía y debe afectar el tamaño de la bola de fuego. El diámetro inicial es usado para describir la bola de fuego inicial a nivel de suelo antes de que las fuerzas boyantes la eleven.

Los fenómenos principales generados de una BLEVE son la radiación térmica y la proyección de fragmentos del depósito o piezas adyacentes.

#### 1.7.4.2 Radiación

Cuatro parámetros son usados para determinar el peligro por radiación térmica de una bola de fuego: la masa de combustible involucrada, el diámetro, la duración y el poder emisor térmico de la bola de fuego. Los peligros de la radiación se calculan posteriormente usando relaciones empíricas.

La radiación de una bola de fuego de una BLEVE dependerá de la distribución de la temperatura de la flama, la composición de los gases en los alrededores de la bola de fuego, la geometría de la bola de fuego, absorción de la radiación por la misma bola de fuego, y la relación de la geometría del receptor con respecto a la bola de fuego.

Para estimar el flujo térmico superficial E, basado en la fracción radiante R, del calor total de combustión, donde R puede tomar valores de 0.3 para recipientes con baja presión de seguridad y 0.4 con alta presión de seguridad.

$$E = \frac{RMH_c}{\pi D_{\max}^2 t_{BLEVE}} \quad 1.53$$

Donde:

- E Flujo emisor radiante (energía/área·tiempo)
- R Fracción radiante del calor de combustión (adimensional)
- M Masa de combustible en la bola de fuego (masa)
- H<sub>c</sub> Calor neto de combustión por unidad de masa (energía/masa)
- D<sub>max</sub><sup>2</sup> Diámetro máximo de la bola de fuego (longitud)
- t<sub>BLEVE</sub> Duración de la bola de fuego (tiempo)

Una ecuación simplificada para calcular el flujo de radiación recibido por un receptor, E<sub>r</sub>, a una distancia L, está dado por:

$$E_r = \frac{2.2\tau_a R H_c M^{2/3}}{4\pi X_c^2} \quad 1.54$$

Donde:

- E<sub>r</sub> Flujo de radiación recibido por un receptor (W/m<sup>2</sup>)
- τ<sub>a</sub> Transmisividad atmosférica (adimensional)
- R Fracción radiante de calor de combustión (adimensional)
- H<sub>c</sub> Calor neto de combustión por unidad de masa (J/Kg)
- M Masa inicial de combustible en la bola de fuego (Kg)
- X<sub>c</sub> Distancia del centro de la bola de fuego al receptor (m)

Para trayectorias largas (arriba de 20m), donde la absorción puede ser de 20-40%, esto resultará en un sobreestimado sustancial para la radiación recibida.

La radiación térmica es absorbida y dispersada por la atmósfera. Esto causa una reducción en la radiación recibida en una localización determinada. Algunos modelos de radiación térmica ignoran este efecto, asumiendo un valor de τ<sub>a</sub>=1 para la transmisividad.

El cálculo de la transmisividad atmosférica es un factor importante (τ<sub>a</sub>). La radiación térmica es absorbida y dispersada por la atmósfera, estas causas reducen la radiación recibida por el receptor, se recomienda una correlación que considera la humedad.

$$t_a = 2.02(P_w X_s)^{-0.09} \quad 1.55$$

Donde  $\tau_a$  es la fracción de transmisividad atmosférica (entre 0 y 1),  $P_w$  es la presión parcial de agua (Pascales, N/m<sup>2</sup>), y  $X_s$  es la distancia recorrida de la superficie de la flama al objetivo fijado (m).

La radiación recibida por el receptor " $E_r$ " es:

$$E_r = \tau_a \cdot E \cdot F_{21} \quad 1.56$$

Donde E es el flujo radiante emitido sobre una superficie (energía/área·tiempo) y  $F_{21}$  representa un factor de visión, el cual es adimensional y se calcula mediante la ecuación 1.57; considerando que D representa el diámetro de la bola de fuego, y que el centro de la bola de fuego tiene una altura, H, arriba del suelo, y una distancia, L, a nivel del suelo desde abajo del centro de la bola de fuego hasta donde está el receptor, se dice que la ecuación 1.57 es para una superficie horizontal.

$$F_{21} = \frac{H \left( \frac{D}{2} \right)^2}{(L^2 + H^2)^{\frac{3}{2}}} \quad 1.57$$

Cuando la distancia, L, es mayor que el radio de la bola de fuego, el factor  $F_{21}$  es de una superficie vertical, por ello H en el dividendo de la ecuación 1.57, se reemplaza por la distancia L.

Una ecuación más empírica que las ecuaciones 1.54 y 1.56, para calcular el flujo de radiación que recibe un receptor a una distancia L, desde el centro de la bola de fuego esta dada por:

$$E_r = \frac{8.28 \times 10^5 M^{0.771}}{X_c^2} \quad 1.58$$

La distancia de la superficie de la flama al receptor,  $X_s$ , empleado en los cálculos de la ecuación 1.55, esta determina por la ecuación 1.59, donde el primer término de dicha ecuación corresponde con el  $X_c$  empleado para las ecuaciones 1.54 y 1.58.

$$X_s = \left( H_{BLEVE}^2 + L^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{1}{2} * D_{\max} \right) \quad 1.59$$

### 1.7.4.3 Fragmentos

Cuando detona una sustancia altamente explosiva, resultan un gran número de pequeños fragmentos con alta velocidad, en contraste, una BLEVE produce pocos. Las ecuaciones para predecir los efectos de proyectiles, consideran la fractura de los tanques esféricos y cilíndricos en 2, 10 y 100 fragmentos. Para BLEVEs, solo hay de 2 o 3 fragmentos (10 máximo) ya que usualmente no desarrollan las altas presiones que dan lugar a mayor fragmentación, el ablandamiento del metal por exposición al calor y debilitamiento de la pared del tanque da lugar a menos fragmentos.

La primera parte de los cálculos involucra la estimación de una velocidad inicial. Un determinado fragmento tendrá una velocidad media de:

$$U_0 = \sqrt{\frac{2E_f}{M_r}} \quad 1.60$$

Donde:

$U_0$  Velocidad media de un fragmento (m/s)

$E_f$  Energía disponible para la proyección del fragmento (J)

$M_r$  Masa del recipiente (Kg)

Una vez que los fragmentos son acelerados volarán a través del aire hasta que impacten con otro objeto o den en el suelo. La segunda parte del cálculo involucra una estimación de la distancia que un proyectil puede viajar. Finalmente, para BLEVE's el número total de fragmentos es aproximadamente una función del tamaño del tanque. Para tanques entre 700-2500 m<sup>3</sup>.

$$\text{Número de fragmentos} = -3.77 + 0.0096 * [\text{Capacidad del tanque (m}^3\text{)}] \quad 1.61$$

El método de proyección de fragmentos es más apto para investigación de accidentes, donde el número, tamaño y localización de los fragmentos es conocida. En general, los tanques de gas presurizado no tienen suficiente energía de almacenamiento para representar una amenaza de ondas de choque más allá de los límites de la planta.

### 1.7.5 Explosiones confinadas <sup>[1] [32]</sup>

Las explosiones confinadas incluyen deflagraciones u otras fuentes de reacción química rápidas, las cuales son restringidas dentro de tanques y edificios. Las explosiones de vapor y explosiones de polvo (deflagración) dentro de tanques de baja fuerza y edificios son una categoría mayor de explosiones confinadas. Otras explosiones confinadas son las generadas por reacciones de combustión, descomposición térmica, o reacciones fuera de control dentro de tanques de proceso.

En general, una deflagración que ocurre dentro de un edificio o estructura de baja resistencia, tal como un silo, es menos probable que impacte en los alrededores, ya que las cantidades de combustible y energía involucrada son relativamente pequeñas. Por ello, las principales amenazas de explosiones confinadas son ondas de choque y proyectiles.

Los cálculos implican la determinación del pico de presión, el cual es suficiente para causar falla del tanque. El fenómeno de acumulación de presión es un peligro potencial importante en un sistema con espacios interconectados.

### 1.7.6 Charcos de fuego <sup>[1]</sup>

Los charcos de fuego son de interés al establecer el potencial para efecto dómينو y zonas de seguridad de los empleados. Los efectos primarios de estos fuegos son debidos a radiación térmica de la fuente inflamable. El espaciamiento entre tanques y entre plantas, aislamiento térmico, especificaciones de paredes para fuego, etc., pueden ser direccionales en la base de análisis de consecuencias específicos para un rango de posibles escenarios de incendio de charcos.

Un charco de fuego comienza frecuentemente con la liberación de un material inflamable de un equipo de proceso. Si el material es líquido, almacenado a una temperatura debajo de su punto normal de ebullición, el líquido formará un charco. La geometría del charco es dictada por los alrededores (p.ej. dique), pero también es posible un charco irregular debido a que no existen restricciones en un área abierta y plana, es posible, particularmente si la cantidad de líquido derramado es inadecuada para llenar completamente el área del dique. Si el líquido es almacenado bajo presión sobre su punto normal de ebullición, entonces una fracción de líquido se vaporizará súbitamente a vapor, y una fracción permanecerá líquida para formar un charco en las cercanías de la liberación.

Una vez que se ha formado un charco líquido, se requiere de una fuente de ignición. La ignición puede ocurrir vía la nube de vapor pues la flama puede viajar en contra del viento a través del vapor para encender el charco líquido. Para líquidos almacenados debajo de su punto normal en ebullición sin vaporización súbita, la ignición puede ocurrir vía el vapor inflamable de la evaporación de líquido. Ambos casos pueden resultar en un fuego instantáneo inicial debido al incendio de los vapores, esto puede causar peligro térmico inicial.

En los incendios de charco el peligro se debe principalmente a:

- Los efectos térmicos, vía transferencia de calor radiante de la flama resultante.
- Los efectos de los posibles gases tóxicos generados en la combustión.

Si la liberación de material inflamable del equipo de proceso continúa, entonces es probable que ocurra también un dardo de fuego. Si la ignición ocurre muy cercana al inicio de la liberación, entonces el tiempo disponible es inadecuado para que el líquido forme un charco y solo resultará un dardo de fuego.

#### 1.7.6.1 Velocidad de incendio

La transferencia de calor radiante y la velocidad de incendio resultante se incrementan con el diámetro del charco. La velocidad de quemado de la masa del charco es estimada mediante:

$$m_B = 1 \times 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} \quad 1.62$$

Donde  $\Delta H_c$  es el calor total de combustión (energía/masa),  $\Delta H^*$  es el calor de vaporización modificado al punto de ebullición el líquido (energía/masa) y  $m_B$  es la velocidad de incendio del charco (masa/longitud<sup>2</sup>·tiempo).

Aplica para fuegos de charcos líquidos en tierra. Para fuego en charcos en agua, es aplicable si el incendio del líquido tiene un punto normal de ebullición muy por encima de la temperatura ambiente. Para líquidos con puntos de ebullición debajo de la temperatura ambiente, la transferencia de calor entre el líquido y el agua resultará en una velocidad de incendio casi tres veces la velocidad de incendio en tierra.

#### 1.7.6.2 Tamaño de charco

En la mayoría de los casos, el tamaño de charco es fijado por el tamaño de la liberación y por barreras físicas locales (tal como diques, áreas de drenaje inclinadas, etc.). Para una fuga continua, en una superficie plana, infinita, el máximo diámetro esta dado por:

$$D_{\max} = 2\sqrt{\frac{\dot{V}_L}{\pi \cdot \dot{y}}} \quad 1.63$$

Donde  $D_{\max}$  es el diámetro en equilibrio del charco (longitud),  $\dot{V}_L$  es el flujo volumétrico de líquido derramado (volumen / tiempo), y  $\dot{y}$  es la velocidad de quemado del líquido (longitud/tiempo).

La ecuación considera que la velocidad de combustión es constante y que la transferencia de calor dominante es la de la flama. Se considera que el charco es circular; si los diques dan lugar a formas cuadradas o rectangulares, se debe usar un diámetro equivalente.

### 1.7.6.3 Altura de la flama

Muchas observaciones de incendios de charco muestran que hay una relación aproximada entre la altura y el diámetro de la flama. La correlación mejor conocida para esta relación es dada por Thomas (1963) para charcos de fuego circulares.

$$\frac{H}{D} = 42 \left( \frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad 1.64$$

Donde:

- H Altura visible de la flama (m)
- D Diámetro equivalente del charco (m)
- $m_B$  Velocidad de quemado de la masa ( $\text{Kg/m}^2 \text{ s}$ )
- $\rho_a$  Densidad del aire ( $\rho_a=1.2 \text{ Kg/m}^3$  a  $20^\circ\text{C}$  y  $1 \text{ atm}$ )
- g Aceleración debida a la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

### 1.7.6.4 Poder superficial emitido

El poder superficial emitido SEP (por sus siglas en inglés Surface Emitted Power) o flux de calor radiado. El efecto obscurecedor del humo reduce sustancialmente la radiación total emitida integrada sobre la superficie inflamable total.

El modelo de fuente puntual estima el SEP por unidad de área usando el método de fracción de radiación como:

$$SEP = \frac{(PCT)(FR)}{ASF} \quad 1.65$$

Donde PCT es el Poder emisor superficial, FR es la fracción de radiación y ASF es el área de superficie de la flama.

### 1.7.6.5 Factor de visión geométrico

El factor de visión de fuente puntual provee un estimado de flujo recibido a cierta distancia lejos de la flama. El factor de visión depende del modelo empleado, para el de fuente puntual esta dado por:

$$F_p = \frac{1}{4\pi x^2} \quad 1.66$$

Donde  $F_p$  es el factor de vista de fuente puntual ( $\text{longitud}^{-2}$ ) y  $x$  es la distancia de la fuente puntual al objetivo ( $\text{longitud}$ ). Esta ecuación considera que toda la radiación surge de un punto y es recibida por un objeto perpendicular a este.

#### 1.7.6.6 Flujo térmico recibido

Si se selecciona el modelo de fuente puntual, entonces el flujo térmico recibido es determinado de la velocidad total de energía del proceso de combustión, mediante la ecuación 1.67.

$$E_r = \tau_a \eta m_B \Delta H_c A F_p \quad 1.67$$

Donde:

- $E_r$  Flux térmico recibido por el objetivo (energía/área)
- $\tau_a$  Transmisividad atmosférica (adimensional) (véase la ecuación 1.55)
- $Q_r$  Velocidad de energía total de la combustión (energía/tiempo)
- $F_p$  Factor de visión de fuente puntual
- $\eta$  Fracción de la energía de combustión radiada, típicamente de 0.15 a 0.35 (Ver tabla A7, apéndice A)
- $m_B$  Velocidad de quemado de la masa (masa/área-tiempo)
- $\Delta H_c$  Calor de combustión del líquido incendiado (energía/masa)
- $A$  Área total del charco ( $\text{longitud}^2$ )

Si se selecciona el modelo de radiación sólida en pluma, el flujo recibido está basado en correlaciones del flujo superficial emitido dado por la siguiente ecuación:

$$E_r = \tau_a * E_{av} * F_{21} \quad 1.68$$

Donde  $E_{av}$  es el poder emisivo promedio ( $\text{kW/m}^2$ ) y  $F_{21}$  es el factor de visión, para este modelo es proporcionado por la figura B6 del apéndice A, para flama sin inclinación y se requiere una estimación de la altura de la llama al diámetro. Para flamas con inclinación el factor de visión es proporcionado por la figura B7 del apéndice B y se requiere una estimación de la inclinación de la flama. Ambas figuras proporcionan los factores de la visión para un receptor a nivel del suelo de una radiación proveniente de un cilindro circular sin inclinación.

#### 1.7.6.7 Cálculo del flujo de radiación

El modelo de radiación sólida en pluma asume que el volumen entero de la flama emite radiación térmica y no los gases visibles. El problema con esta aproximación es para fuegos de hidrocarburos pesados que generan hollín, provocando el obscurecimiento de la flama y la absorción de la radiación.

$$E_{av} = E_m e^{-SD} + E_s (1 - e^{-SD}) \quad 1.69$$

Donde:

$E_{av}$  Poder emisor promedio ( $\text{kW/m}^2$ )

$E_m$  Poder emisor máximo de una flama luminosa (aproximadamente  $140 \text{ kW/m}^2$ )

$E_s$  Poder emisor del humo (aproximadamente  $20 \text{ kW/m}^2$ )

S Parámetro experimental ( $0.12 \text{ m}^{-1}$ )

D Diámetro del charco (m)

Tomando en cuenta las consideraciones citadas la ecuación 2.67, puede reescribirse del modo siguiente:

$$E_{av} = \left[ (140 * e^{-0.12*D}) + 20 \right] * (1 - e^{-0.12*D}) \quad 1.70$$

### 1.7.7 Dardos de fuego (Jet fires) <sup>[1] [12] [14]</sup>

Los dardos de fuego resultan de la combustión de un material al inicio de su liberación de una unidad de proceso presurizada. La aplicación más común de los modelos de dardo de fuego es la especificación de zonas de exclusión alrededor de los fuegos.

El método del instituto americano del petróleo (API, 1996), es aplicado a dardos de fuego ocasionados por liberaciones accidentales de gases de boquillas con flamas verticales, lo cual no sucede siempre para liberaciones accidentales. Para las aproximaciones del modelo, se considerará que el orificio de liberación puede ser aproximadamente una boquilla. La suposición de una flama vertical provee un resultado conservador, ya que la flama vertical proveerá el mayor flujo radiante de calor a cualquier punto receptor.

- **Cálculo de la altura de la flama**

Si se define el punto de inicio del dardo como el punto en el fondo de la flama, sobre la boquilla, donde comienza la flama turbulenta, entonces la altura de la flama es dada para dardos de gas turbulentos por:

$$\frac{L}{d_j} = \frac{5.3}{C_T} \sqrt{\frac{T_f/T_j}{\alpha_T} \left[ C_T + 1(1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right]} \quad 1.71$$

Donde:

L Longitud de la flama turbulenta visible medida del punto de inicio (m)

$d_j$  Diámetro del jet, que es, el diámetro físico de la boquilla (m)

$C_T$  Concentración en fracción mol de combustible en la mezcla estequiométrica combustible-aire (adimensional)

$T_f$  Temperatura adiabática de la flama (K)

$T_j$  Temperatura del dardo fluido, respectivamente (K)

$\alpha_T$  Moles de reactante por mol de producto para una mezcla estequiométrica combustible-aire (adimensional)

$M_a$  Peso molecular del aire (masa/mol)

$M_f$  Peso molecular del combustible (masa/mol)

Para la mayoría de los combustibles,  $C_T$  es mucho menor que 1,  $\alpha_T$  es aproximadamente 1, y la relación  $T_f/T_j$  varía entre 7 y 9.

- **Flujo radiante**

El flujo radiante al receptor es determinado mediante:

$$E_r = \tau_a \eta \cdot \dot{m} \cdot \Delta H_c \cdot F_p \quad 1.72$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de combustible,  $F_p$  el factor de visión el cual se considera que depende de la distancia a la que se recibe la radiación y se obtiene con la ecuación 1.66, y  $\tau_a$  la transmisividad atmosférica, estimada mediante la ecuación 1.55, previamente citadas.  $\eta$  puede ser estimado mediante la tabla A7 del apéndice A.

Las dimensiones de la antorcha, la cual se considera cónica, son dadas por:

$$L = 9.1m^{0.5} \quad 1.73$$

$$W = 0.25L \quad 1.74$$

$$r_{s,50} = 1.9t^{0.4} m^{0.47} \quad 1.75$$

Donde:

L Longitud de la flama (m)

W Tipo de flama a la mitad del ancho de una flama cónica de un chorro (m)

m Velocidad de liberación del combustible sujeto a  $1 < m < 3000$  Kg/s (Kg/s).

$r_{s,50}$  Rango de peligro sobre un costado para 50% de letalidad sujeto a  $r > W$  (m)

t Tiempo de exposición, sujeto a  $10 < t < 300$  s (s)

El punto de radiación se encuentra a la mitad de la flama:

$$R = h + \frac{L}{2} \quad 1.76$$

## 1.8 MODELOS DE EFECTOS <sup>[1] [14] [16] [22]</sup>

Después de haber estimado la magnitud del accidente, es nuestro interés evaluar la vulnerabilidad de las personas y de las instalaciones ante los efectos físicos del accidente, este análisis está íntimamente ligado con el de consecuencias, pues uno conlleva al otro. En este tipo de análisis lo que se busca, es la cuantificación, aún cuando sea solo una aproximación, de los efectos finales de un accidente, de características conocidas sobre la población e instalaciones. Si la propiedad física, tales como las estructuras y edificios, es el objeto, las consecuencias pueden ser las pérdidas monetarias.

La vulnerabilidad de las personas se expresa en función del número de individuos (generalmente en % de población) que pueden resultar afectados con un cierto nivel de daños a causa del accidente. Las consecuencias sobre la población pueden tener características diversas de acuerdo al material; Radiación térmica (quemaduras de diversa gravedad, muerte por quemaduras); onda de choque (rotura de tímpano, aplastamiento de la caja torácica, desplazamiento del cuerpo, impacto contra el cuerpo de fragmentos, heridas ocasionadas por astillas de vidrio); intoxicación (muerte por intoxicación).

La vulnerabilidad de las instalaciones se realiza a través de estimaciones de daños económicos y físicos, los daños físicos pueden ser desde ruptura de cristales hasta demolición total o parcial de construcciones e incendios.

Las consecuencias no pueden adoptar la forma de funciones discretas pero pueden ajustarse a las funciones de distribución de probabilidad. Un método estadístico de evaluar una consecuencia es el método de dosis-respuesta. Esto es acoplado con una ecuación probit para linealizar la respuesta. El método probit (unidad de probabilidad) refleja una relación generalizada dependiente del tiempo para cualquier variable que tiene un resultado probabilístico que puede ser definido por una distribución normal.

### **1.8.1 Funciones de dosis-respuesta**

La correspondencia entre la cantidad de tóxico y la magnitud del efecto es lo que se conoce como la relación dosis-efecto o dosis-respuesta. Lo que se denomina efecto o respuesta tóxica es un cambio orgánico permanente que debe de poder ser medido en el componente bajo estudio y tener un valor de cero cuando la dosis es cero. La magnitud y tipo de los efectos adversos producidos dependen de la duración de la exposición.

Además, la gravedad de efectos agudos adversos para la salud, incluyendo irritación, narcosis, asfixia, sensibilización, ceguera, daño del sistema de órganos y la muerte, varían con la intensidad y la duración de la exposición. Como resultado de la variabilidad de la respuesta de los organismos vivos, se espera una amplia gama de respuestas para una exposición fija.

Los resultados se modelan como una curva gaussiana. La forma de la curva está definida totalmente por la respuesta media,  $\mu$  y una desviación estándar,  $\sigma$ . El área bajo la curva representa el porcentaje de los organismos afectados para un intervalo de respuesta especificado. Toda el área bajo la curva tiene una superficie de 1, que representa el 100% de los individuos.

Una curva completa de dosis-respuesta se obtiene al graficar la respuesta media acumulativa para cada dosis. Por conveniencia, la respuesta se traza contra el logaritmo de la dosis, dado que esta forma típicamente provee una línea mucho más recta en el centro del rango de dosis. La forma logarítmica surge del hecho de que en la mayoría de los organismos hay algunos individuos que pueden tolerar altos niveles de la variable causal, y contrariamente, hay un número de individuos que son sensibles a la variable causal.

### **1.8.2 Funciones probit**

Si se obtiene una respuesta de una magnitud definida para cada dosis, dentro de un rango de dosis, se dice que la respuesta es "gradual". Es decir, que a diferentes dosis se observan los efectos varían en forma continua y con un valor único para cada dosis.

Para exposiciones únicas, el método probit (unidad de probabilidad) es un método de transformación para convertir la curva dosis-respuesta en una línea recta. La variable probit  $Y$  está relacionado con la probabilidad  $P$  por:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad 1.77$$

Donde P es la probabilidad o porcentaje, Y es la variable probit, y  $u$  es una variable de integración. La variable probit está normalmente distribuida y tiene un valor medio de 5 y una desviación estándar de 1. Para los cálculos en una hoja de cálculo, una expresión más útil para realizar la conversión de probits a porcentaje está dada por:

$$P = 50 \left[ 1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf}\left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad 1.78$$

Donde: "erf" es la función error.

Las ecuaciones Probit para la variable probit Y, se basan en una variable causal V, (representando a la dosis) y por lo menos dos constantes. Estas ecuaciones son de la forma:

$$Y = k_1 + k_2 \ln V \quad 1.79$$

Donde  $k_1$  y  $k_2$  son constantes. Las ecuaciones Probit de este tipo se derivan como líneas de mejor ajuste a datos experimentales (porcentaje de muertes frente a la concentración y duración) utilizando gráficos de probabilidades logarítmicas.

Hay ecuaciones probit disponibles para exposiciones a materiales tóxicos, calor, presión, radiación, impacto y sonido, por nombrar algunos. Para las exposiciones tóxicas, la variable causal se basa en la concentración; para las explosiones, la variable causal se basa en la sobrepresión o impulso explosivo, dependiendo del tipo de lesiones o daños. Para exposición al fuego, la variable causal se basa en la duración e intensidad de la exposición radiante. Las ecuaciones probit pueden aplicarse también para estimar daños estructurales, ruptura de vidrio y otros tipos de daños.

### 1.8.3 Efectos de gases tóxicos

La toxicidad es "la capacidad de una sustancia para producir un efecto no deseado cuando el químico ha alcanzado una concentración suficiente en un determinado sitio dentro de un ser vivo".

Los modelos de efectos tóxicos se emplean para evaluar las consecuencias para la salud humana como consecuencia de la exposición a una concentración conocida de gas tóxico por un período conocido de tiempo. La mitigación de estas consecuencias es por acción evasiva o de refugio. Para un análisis cuantitativo de riesgos de procesos químicos, los efectos tóxicos son debidos a las exposiciones de corta duración, las exposiciones crónicas no se consideran.

Hay sustancias no tóxicas que pueden provocar asfixia debido al desplazamiento de oxígeno disponible. Las concentraciones asfixiantes normalmente están en el rango de 50,000-100,000 ppm (5 a 10% en volumen).

El objeto de un modelo de efectos tóxicos es determinar si pueden esperarse resultados perjudiciales para la salud tras una liberación y si los datos lo permiten, para estimar la magnitud de la lesión o víctimas mortales. Algunos de los criterios de toxicología más comúnmente disponibles, especialmente para el desarrollo de planes de respuesta de emergencia, se describen a continuación:

- **Guías de Planes de Respuesta a Emergencia, ERPG (Emergency Response Planning Guideline)**

ERPG-1.-es la máxima concentración en el aire, a la cual casi todos los individuos pueden estar expuestos por arriba de 1 hora sin experimentar ningún síntoma y sin percibir claramente el olor.

ERPG-2.-es la máxima concentración en el aire a la cual casi todos los individuos pueden estar expuestos por arriba de 1 hora sin sufrir o desarrollar efectos irreversibles a la salud o síntomas que pudieran debilitar sus habilidades para tomar una acción protectora.

ERPG-3.-es la máxima concentración en el aire a la cual casi todos los individuos pueden ser expuestos por arriba de 1 hora, experimentando o desarrollando efectos amenazadores a su vida

- **Niveles Guía de Exposición en Emergencias, EEGL (Emergency Exposure Guidance Levels)**

Límite de exposición tolerable durante 1-24 h. Se han desarrollado para instalaciones militares porque está dirigido al personal militar, joven y saludable. Permite planificar situaciones de emergencia como vertidos, incendios u otros accidentes.

- **Inmediatamente Peligroso para la vida y la salud, IPVS**

IPVS o IDLH (por sus siglas en inglés Immediately Dangerous to Life and Health) es una concentración que representa una amenaza inmediata para la vida, y que puede producir efectos adversos irreversibles para la salud en un periodo de 30 minutos, o que puede afectar la capacidad de una persona para escapar de una atmósfera peligrosa.

- **Límite máximo permisible de exposición, LMPE**

Concentración de un contaminante del medio ambiente laboral, que no debe superarse durante la exposición de los trabajadores en una jornada de trabajo en cualquiera de sus tres tipos. El límite máximo permisible de exposición se expresa en  $\text{mg}/\text{m}^3$  o ppm, bajo condiciones normales de temperatura y presión. El LMPE también se conoce como TLV, por sus siglas en inglés Threshold Limit Value.

- **Límite máximo permisible de exposición de corto tiempo, LMPE-CT**

Concentración máxima del contaminante del medio ambiente laboral, a la cual los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un periodo máximo de quince minutos, con intervalos de al menos una hora de no exposición entre cada periodo de exposición y un máximo de cuatro exposiciones en una jornada de trabajo y que no sobrepase el LMPE-PPT. Dicho LMPE-CT, se conoce también como TLV-STEL (por sus siglas en inglés, Threshold Limit Value - Short term exposure limit).

- **Límite máximo permisible de exposición pico, LMPE-P**

Concentración de un contaminante del medio ambiente laboral, que no debe rebasarse en ningún momento durante la exposición del trabajador.

- **Límite máximo permisible de exposición promedio ponderado en tiempo, LMPE-PPT**

Concentración promedio ponderada en tiempo de un contaminante del medio ambiente laboral para una jornada de ocho horas diarias y una semana laboral de cuarenta horas, a la cual se pueden exponer la mayoría de los trabajadores sin sufrir daños a su salud.

#### 1.8.4 Aplicación de ecuaciones probit

El modelo probit, es un método estadístico de ajuste a una curva, para manejar los datos experimentales no lineales de las exposiciones. Se utiliza para desarrollar estimados de exposición a situaciones que involucran emisiones continuas (aproximadamente concentración constante con el tiempo desde una ubicación fija en la dirección del viento) o emisión instantánea (concentración variando con el tiempo en una ubicación en la dirección del viento).

La dosis tóxica se define generalmente en términos de concentración por unidad de tiempo de exposición elevado a una potencia multiplicada por la duración de la exposición ( $C^n t$ ), con  $n$  normalmente desde 0.5 hasta 3. La ecuación probit para letalidad tóxica tiene la forma:

$$Y = a + b \cdot \ln(C^n t_c) \quad 1.80$$

Donde  $Y$  es el probit;  $A$ ,  $b$ ,  $n$  son constantes (Véase la tabla A8 del apéndice A),  $C$  es la concentración en ppm por volumen y  $T_c$  es el tiempo de exposición en minutos. El valor probit,  $Y$ , puede ser convertido en porcentaje de fatalidad con la tabla de porcentajes A9 del apéndice A.

#### 1.8.5 Efectos térmicos

Para estimar la probable lesión o daños a personas y objetos por radiación térmica de los accidentes resultantes. La norma API 521 (Instituto Americano del Petróleo) proporciona información de los efectos de la radiación térmica sobre personas. Los datos sobre el tiempo para el umbral de dolor se resumen en la tabla de 1.5. Las quemaduras siguen un umbral del dolor "bastante rápido". Los valores de tabla 1.5 pueden ser comparados con la intensidad de la radiación solar en un día claro y caluroso de verano de aproximadamente 320 Btu/hrs·ft<sup>2</sup> (1kW/m<sup>2</sup>).

Tabla 1.5 Tiempo de exposición necesario para alcanzar el umbral de dolor.

Intensidad de radiación		Tiempo para el umbral de dolor (s)
Btu/hr/ft <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	
500	1.74	60
740	2.33	40
920	2.9	30
1500	4.73	16
2200	6.94	9
3000	9.46	6
3700	11.67	4
6300	19.87	2

Fuente: (API, 1966)

Basándose en estos datos de API, se sugieren criterios térmicos en la tabla de 1.6, con exclusión de la radiación solar, para establecer zonas de exclusión o determinar la altura de flama para la exposición de personal. Otros criterios para los daños de la radiación térmica se muestran en la tabla de 1.7.

Tabla 1.6 Diseño recomendado para niveles de radiación de quemadores excluyendo la radiación solar.

Niveles de diseño permisible (K)		Condiciones
BTU/hr/ft <sup>2</sup>	kW/m <sup>2</sup>	
5000	15.77	Intensidad de calor en estructuras y en áreas donde no se espera que los operadores realicen labores y haya protección contra calor radiante disponible, por ejemplo, detrás de equipo.
3000	9.46	Valor de K a la emisión de diseño del quemador en cualquier locación a la cual la gente tenga acceso, por ejemplo, en escalera bajo el quemador o en plataforma de servicio de una torre cercana. La Exposición debe limitarse a pocos segundos, suficientes solo para escapar.
2000	6.31	Intensidad de calor en áreas donde puedan requerirse acciones de emergencia que, duren hasta 1 minuto por personal sin protección pero con ropa adecuada.
1500	4.73	Intensidad de calor en áreas donde puedan requerirse acciones de emergencia que, duren varios minutos por personal sin protección pero con ropa adecuada.
500	1.58	Valor de K a la emisión de diseño del quemador en cualquier locación que el personal esté continuamente expuesto.

Fuente: (API, 1996).

Tabla 1.7 Efectos de la radiación térmica (Banco Mundial, 1985).

Intensidad de radiación kW/m <sup>2</sup>	Efecto observado
37.5	Suficiente para causar daño a equipo de proceso, colapso de estructuras.
25	Energía mínima para encender madera en exposiciones indefinidamente largas (sin piloto). El acero delgado aislado puede perder su integridad mecánica.
12.5	Energía mínima para encender la madera; fusión de tubería de plástico en cables eléctricos; 100% de letalidad.
9.5	Umbral de dolor alcanzado después de 8 segundos; quemaduras de segundo grado después de 20 segundos.
4	Suficiente para causar dolor a personal que no se cubra en 20 segundos; es posible la formación de ampollas en la piel (quemaduras de segundo grado); 0% de letalidad.
1.6	No causará incomodidad por exposición prolongada

Fuente: (World Bank, 1985).

Un modelo probit para estimar los niveles de mortalidad de una dosis térmica dada de charcos de fuego e incendios súbitos, basado en datos de la explosión nuclear.

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln \left( \frac{tI^{4/3}}{10^4} \right) \quad 1.81$$

Donde Y es probit, t es la duración de la exposición (seg), e I es la intensidad de radiación térmica (W/m<sup>2</sup>).

### 1.8.6 Efectos de la explosión

Los modelos de efectos de explosión predicen el impacto de la sobrepresión de explosión y proyectiles sobre las personas y objetos. La mayoría de modelos de efectos de explosiones se basan en la sobrepresión de explosión por sí sola, o una combinación de sobrepresión de explosión, duración e impulso específico. Los efectos de la explosión se clasifican según los efectos sobre las estructuras y las personas.

**Las estructuras.** Un modelo probit simple para describir los efectos sobre las estructuras es:

$$Y = -23.8 + 2.92 \ln(P^0) \quad 1.82$$

Donde Y es el probit y  $P^0$  es la sobrepresión pico (Pa). El probit, Y, se puede convertir a un porcentaje usando la tabla A9 del apéndice A, que representará la cantidad de estructuras dañadas.

**Las personas.** Las personas fuera de los edificios o estructuras son susceptibles a:

- 1) Lesión por explosión directa (sobrepresión de explosión).
- 2) Lesión por explosión indirecta (misiles o desplazamiento de todo el cuerpo).

Ondas de sobrepresión relativamente altas (> 15 psig) son necesarias para producir la letalidad (principalmente debido a la hemorragia pulmonar). Se prevé una probabilidad de víctimas mortales como consecuencia de la hemorragia pulmonar debido al efecto directo de la sobrepresión mediante la expresión:

$$Y = -77.1 + 6.91 \ln(P^0) \quad 1.83$$

Donde Y es el probit y  $P^0$  es el pico de sobrepresión de pico (Pa).

## CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS BÁSICOS DEL SOFTWARE PHAST

PHAST nombrado así por sus siglas en inglés, *Process Hazard Analysis Software Tool*, es una herramienta de Software para Análisis de peligros de procesos de 32-bit, que tiene como fin el análisis de consecuencias originadas por emisiones de sustancias químicas. Está disponible en dos formas PHAST Professional y PHAST Micro, el primero cuenta con la totalidad de las funciones a diferencia de la modalidad Micro que tiene funciones limitadas. Los resultados presentados en este trabajo corresponden a los obtenidos en PHAST Professional Versión 6.1.

PHAST sigue una serie de etapas para la realización del análisis de consecuencias, en la ventana principal el usuario debe llenar una serie de datos de entrada para obtener los resultados apropiados del análisis de consecuencias, no obstante el proceso intermedio (los cálculos) para obtener los resultados, no pueden ser vistos por el usuario. En este capítulo, se presenta una descripción general de los modelos que emplea PHAST, los cuales si se encuentran disponibles en el manual del usuario incluido en el software. Estos modelos incluyen a los modelos de descarga, de dispersión, incendio y explosión y tóxicos; se detallan además las propiedades de los materiales, parámetros y datos meteorológicos empleados para predecir los efectos.

### 2.1 LOS MATERIALES <sup>[25]</sup>

Para poder realizar cualquier análisis de consecuencias de forma manual, usando este software o algún otro, lo primero es contar con las propiedades de los materiales, así PHAST incluye una lista de 59 sustancias químicas, disponibles para todos los usuarios, y 1500 materiales en la sección de administrador; además pueden ser cargadas todas las sustancias que el usuario desee siempre que cuente con todas las propiedades de dicha sustancia; *las propiedades de los materiales* están divididas en dos categorías, constantes y variables (ver apéndice C). Para este trabajo se emplearon sustancias totalmente definidas por PHAST.

### 2.2 ECUACIONES DE ESTADO <sup>[25]</sup>

El programa PHAST incluye cuatro ecuaciones de estado, y se puede seleccionar cualquiera para un material particular en la sección *General* de las propiedades de entrada de un material. Cuando la aplicabilidad de la ecuación virial es limitada debido a que no funciona bien en la región crítica para descargas supercríticas a alta presión, y da pobres resultados en el modelado de una mezcla. Una ecuación cúbica es preferible.

La ecuación de estado es usada por el sistema para determinar el valor de las propiedades físicas de un componente puro o de una mezcla. Las propiedades derivadas de las ecuaciones de estado son entalpías, entropías y la densidad del vapor.

En el sistema DIPPR (por sus siglas en inglés, Design Institute for Physical Property Data), el usuario puede escoger entre cuatro ecuaciones: la ecuación virial y tres versiones de una ecuación de estado que son cúbicas respecto al volumen molar, que son las que mejor representan el comportamiento tanto de líquidos como de vapores. PHAST emplea la de Redelich-Kwong, Soave-Redelich-Kwong, y Peng-Robinson.

## 2.3 ALMACENAMIENTO <sup>[25]</sup>

El primer paso es determinar el estado del material antes de su liberación a la atmósfera. Dependiendo de las condiciones definidas, los escenarios disponibles variarán. Diversos casos de almacenamiento son:

- Líquido Saturado y Presión/Temperatura: el recipiente esta a la presión de saturación de vapor. Se requiere alimentar la temperatura o la presión del sistema.
- Presión y temperatura: el recipiente no está a la presión de vapor saturado del material. Se proporcionan la presión y temperatura del sistema. El escenario “Venteo de Espacio de Vapor” mezcla aire si la presión de vapor del material esta debajo de la presión atmosférica.
- Presión atmosférica y temperatura: el recipiente esta a presión atmosférica. Sólo se define la temperatura.

## 2.4 ESCENARIOS PARA LOS MODELOS DE DESCARGA <sup>[25]</sup>

### 2.4.1 Emisión instantánea o ruptura catastrófica

Este escenario modela un incidente en el cual un tanque es destruido por un impacto, agrietamiento o alguna otra falla que se propaga rápidamente. Se asume que la descarga (todo el inventario) forma una masa homogénea, que se expande rápidamente sin restricciones del tanque destrozado. Si el tanque está en el suelo, se formará una nube semiesférica, y si es elevado se formará una nube esférica.

### 2.4.2 Fuga por orificio

Generalmente esta es una emisión accidental de vapor o líquido. Se asume que es redondeado y afilado, en el cual se asume que no hay pérdidas por fricción conforme el fluido fluye a través del tanque o la tubería hacia el orificio.

La situación más general es una descarga de un tanque a dos fases, capaz de dar liberación de un material peligroso de ambos lados el de vapor y el de líquido. La descarga tiene una dirección (arriba, abajo, horizontal, etc.). Para calificar como fuga, la relación de la longitud de la tubería al diámetro del orificio debe ser menor a tres.

### 2.4.3 Venteo de espacio de vapor

Es usado para el venteo de material del espacio de vapor de un tanque no presurizado o refrigerado, típicamente durante una operación de llenado. Si la temperatura de almacenamiento está por debajo del punto de ebullición del material, el aire será mezclado dentro para dar el total de presión hasta la atmosférica, dando a la descarga un factor inicial de dilución. El escenario aplica solo a condiciones de proceso a temperatura atmosférica.

### 2.4.4 Rupturas de línea

Esta es una ruptura completa de una tubería de corta longitud unida a un tanque (o cualquier otro tipo de depósito a presión). El modelo de descarga calcula la caída de presión a través de la línea basada en la frecuencia de codos, coples y juntas, y las pérdidas en la cabeza de rapidez en la válvula (dando en la

sección de parámetros de descarga). Si el material es un líquido volátil entonces puede ocurrir vaporización dentro de la tubería, y se usa un modelo de equilibrio para el cambio de fase.

#### **2.4.5 Liberación de 10 minutos**

Este escenario modela una fuga con el tamaño de orificio que drenará el inventario en 10 minutos. Es frecuentemente usada como una descarga de “Peor Caso”. Este escenario aplica para todas las condiciones de descarga.

#### **2.4.6 Rupturas de disco**

Puede ser por dos causas: sobrepresión, en cuyo caso el material liberado por lo general será vapor, y sobrellenado o inflamación de líquido, en tal caso el material descargado será a dos fases. Se debe especificar la causa que genera la ruptura, seleccionando la fase de descarga del material, para el evento bajo estudio.

En el caso de sobrepresión de un tanque lleno de líquido presurizado por gas inerte o líquido saturado, el material descargado será vapor, si la presión en el tanque es baja (<5 psig o 0.34 barg), y a dos fases si la presión es mayor.

#### **2.4.7 Válvulas de alivio**

Este modelo es usado para una liberación en caso de que una válvula de alivio abra. El programa puede modelar dos causas de abertura de la válvula: sobrepresión, en cuyo caso el material liberado será vapor; y sobrellenado de líquido, en cuyo caso el material liberado serán dos fases. La causa se especifica seleccionando la fase apropiada para el caso.

Los cálculos de descarga primero modelan descarga a través del orificio de restricción de la válvula y, después, modela el flujo a través del tubo de escape de la válvula de alivio. El modelado de descarga a través del orificio incorpora un factor de seguridad de la válvula de alivio que se utiliza para factorizar el diámetro del orificio de la válvula de alivio para tener en cuenta el sobrellenado.

Combinando los diversos escenarios de fuga con las diferentes condiciones de almacenamiento, es posible obtener la tabla 2.1, en la cual puede observarse que no todas las combinaciones son posibles.

#### **2.4.8 Tubería larga (ducto)**

Este escenario modela la descarga dependiente del tiempo de una tubería larga, e incluye los efectos de cierre mediante modelado del cierre de válvulas en tubería larga. La descarga puede ser vapor o dos fases, dependiendo de las condiciones en la tubería. Se usa este escenario si la tubería es larga (p.ej. Longitud >> 300\*Diámetro), o si se quiere modelar un tamaño de orificio que es menor que una ruptura total.

El modelo puede considerar el efecto de un flujo bombeado y de válvula de cierre, definidas por su distancia desde el extremo aguas arriba de la tubería y por su tiempo de cierre (medido desde el inicio de la fuga). Una vez que es alcanzado el tiempo de cierre, se asume que las válvulas cierran instantáneamente.

Tabla 2.1 Posibles escenarios de fuga de acuerdo a las diferentes condiciones de almacenamiento

Escenario	Líquido saturado	Líquido en atmosfera inerte*	Gas Presurizado	Presión Atmosférica
Ruptura Catastrófica	x	X	x	X
Fuga	x	X	x	X
Venteo del espacio vapor				X
Ruptura de línea	x	X	x	X
Liberación de 10 min.	x	X	x	X
Ducto Largo	x	X	x	
Disco de Ruptura	x	X	x	
Válvula de Relevo	x	X	x	
Falla de techo de tanque	x			

Fuente: (PHAST Help System, v6.1).

Nota: \*Entiéndase por un líquido en atmósfera inerte (*Padded liquid*) el almacenamiento de un líquido bajo presión por un gas inerte (p. ej. nitrógeno).

#### 2.4.9 Falla de techo de tanque

El modelo de falla de techo de tanque describe la descarga de material de un tanque refrigerante aislado en el caso de que el techo del tanque falle. El material almacenado en el tanque esta ligeramente sobre su punto normal de ebullición con una pequeña sobrepresión, y el tanque está cubierto por un techo de acero o concreto.

El modelo calcula los efectos instantáneos iniciales de falla de techo de tanque, o efectos continuos a largo plazo, dependiendo de cual es seleccionado en la sección que describe el escenario. El modelo siempre calcula ambos efectos instantáneo y continuo, y da el resultado para ambos, en el reporte de falla de techo. Sin embargo, el modelo de dispersión solo se realizará para el efecto que es seleccionado para el modelo de efecto.

### 2.5 PARÁMETROS DE DESCARGA <sup>[25]</sup>

Los principales parámetros considerados para el modelo de descarga son las pérdidas en la cabeza de velocidad, la longitud de la tubería, rugosidad de la tubería, frecuencia de codos, cople y juntas, y la dirección de la descarga.

#### Dirección de la descarga

La dirección determina que trayectoria seguirá la descarga de la nube y qué proporción de la velocidad inicial es usada. Las direcciones hacia abajo y horizontal que inciden sobre el suelo pueden dar mayores distancias de dispersión que otras direcciones porque el momentum inicial es reducido, y esto a su vez reduce la velocidad inicial de dilución y significa que la liberación requiere más tiempo para dispersarse.

Para el escenario de ruptura catastrófica, la dirección está deshabilitada debido a que en descargas instantáneas se asume que no tienen dirección. Para el escenario de falla de techo de tanque, la única

opción de la dirección es vertical. Si se establece una dirección en ángulo, entonces se debe dar el ángulo de la descarga con respecto a la horizontal a favor del viento.

El modelo de Shell para chorros de fuego no modela chorros que se dirigen hacia abajo. Si el ángulo de la horizontal es negativo, el programa fijará el ángulo para el chorro de fuego como horizontal. El modelo API para chorros de fuego no modela chorros en ángulo, el programa fijará el ángulo para que el chorro de fuego sea horizontal a favor del viento o vertical hacia arriba, cualquiera que esté más cercano al ángulo de salida.

## **2.6 MODELO DE DESCARGA <sup>[25]</sup>**

Las cantidades más importantes que se calculan para describir la condición del material y liberación son:

Para liberación continua únicamente:

- Flujo másico
- Velocidad final
- Velocidad de descarga

Para liberación continua e instantánea:

- Fase (vapor, a dos fases, líquido)
- Fracción de líquido
- Temperatura del material liberado
- Diámetro de la gota
- Duración de la liberación
- Presión estrangulada
- Temperatura de estrangulamiento
- Coeficiente de descarga

## **2.7 MODELO DE DISPERSIÓN <sup>[25] [36]</sup>**

PHAST usa un modelo de dispersión propio llamado Modelo de Dispersión Unificado (UDM, por sus siglas en inglés Unified Dispersion Modeling). A diferencia de otros modelos, solo se necesita un modelo para tratar la dispersión de una nube desde la emisión hasta la más baja concentración en la dirección del viento. Los efectos que se consideran en todas las etapas de dispersión son:

- Flotabilidad o falta de flotabilidad.
- Formación de aerosoles, condensación y evaporación de charcos.
- Aterrizaje, tope con la capa de mezclado y despegue.
- Incorporación de aire y expansión de la nube.

Para el estudio de una nube, PHAST divide a está, en cuatro etapas desde el momento de la liberación hasta que está ya no representa un peligro, por sus características iniciales de inflamabilidad o toxicidad, dichos regímenes de dispersión o etapas observados en la nube son:

Etapas I: Chorro inicial turbulento y en expansión.

Etapas II: Expansión densa y mezclado turbulento.

Etapa III: Derrumbe de nube densa.

Etapa IV: Dispersión pasiva.

Esto significa que no hay discontinuidades entre los modelos separados mientras la nube cambia de la etapa I a la IV, y hay mayor exactitud en los cálculos para masa inflamable, masa explosiva e impacto tóxico.

### **2.7.1 Características específicas**

El UDM es una generalización de los modelos gaussianos propuestos por Ooms y mejorados por Emerson, los perfiles de concentración son descritos por potencias variantes constantemente adaptadas (en régimen pasivo, esto es, gaussiano) y los perfiles normales modelados todos por separado, permitiendo el desarrollo de perfiles elípticos.

El UDM se formuló como un modelo de similitud donde la concentración y otras variables se consideraron con un perfil predefinido. También asume perfiles gaussianos generalizados. La incorporación de aire, expansión, etc., se calcula a partir de una solución numérica (Runge-Kutta-Milne) a ecuaciones diferenciales para masa, momento y transferencia de calor entre la nube y su ambiente.

### **2.7.2 Perfil atmosférico**

La descripción del Modelo de Dispersión Unificado, se da por los perfiles usados para modelar la capa inferior de la atmósfera en la cual se supone que tiene lugar la dispersión. La velocidad del viento varía con la altura en la atmósfera, al igual que la temperatura atmosférica, presión, densidad, humedad, etc. Relaciones simples son descritas aquí las cuales son apropiadas para los primeros cientos de metros en la atmósfera.

Se proporcionan dos opciones para la variación de la velocidad del viento con la altura:

- Perfil de velocidad constante del viento.
- Perfil logarítmico del viento.

Y tres opciones para la variación de la temperatura atmosférica y la presión con la altura:

- Perfiles de presión y temperatura constantes.
- Perfiles de presión y temperatura lineal.
- Perfil de temperatura logarítmico y perfil de presión lineal.

Estos parámetros afectan a la nube porque la velocidad de la nube viento abajo dependerá de la altura del centroide, así como de la temperatura del aire que se mezcla en la nube. Se recomienda que se use un perfil logarítmico para el viento, de presión lineal y temperatura logarítmica. Dichos perfiles emplean la longitud de Monin-Obukhov, para relacionarlos con la altura vertical (para más detalle véase el apéndice D).

### **2.7.3 Datos del clima**

Se debe especificar la velocidad del viento (se asume que es constante a través de la descarga y la dispersión), la clase de estabilidad Pasquill, (emplea condiciones de estabilidad como se muestra en la

tabla 2.1), parámetros de rugosidad de la superficie (valores similares a los mostrados en la tabla A2 son empleados por PHAST), temperatura ambiente, temperatura del suelo, humedad relativa y flujo solar.

#### **2.7.4 Tiempo promedio**

Cuando la nube alcanza la Etapa IV en su dispersión –la Etapa Gaussiana – ya no viaja en línea recta. Por lo tanto, como PHAST comienza todos sus cálculos en el centro de la nube, donde la concentración es la mayor, toda medición instantánea durante la Etapa Gaussiana será conservadora.

Las mediciones instantáneas solo toman en cuenta el punto de concentración más alta en la nube. Por lo tanto, las mediciones tóxicas, para las cuales son de interés tiempos de exposición mayores, se miden normalmente usando un tiempo promedio mayor. Los materiales inflamables, los cuales normalmente no llegan hasta la Etapa Gaussiana normalmente se miden usando un tiempo promedio más corto, o instantáneo.

Hay dos tiempo promedios básicos en PHAST:

- Sustancia tóxicas – 10 minutos
- Sustancia inflamables – 18.75 segundos

Además, se pueden seleccionar otros tiempos promedio cuando se alimentan los datos del caso:

- Guías de Planes de Respuesta a Emergencia, ERPG–60 minutos
- Inmediatamente Peligroso para la vida y la salud, IDLH–30 minutos
- Límite máximo permisible de exposición de corto tiempo, TLV-STEL–15 minutos

#### **2.7.5 Aerosoles y condensación**

El UDM toma en cuenta la formación de aerosoles al inicio de la emisión, y después sigue a las gotas hasta el final de la dispersión, el punto de condensación o el punto de evaporación. Se calcula un tamaño promedio de gota y esa gota es seguida hasta su aterrizaje. Se asume que toda la condensación ocurre en ese punto.

### **2.8 EVAPORACIÓN DE CHARCO <sup>[25]</sup>**

La rapidez de vaporización es directamente proporcional al área superficial del charco, del radio en un tiempo dado y depende de la rapidez de esparcimiento, que a su vez es función de la cantidad de materia y las dimensiones del charco. Inicialmente, la temperatura del charco se considera igual a la temperatura del líquido derramado. La rapidez de cambio de la temperatura del charco para un paso de tiempo dado, se calcula mediante la ecuación que describe la rapidez neta de flujo de calor dentro del charco, durante este tiempo la tasa de evaporación varía.

El UDM, sin embargo, requiere una tasa de emisión constante para los cálculos de dispersión. Por lo tanto, PHAST dividirá el tiempo durante el cual el charco está presente en varios segmentos y determinará una tasa de evaporación promedio para cada uno de esos segmentos. El programa divide automáticamente la evaporación del charco en segmentos múltiples de manera que cada segmento tenga una categoría igual.

### 2.8.1 Segmentos de nube múltiples

El comportamiento de la evaporación del charco, después de la emisión, puede generar segmentos múltiples de charco como se describe arriba y segmentos múltiples de nube. Cuando hay condensación después de la emisión, el charco se vaporizará y contribuirá a la nube de vapor. Al moverse la nube a favor del viento, la evaporación del charco continuará contribuyendo a la nube. Cuando la nube rebasa la orilla del charco, la evaporación del charco creará otra nube detrás de ella. La mayor parte del tiempo, la nube tendrá múltiples tasas de evaporación.

Cada nube podría tener varias tasas de evaporación que contribuyan a su formación. Cada vez que las características de la nube cambien, como cuando la tasa de evaporación del charco cambie o cuando la nube rebasa la orilla del charco, se crea un nuevo segmento de la nube.

### 2.8.2 Geometría del charco

Las gotas que aterrizan se expanden para formar un charco. El charco se ve afectado, por el tipo de superficie, su temperatura y la presencia, o no, de un dique. La forma del charco al tiempo  $t$ , debido al derrame de un líquido de densidad  $\rho_L$ , es idealizado como un cilindro de radio  $r(t)$  y un espesor uniforme  $h(t)$ , con una fuente puntual situada en su centro. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_{pool}(t) = \pi r^2(t) h(t) \rho_L \quad 2.1$$

Donde  $M_{pool}$  es la masa del charco en el tiempo  $t$ .

### 2.8.3 Balance de masa

La masa en el charco se incrementará si el derrame continúa desde el punto de origen, o por precipitación de las gotas de líquido suspendidas en la nube, y se reducirá como consecuencia de la evaporación del líquido en el charco. En el caso de que el charco sea derramado sobre agua, también se reducirá debido a la disolución de la sustancia en el agua. La siguiente ecuación describe el caso general para una descarga dependiente del tiempo:

$$\frac{dM_{pool}}{dt} = S(t) - E_{vap}(t) - E_{sol}(t) \quad 2.2$$

Donde  $S(t)$  es la rapidez de derrame (Kg/s),  $E_{vap}(t)$  la rapidez de vaporización y  $E_{sol}(t)$  la rapidez de disolución en agua (Kg/s). Para un charco en tierra,  $E_{sol}(t) = 0$ .

### 2.8.4 Balance de calor

Una vez que el radio del charco ha sido fijado, el programa puede calcular la velocidad neta del flujo de calor dentro del charco. Se consideran los siguientes mecanismos:

$Q_{cond}$ : Flujo de calor de conducción a/desde el piso—la temperatura superficial varía con el tiempo sobre el agua (puede haber formación de hielo si se derrama sobre charco somero).

$Q_{conv}$ : Convección—se consideran los flujos de aire laminar y turbulento sobre la superficie.

$Q_{rad}$ : Radiación—flujo solar en charco / radiación de onda larga a/desde el charco.

$Q_{sol}$ : Calor de Disolución—si el material se disuelve en agua.

$Q_{evap}$ : Pérdida de calor debida a evaporación/ebullición.

$Q_{rxn}$ : Calor de Reacción—si el material reacciona con el agua.

$$Q_{net} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{sol} + Q_{rxn} - Q_{evap} \quad 2.3$$

### 2.8.5 Formación de capa de hielo

La ebullición de materiales criogénicos en agua puede resultar en la formación de una capa de hielo en la superficie del agua, y esto afectará la velocidad de conducción. PHAST asume que si el agua es poco profunda, la convección de calor dentro del agua al charco es inhibida y se forma una capa de hielo.

## 2.9 EXPLOSIÓN DE NUBE DE VAPOR <sup>[25]</sup>

PHAST proporciona tres modelos de explosión de nube de vapor para usarse ya sea como parte del análisis concatenado (usando los modelos de tanque/tubería o definidos por el usuario) o como modelos separados o de alimentación directa, observando solo los riesgos de interés.

### 2.9.1 Parámetros que describen la naturaleza de la explosión

Para modelar una explosión en PHAST, es necesario describir los parámetros adecuados dependiendo del modelo, estos pueden ser el factor de reflexión del suelo, reactividad del material, expansión de la flama, densidad de obstáculo, volumen confinado y criterio de localización de la explosión.

- **Volumen confinado:** Se debe especificar el volumen de la región confinada (cuando la opción está deshabilitada es porque la masa ya ha sido indicada). Se asume que todas las partes de la nube fuera de este volumen, están en regiones no confinadas, y no son capaces de generar sobrepresiones significativas. Si el volumen de la nube es menor que el volumen confinado, entonces el programa usará el volumen de la nube en los cálculos.
- **Criterio de localización de la explosión:** Este parámetro permite escoger la localización del epicentro de una explosión retardada, donde se define la ubicación en relación con las dimensiones de la nube. Este parámetro contiene las siguientes opciones:
  - *Frente de la nube (Fracción LFL)* - el epicentro se encuentra en el lugar más lejano a favor del viento en la que la concentración es al final, igual a la fracción LFL fijada en los parámetros inflamables.
  - *Centro de la nube* - el epicentro se encuentra en el centro de la nube para una liberación instantánea, y en el centro de gravedad de la nube para una liberación continua, donde la ubicación del centroide en la dirección del viento (x), se obtiene tomando un promedio ponderado del punto central de cada segmento de la liberación.
  - *Frente de la nube (LFL)* - el epicentro se encuentra en el lugar más lejano a favor del viento en el que la concentración es igual a la LFL.

### 2.9.2 Modelo de explosión TNT

Para modelar una explosión de nube de vapor VCE, el modelo TNT es el más directo, y produce solo resultados de sobrepresión (no impulso). Solo requiere dos datos; el primero es que tipo de explosión

será modelada –con detonación en suelo o en el aire. El segundo dato requerido es la eficiencia de la explosión.

### 2.9.3 Modelo de explosión “Multi-Energy” de TNO

Divide la nube con base a las diferentes áreas que cubre y toma en cuenta hasta siete sub-fuentes. Cada área puede tener un valor, un confinamiento propio y, ya sea volumen confinado o fracción de la nube especificados. La fuerza de la detonación alimentada predice la curva seleccionada (1-10) para calcular sobrepresiones.

El modelo TNO produce resultados de sobrepresión e impulso para cada fuente de detonación por separado. Como las zonas de riesgo pueden traslaparse, las sobrepresiones pueden ser aditivas. Esto hace al modelo TNO relativamente difícil de interpretar.

### 2.9.4 Modelo de explosión Baker-Strehlow

El modelo de Baker-Strehlow requiere datos de alimentación tales como la reactividad del fluido, expansión de la flama, densidad de obstáculos y reflexión en el suelo. Si se usa el modelo de Baker como parte del análisis concatenado, también se requiere el volumen confinado. Es posible obtener la sobrepresión e impulso a una distancia dada.

## 2.10 MODELOS INFLAMABLES <sup>[25]</sup>

### 2.10.1 Dardos de fuego

Calcula la forma e intensidad de la flama, y resultados de radiación en un rango de distancias. La flama es modelada como un cilindro en la dirección del viento, con diámetro  $D$ , altura  $H$ , y un ángulo con inclinación  $\theta$  (medido de la vertical), la flama es descrita por tres círculos ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ) dispuestos a lo largo de la línea central de la flama, cada uno definido por la coordenada  $x$ , en la dirección del viento y la elevación  $z$  del centro del círculo, y por el radio  $r$ , como se observa en la figura 2.1.

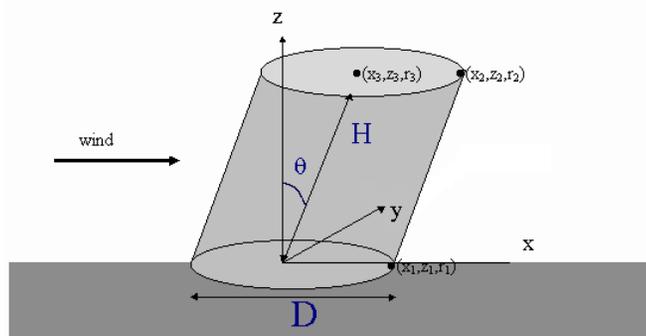


Figura 2.1 Forma de la flama de un charco de fuego. (PHAST Help System, v6.1)

### 2.10.2 Dardos de fuego

PHAST tiene dos modelos distintos para describir la forma de la flama, producida por un dardo de fuego, Shell-Thornton y API. El primero trata la flama como un tronco de cono inclinado y el API como una pluma tipo “plátano” es decir cónica en los extremos e inclinada por el viento. Ver figura 2.2 y 2.3.

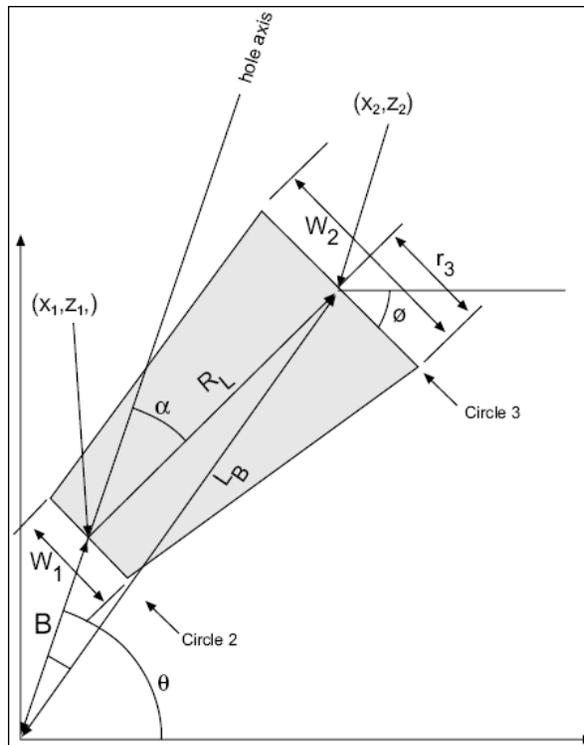


Figura 2.2 Forma de la flama para el modelo de Shell-Thornton. (PHAST Help System, v6.1)

### 2.10.2.1 Modelo de Shell-Thornton para dardos de fuego

Existen seis puntos importantes de cálculos: masa del dardo, velocidad del dardo, diámetro de la fuente, forma de la llama, poder emisor de la llama y radiación. El modelo de Shell describe la forma de un dardo de fuego como el tronco de un cono, donde la base del tronco se inicia a una distancia  $B$  de la punta del derrame, y se inclina un ángulo  $\alpha$  del eje, entre la punta del derrame y la base, según lo mostrado en la figura 2.2.

La llama está descrita por un conjunto de círculos. Cada círculo está definido por cuatro coordenadas, las coordenadas  $X$  y  $Z$  del centro del círculo, del radio del círculo y de la inclinación del círculo ( $\phi$ ). La llama del dardo Shell está definida por cuatro círculos. El primero y segundo tienen el mismo centro e inclinación, pero el primero tiene radio cero. El tercero y cuarto tienen el mismo centro e inclinación, pero el cuarto tiene radio cero. El primer y cuarto círculo, con sus radios a cero, se agregan para completar la superficie de la llama; los cálculos de la radiación tratan la llama como un conjunto de superficies cónicas, donde cada superficie cónica está limitada por dos círculos, y estos dos círculos se aseguran de que la llama entera sea tratada como una superficie de radiación.

### 2.10.2.2 Modelo API para dardos de fuego

Este modelo considera que el chorro se extiende hasta el LFL. Se ve afectado por la humedad, velocidad del viento y la dirección de la descarga. Hay cinco partes importantes en los cálculos: masa del chorro, velocidad del chorro, dimensión de la llama, poder emisor de la flama y radiación.

La flama es un mechero que puede ser venteado por el viento o por los efectos de la gravedad, esta es descrita por diez círculos (c1 a c10) equidistantes a lo largo de la flama, como se ilustra en la figura 2.3.

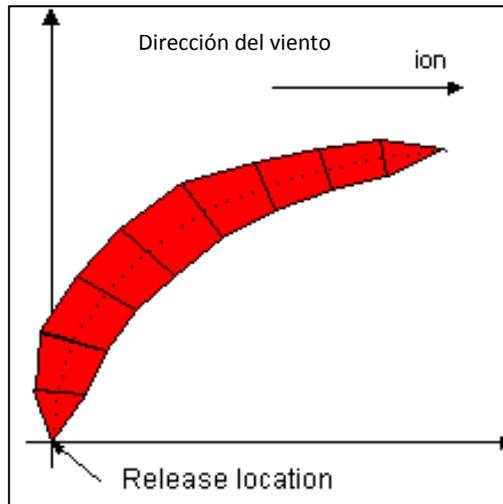


Figura 2.2 Forma de la flama para el modelo API. (PHAST Help System, v6.1)

### 2.10.3 BLEVE

La flama es modelada como una esfera, descrita por diez círculos igualmente espaciados a lo largo de la longitud de la flama. Cada círculo está definido por una coordenada  $x$ , a favor del viento y una de elevación  $z$ , del centro del círculo, por el radio  $r$ , y la inclinación del círculo de la horizontal  $\Phi$ . El modelo separado requiere que la fracción de vapor, duración de exposición y poder emisor de la flama (opcional) sean determinados por el usuario. También son necesarios la masa inflamable o el radio y duración de BLEVE.

## 2.11 MODELO DE RADIACIÓN <sup>[25]</sup>

Los niveles de radiación suelen ser el resultado más importante en los modelos inflamables. El modelo de consecuencias calcula y reporta los efectos a distancia para tres niveles de radiación, fijados por el usuario.

### 2.11.1 Radiación a una distancia de interés

Se pueden especificar tres distancias de interés. El programa considera cada distancia como un punto inmediatamente en la dirección del viento de la elipse y a la elevación fijada por los efectos inflamables, y calcula la radiación en ese punto.

#### 2.11.1.1 Elipses de radiación a niveles de interés

Este considera un plano horizontal a la altura especificada para cálculos de efectos fijados en los parámetros inflamables, y calcula las dimensiones de la elipse que conecta puntos que tienen un factor de visión dado, nivel de radiación, o nivel de letalidad. En realidad, el contorno que conecta estos puntos puede no ser perfectamente elíptico, pero la elipse es una aproximación usada comúnmente.

### 2.11.2 Cálculo del nivel de letalidad

Dado el nivel de radiación incidente,  $R_i$ , el nivel de letalidad por radiación se calcula como una probabilidad basada en ecuación de Eisenberg:

$$X = p_1 + p_2 \cdot \ln \left[ t_e \left( \frac{R_i}{1000} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \quad 2.4$$

Donde P(X) es la probabilidad asociada con el valor probit X, y  $p_1$  y  $p_2$  son parámetros probit fijados como -14.9 y 2.56 respectivamente.

### 2.12 MODELOS DE EFECTOS TÓXICOS <sup>[25]</sup>

PHAST calcula los efectos tóxicos mediante los niveles guías de planes de respuesta a emergencia (ERPG) y cálculos de Probit. En primer lugar, el programa calcula la carga tóxica  $L$  recibida en un momento dado por la ecuación:

$$L = \int_0^r c^n dt \quad 2.5$$

Donde  $c$  es la concentración en ppm y  $t$  es la duración de la exposición en minutos.

Esta carga tóxica no es la misma que la dosis tóxica dada en el *Informe Probit*. Las dosis tóxicas se calculan con la concentración fraccional en lugar de la concentración en ppm y con la duración de la exposición en segundos en lugar de en minutos.

### CAPÍTULO III. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS EN PHAST Y EN EXCEL

En este capítulo se presenta una comparación de los resultados obtenidos con los modelos de análisis de consecuencias a través de once casos teóricos mostrados en las siguientes secciones, los cuales fueron seleccionados a partir de los propuestos en la bibliografía (AIChE/CCPS, 2000); se muestran para cada problema, los datos requeridos y los resultados obtenidos tanto en Excel como en PHAST. Finalmente se hace una discusión de los resultados y se da una explicación de por qué los resultados difieren, cuando este es el caso. Se presentan además dos casos al final, los cuales representan dos incidentes reales sucedidos en México.

Para el estudio de los modelos en PHAST, se requieren una serie de datos de entrada, los cuales para cada caso se resumen en una tabla, la cual está basada en la norma de referencia de Pemex NRF-018 (NRF-018-PEMEX-2007). Cuando se habla de los modelos en Excel, se alude a que las ecuaciones descritas en el capítulo I, fueron introducidas en una hoja de cálculo en Excel y constituyen un modelo sistemático con una sección en la que se introducen los datos de entrada, después se muestra la metodología empleada y los resultados obtenidos. La finalidad de los modelos descritos en Excel es brindar una nueva opción a los usuarios interesados en realizar un análisis de consecuencias de una manera sencilla y rápida, a través de la paquetería de Microsoft Office, ya que este software a diferencia de PHAST, es de fácil acceso.

En el presente capítulo, en el que se presentan datos de entrada y resultados concentrados en tablas, será común encontrar las abreviaturas SU y NC, donde SU indica que la variable o parámetro no tiene unidades (Sin Unidades) y NC indica que el resultado no fue calculado, pues para varios parámetros se encuentra que el modelo en Excel nos proporciona un resultado, pero PHAST no tiene la posibilidad de calcularlo, o viceversa.

#### 3.1 Descarga de un líquido a través de un orificio.

Considere un tanque, como se muestra en la figura 3.1, en el que se almacena propano licuado. Si el tanque esta presurizado a 0.1 bar man, y se asume una altura de 2m de líquido sobre el orificio. Calcular la velocidad de descarga de líquido, y la velocidad de descarga, a través de un orificio de 10mm de diámetro. Considere una densidad promedio del propano licuado de  $490 \text{ kg/m}^3$ .

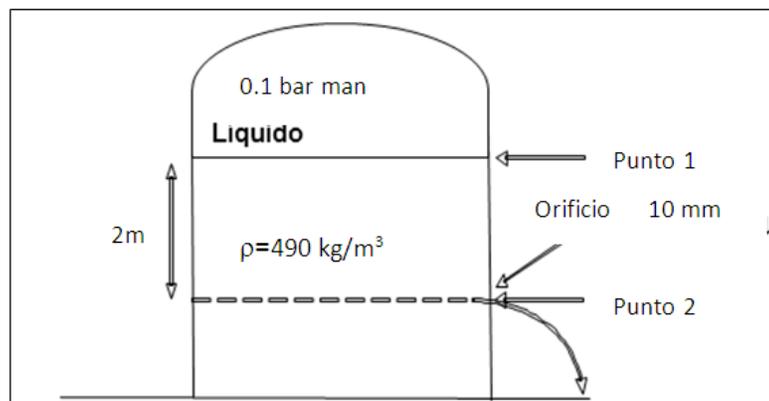


Figura 3.1 Descarga de líquido a través de un orificio.(AIChE/CCPS, 2000)

**MODELO EN EXCEL**

Para la resolución del problema, se hace uso de un modelo de descarga de líquido a través de un orificio, para el cual los datos de entrada se muestran en la tabla 3.1. Todos los datos de entrada son proporcionados por el enunciado del problema, excepto los valores de los factores que representan las pérdidas de energía mecánica por fricción, los cuales se asignaron conforme a la teoría citada en la página 14, considerando que el  $N_{Re} > 10,000$ .

Tabla 3.1 Datos de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.1.

Datos de Entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Presión del tanque en el espacio de vapor	$P_1$	10000	Pa
Presión fuera del orificio	$P_2$	0	Pa
Altura del líquido en el tanque	$Z_1$	2	m
Altura al final de la descarga	$Z_2$	0	m
Velocidad inicial del líquido	$V_1$	0	m/s
Densidad del líquido derramado	$\rho$	490	kg/m <sup>3</sup>
Diámetro del orificio	d	0.01	m
Aceleración de la gravedad	g	9.807	m/s <sup>2</sup>
Constante gravitacional	gc	1	kgm/Ns <sup>2</sup>
Factores de pérdidas de cabeza a la entrada	HLF <sub>1</sub>	0.5	SU
Factores de pérdidas de cabeza a la salida	HLF <sub>2</sub>	1	SU

**MODELO EN PHAST**

Para efectuar la simulación en PHAST, es necesario proporcionar los datos de entrada apropiados, tal como se muestra en la tabla 3.2; nótese que esta tabla muestra algunos datos que están predefinidos, tal como las condiciones atmosféricas, sin embargo, es importante que cada vez que se efectúa una simulación, se revisen dichos datos pues pueden variar dependiendo del caso que se este tratando.

Tabla 3.2 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.

Modelo	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	9.85	° C
Humedad relativa	70	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	kW/m <sup>2</sup>
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Propano	
Fase	Líquido	
Inventario	1000	Kg

Continuación de la tabla 3.2.

Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	
Datos del recipiente		
Temperatura	Líquido saturado	° C
Presión	0.1	Bar man.
Altura hidráulica	2	m
Datos del escenario		
Escenario	Fuga	
Diámetro de la fuga	10	mm
Dirección de la fuga	Horizontal	
Elevación de la fuga	1	m

Los resultados obtenidos, tanto de la simulación en PHAST, como del modelo desarrollado en Excel, se muestran en la tabla 3.3; cabe señalar que en dicha tabla sólo se muestran los resultados de interés al problema 3.1, sin embargo existen una gama de resultados calculados que pueden observarse en la misma sección de descarga, donde se encuentran el flujo de descarga y la velocidad de salida; entre estos figuran la fracción de líquido, temperatura final, velocidad final, flujo másico de descarga, velocidad en el orificio, presión de salida y temperatura final.

Tabla 3.3 Cuadro comparativo de los resultados PHAST y Excel del caso 3.1.

Resultados calculados		PHAST	Excel
Flujo de descarga	Kg/s	0.235	0.22
Velocidad en el orificio	m/s	8.58	5.7
Velocidad final	m/s	10.88	NC

#### Análisis de resultados

El modelo en Excel ha sido resuelto mediante un balance de energía mecánica, ecuación 1.2. Éste modelo no considera la vaporización súbita y asume que todo el material derramado es líquido, PHAST, muestra en el *reporte de descarga* que la fracción de líquido es de 0.99, esto muestra que efectivamente ocurre una vaporización súbita, sin embargo para este caso particular la vaporización puede considerarse que es mínima, por lo cual el modelo en Excel es apropiado para este caso. Sin embargo, este análisis presenta serias desventajas dado que el objetivo es prescindir del PHAST, para saber que el modelo empleado de *Descarga de un líquido a través de un orificio* es apropiado, tendría que usarse un diagrama de equilibrio para la sustancia bajo estudio, en este caso, siendo el propano un material totalmente caracterizado no se ha presentado ningún problema al corroborar que el propano sigue siendo líquido a las condiciones de descarga (presión atmosférica), pero para sustancias poco conocidas se pueden encontrar dificultades a la hora de investigar si el material permanecerá o no, en estado líquido a las condiciones de descarga.

De acuerdo a la tabla 3.3, se observa que el flujo másico de descarga es muy similar; para el cálculo de la velocidad de salida, en Excel solo se ha realizado un cálculo con la ecuación 1.8 citada en el capítulo I; en

PHAST, como se muestra en la tabla 3.3, obtenemos dos velocidades distintas, la velocidad en el orificio y la velocidad final, que corresponde a la velocidad que tiene el fluido una vez fuera del orificio, a la presión atmosférica.

Para el cálculo de la velocidad en el orificio, PHAST emplea una ecuación idéntica a la empleada en Excel, sin embargo, la densidad del fluido es un parámetro que influye en el resultado de la velocidad, de modo que si se trata de calcular la velocidad en el orificio con la ecuación citada, dará un resultado distinto al mostrado en la tabla 3.3. La velocidad final esta dada por la ecuación 3.1, donde  $H_a$  representa el estado final a condiciones atmosféricas, y  $H_i$  representa el estado inicial.

$$u_f = \sqrt{-2(H_a - H_i)} \quad 3.1$$

Es importante hacer notar la aclaración de PHAST respecto a la velocidad, la cual indica que la velocidad final  $u_f$ , no corresponde a una velocidad física real, y es referida por ello como una *velocidad final* (o pseudo velocidad), sin embargo, es un parámetro útil, como dato de entrada en el modelo de dispersión.

A los modelos de descarga en PHAST, es posible asignarles una dirección de la descarga, lo cual para algunos casos afecta el flujo másico y la velocidad. Como en este caso el escenario seleccionado es el de *fuga a través de un orificio*, si se simula el mismo caso variando la dirección de la descarga, se observa que ni el flujo másico de la descarga ni la velocidad se ven afectados.

### 3.2 Descarga de un gas a través de un orificio

Considera la fuga de propano desde su confinamiento a las condiciones de 25°C y 4 bar man. (5.01 bar abs), a través de un orificio de 10mm de diámetro, que se encuentra del lado del vapor como se muestra en la figura 3.2. Estimar el flujo másico de descarga.

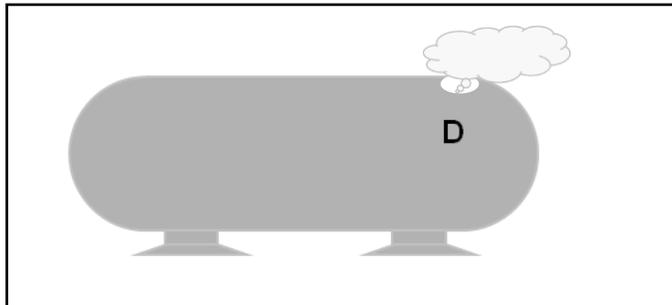


Figura 3.2. Descarga de gas a través de un orificio

#### MODELO EN EXCEL

Para la resolución del problema, se hace uso de un modelo de descarga de gas a través de un orificio, por dos métodos, el método adiabático y el isotérmico. Para ambos casos las variables de entrada se muestran en la tabla 3.4, los cuales se han obtenido de los datos del problema excepto los factores de pérdidas de energía por fricción en la entrada y la salida los cuales se han asignado conforme a la teoría citada en la página 14, considerando que el  $N_{Re} > 10,000$ .

Tabla 3.4 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.2.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Constante de los gases	R	8314.47	m <sup>3</sup> Pa/Kgmol·K
Capacidad calorífica específica del gas	K	1.15	SU
Constante gravitacional	gc	1	kgm/N.s <sup>2</sup>
Diámetro del orificio	D	0.01	m
Presión antes del orificio	P1	501000	Pa
Presión en el orificio	P2	101000	Pa
Temperatura	T	298	K
Peso molecular del gas	PM	44	kg/kgmol
Factores de pérdidas de fricción en la entrada	HLF1	0.5	SU
Factores de pérdidas de fricción en la salida	HLF2	1	SU
Coefficiente de descarga	CD	0.85	SU

### MODELO EN PHAST

Para efectuar la simulación en PHAST, es necesario proporcionar o bien revisar algunos datos de entrada, como los que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, caso 3.2.

Escenario seleccionado	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	9.85	° C
Humedad relativa	70	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Propano	
Fase	Vapor	
Inventario	1000	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	
Datos del recipiente		
Temperatura	25	° C
Presión	4	Bar man.
Datos del escenario		
Diámetro de la fuga	10	mm
Dirección de la fuga	Horizontal	
Elevación de la fuga	1	m

Los resultados obtenidos, tanto de la simulación en PHAST, como del modelo desarrollado en Excel, de interés para este caso se muestran en la tabla 3.6.

#### Análisis de resultados

Para el modelo en Excel se observa que el método adiabático (el cual no depende del coeficiente de descarga, pero sí de los factores de pérdidas por fricción en la entrada y salida) da un resultado inferior al isotérmico (depende del coeficiente de descarga, y no depende de los factores de pérdidas por fricción); para el modelo PHAST, el flujo másico a través del orificio a la presión en el orificio,  $P_o$ , es estimado mediante la ecuación 3.2, donde  $H_o$  corresponde a la entalpía final y  $H_i$  corresponde a la entalpía a las condiciones de almacenamiento.

$$\dot{m} = C_d A_o \rho_o \sqrt{-2(H_o - H_i)} \quad 3.2$$

Sabiendo que el modelo empleado es adiabático, entonces la entropía del estado inicial es igual a la entropía final (considerando un proceso reversible), es posible conocer la temperatura, presión y fracción del líquido en el orificio, ecuación 3.3; esto se logra mediante iteración numérica. Conociendo la temperatura, presión y fracción de líquido es posible conocer la entalpía en el orificio, mediante la ecuación 3.4.

$$S_o = S(T_o, P_o, F_{L_o}) \quad 3.3$$

$$H_o = H(T_o, P_o, F_{L_o}) \quad 3.4$$

Obsérvese que pese a que los resultados mostrados en la tabla 3.6, no presentan grandes diferencias, la metodología de cálculo es muy diferente en el modelo Excel, respecto a la empleada por PHAST, la cual podemos decir es una combinación tanto del método isotérmico (se le asemeja la ecuación 3.2) como del adiabático, y se convierte en una metodología más compleja, que se traduce en un resultado por encima de los calculados por Excel; en análisis de consecuencias, un sobreestimado en el flujo de liberación, resulta útil dado que es un parámetro de entrada para los cálculos de dispersión, los cuales a su vez serán igualmente sobreestimados.

Tabla 3.6 Cuadro comparativo de los resultados PHAST y Excel del caso 3.2.

Resultados calculados	PHAST	Excel	
		Método isotérmico	Método adiabático
Flujo de descarga Kg/s	0.093	0.090	0.086

### 3.3 Vaporización de charco

Debido a un derrame de hexano líquido desde su confinamiento se ha formado un charco, sobre una superficie de concreto con un área de  $100\text{m}^2$ , que se encuentra a una temperatura de 298 K. Calcular la velocidad de vaporización del charco.

**MODELO EN EXCEL**

Para resolver el problema en Excel, es necesario aplicar un modelo de *vaporización de charco*, los datos necesarios para aplicar a este modelo son mostrados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.3.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Área del charco	A	100	m <sup>2</sup>
Temperatura de líquido	T <sub>L</sub>	298	K
Peso molecular del hexano	PM	0.086	kg/mol
Presión de saturación del vapor	P <sub>sat</sub>	151	mmHg
Peso molecular referido al agua	M <sub>o</sub>	0.018	kg/mol
Coefficiente de transferencia de masa	K <sub>0</sub>	0.0083	m/s
Constante de los gases	R <sub>g</sub>	8.21E-05	atm·L/K.mol

**MODELO EN PHAST**

Para efectuar la simulación en PHAST, es necesario proporcionar los datos de entrada apropiados, tal como se muestra en la tabla 3.8; nótese que para los dos casos anteriores (3.1 y 3.2), se empleó como modelo fuente el de *tanque/tubería*, para este caso en función de los datos proporcionados por el problema resulta más conveniente el modelo separado de *vaporización de charco*.

Tabla 3.8 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, caso 3.3.

Modelo fuente	Vaporización de charco	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	50	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Temperatura del suelo	25	° C
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	n-Hexano	
Fase	Vapor	
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	Si	
Diámetro del dique	11.3	m
Tipo de superficie	Concreto	
Datos del escenario		
Temperatura de derrame	24.85	° C
Tipo de liberación	Instantánea	
Masa liberada	1000	Kg
Tiempo de interés	60	s

Los resultados obtenidos, tanto de la simulación en PHAST, como del modelo desarrollado en Excel, de interés para este caso se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Cuadro comparativo de los resultados PHAST y Excel del ejemplo 3.5 de vaporización de charco.

Resultados calculados	PHAST			Excel
Categoría de estabilidad del clima	1.5/F	1.5/D	5/D	ND
Velocidad de Vaporización del Charco (Kg/s)	0.3433	0.4067	0.5323	0.344

Nota: - La estabilidad de clima no afecta los resultados del modelo en Excel

### Análisis de resultados

En primera instancia debe recordarse que un modelo de *vaporización de charco*, es importante porque se forma una nube, que por las características del material tóxico o inflamable como en este caso, puede resultar en un peligro potencial para las personas en los alrededores.

Respecto a los resultados mostrados en la tabla 3.9, puede observarse que a partir del modelo en Excel solo se presenta un resultado, y a partir de la simulación en PHAST, se muestran tres resultados distintos, los cuales son dependientes de la condición climática seleccionada. Esto estriba en que el modelo en PHAST para calcular la rapidez a la cual se evaporara el charco emplea la ecuación 3.5.

$$E_{vap}(t) = \frac{Q_{evap}}{\Delta H_v(T_{pool})} \quad 3.5$$

Donde  $Q_{evap}$ , es el calor de evaporación para un charco en tierra y esta dado por la ecuación 3.6.

$$Q_{evap} = 0.014 \pi Sc^{-0.67} [u_a(z=1m)]^{0.25} r^{1.89} \Delta H_v(T_{pool}) \frac{M_a P_a}{RT_{pool}} \ln \left( \frac{P_a}{P_a - P_v^c(T_{pool})} \right) \quad 3.6$$

Donde  $\mu_a$  es la viscosidad dinámica del aire (kg/m/s),  $\rho_a$  es la densidad atmosférica (kg/m<sup>3</sup>),  $u_a(z=1m)$  es la velocidad del viento a 1m de altura (m/s),  $r$  es el radio del charco,  $\Delta H_v$  es el calor de vaporización (J/kg),  $M_c$  es el peso molecular (kg/kmol),  $P_a$  es la presión atmosférica (N/m<sup>2</sup>),  $P_v^c$  es la presión de saturación del vapor (N/m<sup>2</sup>),  $R$  es la constante universal de los gases (= 8314 J/K kmol),  $Sc$  es el número de Schmidt para aire.

Como puede apreciarse en la ecuación 3.6, la rapidez de evaporación depende de la velocidad del viento, a la altura de 1m. En PHAST, la velocidad del viento que se muestra en la tabla 3.9, esta predefinida a una altura de 10m, como se indica en los *parámetros de clima*, sin embargo, si se cambia la altura desde un valor de 10m a 1m tal como se requiere para esta ecuación el resultado es igual para todas las condiciones de clima.

La razón por la que la rapidez de vaporización varia, si se conserva en los *parámetros de clima* la altura preestablecida de 10m, es porque el perfil atmosférico de velocidad del viento es logarítmico, este perfil usa la longitud de Monin-Obukhov, la cual depende de la clase de estabilidad y de la longitud de la rugosidad de la superficie  $z_0$ , por ello para pasar a una altura menor (1m) se usan dichas constantes de Monin-Obukhov, para cada estabilidad, aunque para una altura a 10m la velocidad sea la misma, esta es diferente cuando se alcanza una altura de 1m (véase el apéndice D).

El desarrollo en Excel en cambio, emplea una ecuación más simple (ecuación 2.20), que no incluye la velocidad del viento. Con base a la tabla 3.9 se puede decir, que el uso de una ecuación como la 2.20, nos arroja resultados útiles para condiciones atmosféricas muy estables, que es el caso de la categoría 1.5F; sin embargo, el resultado en Excel difiere del de categoría D con igual velocidad del viento 1.5 m/s, y se aleja aun mas, para una mayor velocidad del viento, o sea a 5/D, ya que como se ha citado, PHAST, hace un ajuste de la velocidad del viento a la altura indicada de la liberación que en este caso es de 1m, la cual ya no corresponde a la que se especificó en la sección de *datos de clima*.

Para este caso 3.3 se sugiere considerar un cambio en la ecuación empleada en el modelo en Excel para el cálculo de la vaporización de charco; se recomienda la ecuación de Mackay y Matsuga, sugerida en la bibliografía (AIChE/CCPS, 2000), ya que esta si incluye la velocidad del viento.

### 3.4 Liberación continua

Considere que se presenta una fuga de gas etano, determinar la concentración en partes por millón (ppm) a 500 m a favor del viento desde la descarga del gas, si se sabe que la liberación ocurre con una rapidez de 0.1 Kg/s. Asumir una temperatura de 298 K, a presión de 1atm, estabilidad F, con una velocidad del viento de 2m/s. La descarga ocurre en un área rural.

#### MODELO EN EXCEL

Para resolver el problema en Excel, es necesario aplicar un modelo de *Liberación continua de un gas*, los datos necesarios para aplicar este modelo son mostrados en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.4.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Flujo másico de liberación	G	0.1	kg/s
Presión	P	1	atm
Peso Molecular	PM	30	kg/kgmol
Temperatura	T	298	K
Distancia en dirección del viento	x	500	m
Dirección transversal al viento	y	0	m
Dirección por arriba del suelo	z	0	m
Altura de la chimenea	H	1	m

#### MODELO EN PHAST

Para efectuar la simulación en PHAST, es necesario proporcionar los datos de entrada apropiados, tal como se muestra en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	70	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	

Continuación de la tabla 3.11

Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	2	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Etano	
Fase	Vapor	
Inventario	60	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	
Elevación	1	m
Dirección de la liberación	Horizontal	
Datos del recipiente		
Temperatura	25	° C
Presión	0.01	Bar g
Datos del escenario		
Tipo de escenario	Liberación de 10 min	
Distancia de interés	500	m

La ecuación fundamental para el modelo en Excel se ha presentado como la ecuación 2.28, como puede observarse, esta depende de los coeficientes de dispersión presentados en las tablas A4 y A5 del apéndice A, lo que quiere decir que puede ser resuelta tanto como para condiciones rurales como para condiciones urbanas, los resultados de la concentración en ppm a 500 m desde la liberación en la dirección del viento para condiciones rurales se presenta en la tabla 3.12 y para condiciones urbanas en la tabla 3.13.

Tabla 3.12 Calculo de la concentración en ppm, a 500 m en la dirección del viento para condiciones rurales.

CONDICIONES RURALES							
Clase de estabilidad Pasquill-Guifford	A	B	C	D	E	F	
Velocidad del viento	0.1	0.1	2	3	2	2	m/s
$\sigma_y$	107.35	78.07	53.67	39.04	29.28	19.52	m
$\sigma_z$	100	60	38.14	22.68	13.04	6.96	m
C material liberado	2.97E-06	6.79E-06	1.55E-05	3.59E-05	8.31E-05	2.32E-04	kg/m <sup>3</sup>
C material liberado	2.42	5.54	12.67	29.28	67.75	189.13	ppm

Tabla 3.13 Calculo de la concentración en ppm, a 500 m en la dirección del viento para condiciones urbanas.

CONDICIONES URBANAS					
Clase de estabilidad Pasquill-Gifford	A-B	C	D	E-F	
Velocidad del viento	0.1	2	3	2	m/s
$\sigma_y$	146.06	100.42	73.03	50.21	m
$\sigma_z$	195.96	100.00	65.28	30.24	m
C material liberado	1.11E-06	3.17E-06	6.68E-06	2.10E-05	kg/m <sup>3</sup>
C material liberado	0.91	2.58	5.44	17.08	ppm

Los resultados obtenidos en PHAST se presentan en la tabla 3.14, donde para las estabilidad 3/D y la 1 A/B se presentan dos resultados de valores cercanos a 500m, que es la distancia requerida.

Tabla 3.14 Resultados de la concentración con diversas condiciones climáticas obtenidos en PHAST, caso 3.4.

Clima	Distancia a favor del viento (m)	Concentración (ppm)
2/F	502.10	271.02
3/D	493.70	21.65
	593.70	15.28
1 A/B	479.90	7.97
	579.90	5.50

Dado que la concentración en ppm, a una distancia determinada depende además de la condición del clima, de la dirección de la descarga (horizontal, vertical o ángulo en alguna dirección) y de la presión especificada en las condiciones del proceso, se realizó otra simulación empleando los datos iniciales para mostrar la dependencia de estas variables y obtener la concentración en la nube. Los parámetros modificados se presentan en la tabla 3.15, los parámetros que no aparecen en esta tabla se conservaron idénticos a los mostrados en la tabla 3.11.

Tabla 3.15 Parámetros modificados de la simulación 1, del caso 3.4.

Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dirección de la liberación	Ángulo de la horizontal = 9 °	
Datos del recipiente		
Presión	1.013	Bar g

Los resultados obtenidos de la simulación de acuerdo a los parámetros definidos en tabla 3.15, se resumen en la tabla 3.16, donde una vez más se presentan los valores más cercanos a la distancia de 500 m, que nos proporciona PHAST.

Los resultados obtenidos, tanto de la simulación en PHAST, como del modelo desarrollado en Excel, de interés para este caso se muestran en la tabla 3.17, también se incluye en la tabla la simulación 2 en PHAST, pero debe quedar claro que esta fue realizada solo de modo ilustrativo para mostrar la influencia sobre la dispersión, de los parámetros descritos en la tabla 3.15.

Tabla 3.16 Resultados obtenidos en PHAST para diversas condiciones de estabilidad, con datos de entrada descritos en la tabla 3.15.

Condición de estabilidad	Distancia	Concentración
	m	ppm
2/F	498.36	96.66
	523.96	90.85
3/D	499.97	16.37
1 A/B	482.38	10.05
	533.58	8.03

### Análisis de resultados

Para el modelo fuente en PHAST, no es posible especificar la descarga liberada de 0.1 Kg/s por lo cual se asume un inventario de 60 Kg y una liberación de 10 min. Además en PHAST no es posible de elegir entre condiciones rurales o urbanas. El modelo de dispersión de PHAST, *UDM*, presenta como característica particular que siempre al iniciar los cálculos de la concentración sobre la línea central de la nube, en la dirección del viento, considera una concentración de 1,000,000 de ppm en el punto de la liberación, independientemente de la sustancia, cantidad liberada, altura de la liberación, o tipo de liberación (instantánea o continua), por ello este perfil predefinido no suele ser muy adecuado cuando se estiman concentraciones en el punto de la liberación.

Tabla 3.17 Cuadro comparativo de los resultados obtenidos en PHAST y en Excel para el clima especificado 2/F, caso 3.4.

Resultados calculados		Excel		PHAST	
		Rural	Urbano	Simulación 1	Simulación 2
Distancia a favor del viento	m	500	500	502.10	498.36
Concentración	ppm	189.13	17.08	271.02	96.66

A partir de los resultados en Excel se observa que las concentración calculada para la condición rural está por encima de la urbana, en vista de esto, los resultados de PHAST (simulación 1) se asemejan más a los de Excel para condiciones rurales y, sin embargo, las predichas por PHAST están por encima de las predichas por Excel; la predicción de valores superiores de concentraciones o conservadores nos da un margen de seguridad más amplio; siendo el etano una sustancia inflamable, supongamos que para este caso el valor de concentración predicho por PHAST fuera el límite en que la nube se inflama, y el analista indica que la concentración a 500m es de 189.13 (Valor proporcionado por el modelo en Excel), las personas que se encuentran a 500m pensarán que se encuentran en un área segura, y quedaran expuestas a un daño.

Sin embargo, para etano su límite inferior de inflamabilidad (LFL) es de 2.9E4 ppm. Para este caso la diferencia de concentración es de 81.89 ppm a 500m de distancia; así que, a 500m ni el modelo en Excel ni el modelo PHAST, indican que exista aún un peligro de que se incendie la nube, y con base en este LFL, podemos considerar que esta diferencia de concentración es prácticamente despreciable

### 3.5 Liberación instantánea (Puff)

Un estudio indica que, como resultado de un accidente en una industria que maneja etano, fueron liberados 50 Kg de este gas instantáneamente. La liberación ocurre a un metro de altura sobre el suelo. El límite de la planta está localizado a 500 m de la descarga.

- Determinar el tiempo requerido, después de la descarga, desde la liberación hasta alcanzar el límite de la planta.
- Determinar la concentración en ppm a la distancia de 500m en la dirección del viento.

#### MODELO EN EXCEL

Para la resolución del problema, en Excel es necesario especificar algunos datos de entrada, tales datos se muestran en la tabla 3.18.

Tabla 3.18 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.5.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Masa total de la descarga	G	50	Kg
Peso molecular del gas	PM	30	g/mol
Temperatura ambiente	T	298	K
Presión ambiente	P	1	Atm
Altura de la descarga	H	1	m
Distancia a favor del viento	x	500	m
Distancia en contra del viento	y	0	m
Distancia por encima del suelo	z	0	m
Constante de los gases	Rg	0.08206	L·atm/mol·K
Concentración de interés	Cs	1	ppm

#### MODELO EN PHAST

Para efectuar la simulación en PHAST, el modelo fuente seleccionado es el de tanque/tubería, y los datos requeridos para emplearlo se muestran en la tabla 3.19; también se muestran los parámetros predefinidos que han sido modificados para este caso.

Tabla 3.19 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, caso 3.5.

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	26	° C
Humedad relativa	60	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	

Continuación de la tabla 3.19...

Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Etano	
Fase	Vapor	
Inventario	50	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Elevación de la descarga	1	m
Tipo de superficie	Concreto	
Datos del recipiente		
Temperatura	26	° C
Presión	0.01	Bar g
Datos del escenario		
Escenario	Ruptura catastrófica	
Distancia de interés	50	m
Concentración de interés	1	ppm

Los resultados obtenidos en Excel al igual que en PHAST, no solo se limitan a tiempo y concentración en la línea central en la dirección del viento a una determinada distancia, pueden ser también el espesor de la nube y la concentración de la nube en la dirección perpendicular a la dirección del viento; otros parámetros de importancia calculados por PHAST son la temperatura, espesor, radio, altura y fracción de líquido en la nube, entre otros. Sin embargo, los resultados más significativos de interés para el problema se muestran en la tabla 3.20.

Tabla 3.20 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.

Resultados calculados		PHAST	Excel
Distancia	m	493.63	500
Tiempo	s	677.18	333.33
Concentración	ppm	1,850.0	57,040.8

#### Análisis de resultados

La dispersión, es un modelo que resulta delicado comparar, pues como se ha indicado en la teoría, el modelo PHAST, no responde a ninguno de los existentes en la literatura, y las diferencias con el empleado en Excel son notorias. Pese a ello se tratará de hacer una comparación práctica de los resultados. Nótese entonces que, si nos guiamos por el modelo en PHAST, diremos que a la distancia de 500m la nube ha perdido su peligrosidad, dado que la concentración está por debajo del límite inferior de inflamabilidad (LFL) del etano, el cual es de 29,000 ppm; sin embargo, con base en el modelo en Excel la sustancia es altamente inflamable pues se encuentra sobre el LFL y debajo del UFL (Límite superior de inflamabilidad) el cual es 130,000 ppm.

El tiempo que tarda en dispersarse una nube es también un parámetro importante porque permite saber cuanto tiempo tienen las personas para ponerse a salvo del peligro. PHAST, indica que el tiempo en que la nube alcanzará el límite de la planta es 343.83s mayor de lo indicado por Excel. El resultado de PHAST, respecto al tiempo que le toma a la nube dispersarse puede observarse en la figura 3.3, donde es claro además de acuerdo a PHAST, que la nube ha perdido su peligrosidad.

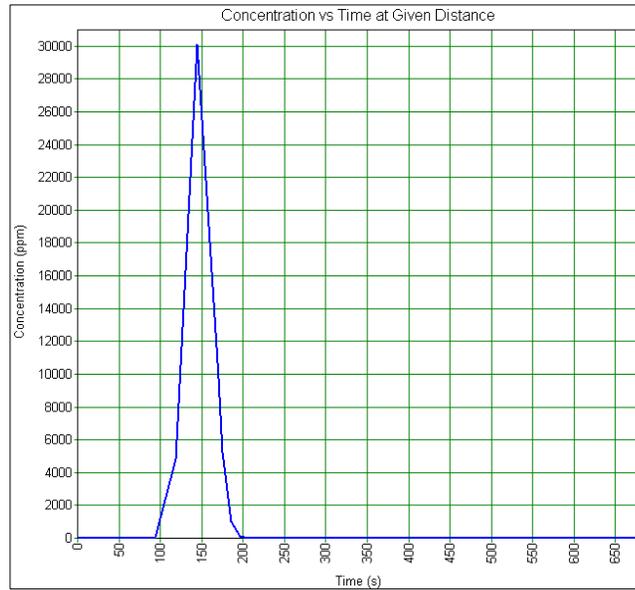


Figura 3.3 Concentración en ppm en función del tiempo (s) que le toma a la nube dispersarse en la dirección del viento para una estabilidad de clima de 1.5/F, obtenido de PHAST. Ejemplo 3.5.

### 3.6 Equivalencia TNT.

Considere la explosión de una nube de vapor de 10 toneladas cortas de propano, usando el modelo de equivalencia de TNT, calcular la distancia desde la explosión a la cual se alcanza una sobrepresión de 5 psi, suponga que la eficiencia de explosión es del 5%.

#### MODELO EN EXCEL

Para la resolución del modelo en Excel, *distancia a una sobrepresión especificada*, se muestran en la tabla 3.21, las variables de entrada necesarias para calcular a qué distancia, la sobrepresión generada por la onda de explosión será de 5 psi.

Tabla 3.21 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.6, cuando se desconoce la distancia a una sobrepresión generada.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Calor de combustión del TNT	$E_{TNT}$	4.652E+03	kJ/kg
Presión atmosférica	$P_a$	14.7	psi
Eficiencia de explosión empírica	$\eta$	0.05	SU
Masa del gas	$M$	9072	kg
Calor de combustión del gas	$E_c$	4.64E+04	kJ/kg
Sobrepresión generada	$P_o$	5	psi

#### MODELO EN PHAST

En PHAST, es posible obtener resultados para una explosión de nube de vapor empleando el modelo fuente de tanque/tubería, siempre que la sustancia especificada sea explosiva, o bien hacer uso del modelo separado; en este caso, en función de los datos proporcionados por el problema se ha considerado más adecuado el uso del modelo separado, los datos de entrada para simular el escenario de riesgo se muestran en la tabla 3.22.

Tabla 3.22 Datos de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST.

Modelo fuente	Explosión TNT	
Condiciones atmosféricas		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	50	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Propano	
Datos del escenario		
Masa inflamable en la nube	9072	Kg
Eficiencia de la explosión	5	%
Sitio donde ocurre la explosión	En Aire	

Los resultados obtenidos a partir del modelo en Excel de *distancia a una sobrepresión especificada*, pueden ser a la vez datos de entrada para el modelo en Excel, *sobrepresión a una distancia especificada*, estos datos se muestran en la tabla 3.23.

Tabla 3.23 Resultados del modelo en Excel, *distancia a una sobrepresión dada*.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Sobrepresión escalada	$P_s$	0.3401	SU
Parámetro distancia/masa	Z	5.7	$m/kg^{1/3}$
Masa equivalente de TNT	W	4519.8968	kg
Distancia de sobrepresión	R	94.2434	m

De la tabla 3.23 son especialmente importantes el resultado de masa equivalente de TNT, y la distancia de sobrepresión, cuando se desea calcular el impulso, duración de la explosión y tiempo de llegada de la onda de sobrepresión a la distancia especificada; estos parámetros que describen más ampliamente una onda de explosión fueron calculados en un modelo en Excel, *sobrepresión a una distancia dada*, y se muestran en la tabla 3.24.

Tabla 3.24 Resultados del modelo en Excel cuando se desconoce la sobrepresión a una distancia dada.

Resultados calculados	Símbolo	Valor	Unidades
Distancia ajustada por Kg de TNT	Z	5.7	$(m/kg)^{1/3}$
Sobrepresión	$P_0$	34.54	kPa
Sobrepresión	$P_0$	5	PSI
Impulso de explosión ajustada	$i_p$	52.6612	$Pa*s/(kg\ TNT)^3$
Impulso de explosión real	$i_p$	870.6982	$Pa*s$

Continuación de la tabla 3.24...

Tiempo de duración ajustada	$t_d$	3.9758	$\text{ms}/(\text{kg TNT})^3$
Tiempo de duración real	$t_d$	65.7349	ms
Tiempo de llegada ajustada	$t_a$	10.0456	$\text{ms}/(\text{kg TNT})^3$
Tiempo de llegada real	$t_a$	166.0927	ms

En la tabla 3.25 se resumen los resultados más significativos obtenidos en Excel, y se comparan con los obtenidos en PHAST; nótese que en PHAST no es posible obtener el impulso, duración y tiempo de llegada de la onda de una explosión de nube de vapor si se usa el modelo de TNT.

Tabla 3.25 Resultados más significativos para el caso 3.6.

Resultados calculados		Excel	PHAST
Sobrepresión	Bar	0.34	0.34
Distancia	M	94.2	81
Impulso	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	870.69	NC
Duración	Ms	65.7349	NC
Tiempo de llegada	Ms	166.09	NC

#### Análisis de resultados

Los niveles de sobrepresión son importantes debido a los daños que suelen causar a las personas y a las estructuras; para este caso particular, de acuerdo a la tabla A7, del apéndice A, que refiere al daño estimado por efectos de sobrepresión de una onda de explosión, una sobrepresión de 5 psi (sobrepresión considerablemente alta, tomando en cuenta que la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, en su guía para la evaluación de estudios de riesgo indica que a una sobrepresión de más de 1 psi, es zona de alto riesgo) es suficiente para causar una destrucción casi completa de casas, de acuerdo con PHAST en un radio de 81m; debajo del valor estimado por en el modelo en Excel de 94.2m. Esto representa una diferencia de 13.2m en el radio, lo cual en una planta industrial es significativo, cuando se tratan de establecer los radios de seguridad para las personas; resulta más seguro que el analista, seleccione el radio más amplio (modelo en Excel) para señalar que todo lo que este dentro de este, se encuentra sometido a un riesgo mayor.

Con base a los resultados mostrados, el modelo de TNT desarrollado en Excel, es mejor porque proporciona otros resultados que no incluye PHAST, y estos son de gran importancia cuando se estudia a la onda de sobrepresión y sus efectos sobre las personas y las estructuras. Una de las ventajas de usar PHAST, está en que se pueden obtener gráficas sin esfuerzo adicional; obsérvese para este caso la figura 3.4, que muestra la sobrepresión generada en función de la distancia; una gráfica de este tipo mediante Excel es posible, pero implica un consumo mayor de tiempo, dado que exige la ejecución del modelo de forma repetida.

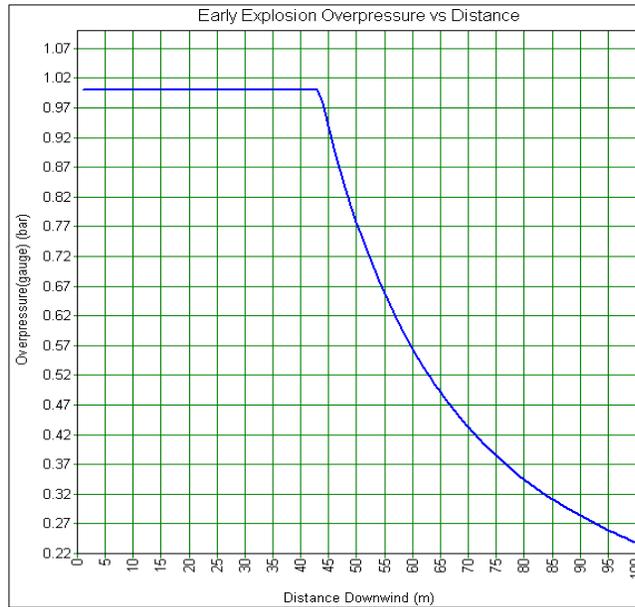


Figura 3.4 Sobrepresión generada por la explosión de una nube de vapor de propano en función de la distancia, empleando un modelo TNT.

### 3.7 Métodos TNO y Baker–Strehlow

Considerar la explosión de la nube de vapor aire-propano, confinados dentro de un tanque de almacenamiento. El tanque es soportado 1 metro sobre el suelo por pilas de concreto. Asumir un volumen de la nube de 2094 m<sup>3</sup>, confinados por debajo del tanque, representando el volumen bajo el tanque. Determinar la sobrepresión como una función de la distancia de la explosión igual a 36m usando:

- El método TNO Multi-energía
- El método Baker-Strehlow

#### MODELO EN EXCEL

Para encontrar la sobrepresión de una onda generada por la explosión de una nube de vapor, se han descrito tres modelos diferentes en la literatura, el primero de ellos se mostró en el problema anterior, y en este se pretende mostrar la comparación de los métodos de TNO y Baker. Para el desarrollo del modelo de TNO se muestran en la tabla 3.26, las variables de entrada del modelo; y en la tabla 3.27, se definen las variables de entrada para la resolución del problema planteado, mediante el modelo de Baker-Strehlow.

Tabla 3.26 Datos de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.7, método de TNO.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Distancia de reserva	$R_R$	30	m
Velocidad del sonido en el ambiente	$v$	344	m/s
Presión ambiental	$P_0$	101325	Pa
Volumen de la nube	$V_n$	2094	m <sup>3</sup>
Calor de combustión	$E$	3.50E+06	J/m <sup>3</sup>
Grado de confinamiento		7	SU
Volumen de la nube	$V$	2094	m <sup>3</sup>

Tabla 3.27 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.7, método de Baker-Strehlow.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Distancia de reserva	$R_R$	30	m
Energía de explosión	E	1.46E+10	MJ
Presión ambiente	$P_0$	101325	Pa
Velocidad del sonido en el ambiente	V	344	m/s

**MODELO PHAST**

La tabla 3.28, muestra los datos de entrada proporcionados en PHAST, a los modelos separados para el estudio del problema citado. Nótese que en PHAST, es posible seleccionar el modelo de tubería/tanque, y siempre que la sustancia se explosiva el software empleará alguno de los modelos de explosión de nube de vapor, para predecir resultados de sobrepresión a una distancia dada.

Tabla 3.28 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.7 incisos (a) y (b).

Modelo fuente			Explosión Multi-Energía			Modelo fuente			Explosión Baker-Strehlow		
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación						Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación					
Temperatura ambiente			25	° C		Temperatura ambiente			25	° C	
Humedad relativa			50	%		Humedad relativa			50	%	
Presión atmosférica			1.013	Bar		Presión atmosférica			1.013	Bar	
Radiación solar			0.5			Radiación solar			0.5		
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa						Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa					
Condición			Estable			Condición			Estable		
Velocidad del viento			1.5	m/s		Velocidad del viento			1.5	m/s	
Estabilidad Pasquill			F			Estabilidad Pasquill			F		
Sustancia peligrosa bajo estudio						Sustancia peligrosa bajo estudio					
Material			Propano			Material			Propano		
Datos del escenario						Datos del escenario					
Masa inflamable en la nube			1.03E+06	Kg		Masa inflamable en la nube			9072	Kg	
Distancia mínima de interés			10	m		Eficiencia de la explosión			5	%	
Distancia máxima de interés			100	m		Explosión aire/suelo			En suelo		
Tamaño del paso para la distancia			1	m		Tamaño del paso para la distancia			1	m	
Fuerza de confinamiento			7			Distancia mínima de interés			10	m	
Volumen confinado			2094	$m^3$		Distancia máxima de interés			100	m	
						Factor de reflexión			2		
						Reactividad del material			Media		
						Expansión de la flama			1D		
						Densidad de obstáculo			Baja		

El modelo predeterminado que emplea PHAST, suele ser el de TNT, sin embargo, si el usuario lo desea puede cambiarlo, seleccionando sea, el modelo de TNO o el modelo de Baker-Strehlow. Sin embargo cuando el usuario, tiene claramente definido que modelo desea estudiar, se puede hacer uso de los modelos separados como en este caso.

A partir de la simulación en PHAST, y la ejecución de los modelos en Excel, se obtuvieron diversos resultados de los cuales los más significativos se presentan en la tabla 3.29.

Tabla 3.29 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.

Multi- Energía			Baker - Strehlow		
Resultados calculados	Excel	PHAST	Resultados calculados	Excel	PHAST
Distancia (m)	30	30			
Energía total confinada (MJ)	7329	7566.79	Energía total confinada (MJ)	14,600.00*	7,644.90
Sobrepresión (PSI)	11.04	10.44	Sobrepresión (PSI)	8.99	8.845
Duración (msec)	32.408	40	Impulso específico (kPa-ms)	955.378	661.58

Nota:\*La energía de confinamiento es el doble dado que, considera en el cálculo el factor de reflexión de la tierra.

### Análisis de resultados

Dado que es una explosión localizada en tierra, se fijo el factor de reflexión de la tierra igual a 2, (Para el modelo de Baker-Strehlow, la energía de confinamiento es el doble respecto al modelo de TNO, debida a la reflexión del suelo). Para una explosión localizada en altura, en el aire, se deberá fijar el factor igual a uno, entonces la energía de ignición no será modificada por el suelo. Se puede observar a través de diversas simulaciones que entre más alta sea la densidad de obstáculos, más grande la sobrepresión.

El modelo TNO Multi-Energía es altamente dependiente del nivel de congestión y no del nivel de combustible presente en la nube. En el modelo de Baker la turbulencia es la causa principal de explosión.

De los resultados obtenidos se observa que la sobrepresión estimada por el método de Baker suele ser menor que la estimada por el método de TNO Multi-Energía, en ambos métodos se observa que los modelos en Excel dan resultados ligeramente por encima de los calculados por PHAST. Para los rangos de sobrepresiones se observa que de acuerdo con la tabla A7 del apéndice, existirá probable destrucción total de edificios, máquinas, herramientas pesadas (7,000 lb) desplazadas y dañadas seriamente, herramientas para maquinaria muy pesadas (12,000 lb) se estima pueden mantenerse sin daño.

En PHAST, es posible obtener gráficamente los resultados de sobrepresión y de impulso en función de la distancia, tanto por el método de TNO como por el de Baker-Strehlow. La figura 3.5 muestra la sobrepresión en función de la distancia mediante el método de TNO, la figura 3.6 muestra la duración del impulso en función de la distancia mediante el método de TNO.

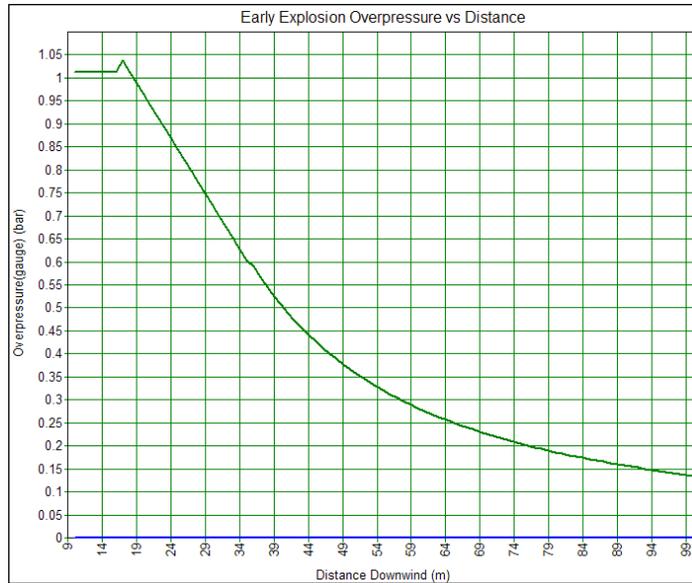


Figura 3.5 Gráfico de la sobrepresión en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método TNO Multi energía.

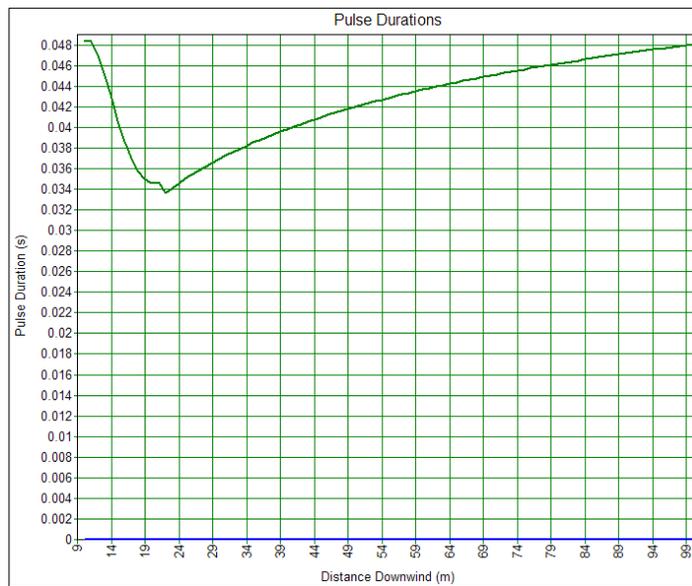


Figura 3.6 Gráfico de la duración del impulso en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método TNO Multi-Energía.

La figura 3.7 muestra la sobrepresión en función de la distancia obtenida en PHAST mediante el método de Baker-Strhlow, y en la figura 3.8 se muestra la duración del impulso en función de la distancia por este método; todos los resultados presentados para el problema 3.7, corresponden a una categoría de estabilidad de clima de 1.5/F. Gráficos de esta naturaleza, pudieran ser creados en Excel, si se ejecuta el modelo para cada distancia deseada.

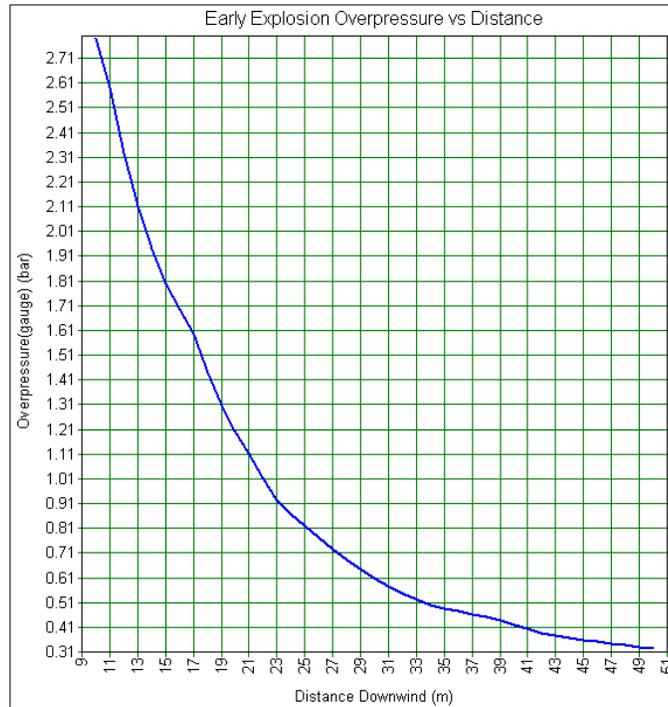


Figura 3.7 Gráfico de la sobrepresión en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método de Baker-Strehlow.

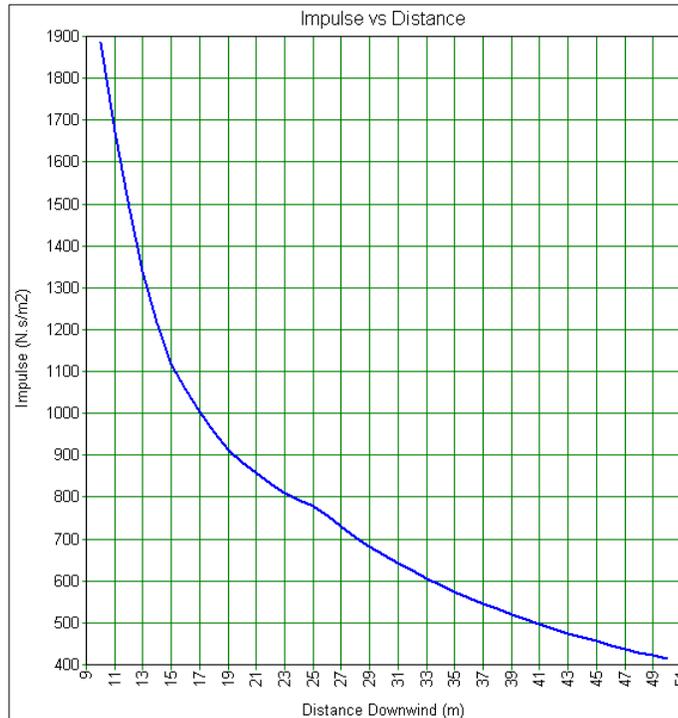


Figura 3.8 Gráfico de la duración del impulso en función de la distancia para una categoría de 1.5/F para el método de Baker-Strehlow.

### 3.8 BLEVE (Flujo térmico)

Calcular el tamaño, duración, y flujo térmico a 200m de distancia de una BLEVE de un tanque aislado de 100,000kg (200 m<sup>3</sup>) de propano a 20 °C, 8.2 bar abs (68 °F, 120 psia), si la humedad atmosférica corresponde a la presión parcial del agua de 2810 N/m<sup>2</sup> (0.4 psi). Asumir un calor de combustión de 46,350 KJ/Kg.

#### MODELO EN EXCEL

Para la resolución del problema, se hace uso de un modelo de *flujo térmico generado por una BLEVE*, para el cual las variables de entrada se muestran en la tabla 3.30.

Tabla 3.30 Variables de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.8.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Masa inicial	M	100000	kg
Presión parcial del agua en aire	P <sub>w</sub>	2810	Pa
Fración de radiación de combustión	R	0.3	SU
Distancia del centro de la bola de fuego al receptor	L	200	m
Calor de combustión	H <sub>c</sub>	46350	kJ/kg

#### MODELO EN PHAST

Para efectuar la simulación en PHAST, es necesario proporcionar los datos de entrada apropiados, tal como se muestra en la tabla 3.31; nótese que el modelo fuente empleado para esta simulación de acuerdo a los datos proporcionados es el de tanque/tubería, sin embargo se puede considerar la posibilidad de seleccionar el modelo directo de BLEVE, en función de los datos de entrada.

Tabla 3.31 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.8.

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	20	° C
Humedad relativa	64.13	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Propano	
Fase	Líquido	
Inventario	100,000	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	

Continuación de la tabla 3.31...

Datos del recipiente		
Temperatura	20	° C
Presión	7.18	Bar man
Datos del escenario		
Tipo de escenario	Ruptura catastrófica	

Los resultados de interés al problema 3.8 obtenidos, tanto de la simulación en PHAST como del modelo desarrollado en Excel, se muestran en la tabla 3.32.

Tabla 3.32 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel

Resultados Calculados	Excel	PHAST
Radio de bola de fuego (m)	134.6	134.09
Duración de la combustión (s)	17.7	17.71
Altura del suelo al centro de la bola de fuego (m)	201.9	201.14
Flujo superficial emitido (kW/m <sup>2</sup> )	344.77	269.10
Flujo recibido por el receptor (kW/m <sup>2</sup> )	40.9	50.0
Fracción de Vapor	NC	0.96

#### Análisis de resultados

De los resultados obtenidos y que se muestran en la tabla 3.32, el flujo de radiación recibido por un receptor que se encuentra a 200 m, de acuerdo con el modelo en Excel es de 40.9kW/m<sup>2</sup>, este nivel de radiación es suficiente para causar ampollas en la piel desnuda después de unos segundos, de exposición. Además de acuerdo con la tabla 1.7 proporcionada por el Banco mundial, desde 25 kW/m<sup>2</sup> se tiene la energía suficiente para encender madera en exposiciones largas. El modelo en PHAST, indica que la radiación es de 50kW/m<sup>2</sup>, obsérvese la figura 3.9, de acuerdo con la tabla 1.7 desde que se excede una intensidad de radiación de 37.5 kW/m<sup>2</sup> podría causarse daño a equipo de proceso. Nótese que el resultado del flujo recibido por el receptor que se encuentra a 200m ha sido estimado con el ecuación 2.52 del capítulo II, y que donde se cita esta ecuación se citan otras ecuaciones empíricas para estimar el flujo térmico recibido por un receptor a una distancia especificada.

Nótese que existe una diferencia importante de 21.7 kW/m<sup>2</sup>, entre el resultado PHAST y el resultado Excel para el flujo térmico recibido por un receptor, lo cual influye al momento en que el analista debe establecer los radios de afectación por radiación térmica; con base a los resultados es preferible el dato proporcionado por PHAST, dado que de este modo estamos asegurando que en caso de que ocurriera la BLEVE con las características descritas en el enunciado del problema, las personas y estructuras a 200m sufrirán un grave daño, esto de acuerdo con la tabla 1.7.

La figura 3.10 muestra además a detalle, cuatro niveles de radiación trazados en la dirección del viento y perpendicular a la dirección del viento, este tipo de representación sirve para identificar las zonas peligro y las de seguridad existente en una planta. De acuerdo con la *guía para la elaboración del estudio de riesgo ambiental* emitido por la subsecretaría de gestión para la protección ambiental de la SEMARNAT,

establece como zona de amortiguamiento un nivel de radiación de  $1.4 \text{ kW/m}^2$  y un nivel de radiación de  $5 \text{ kW/m}^2$  constituye una zona de alto riesgo.

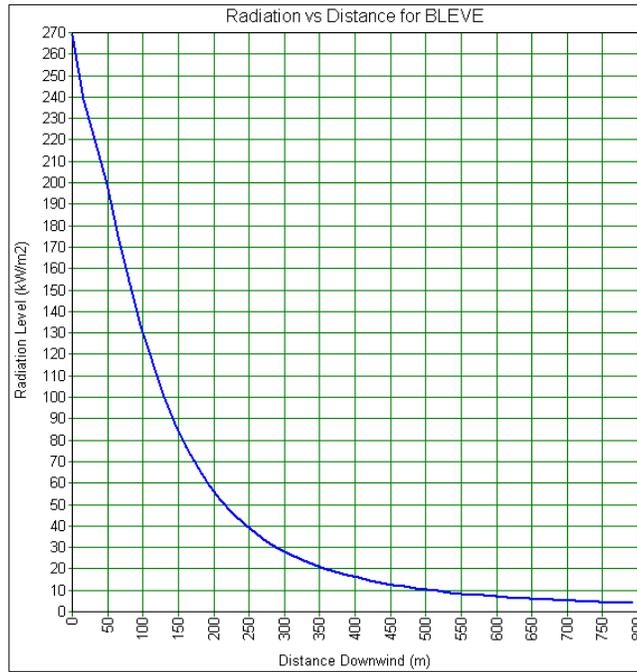


Figura 3.9 Nivel de radiación en  $\text{kW/m}^2$  como una función de la distancia en la dirección del viento para una clase de estabilidad de 1.5/F.

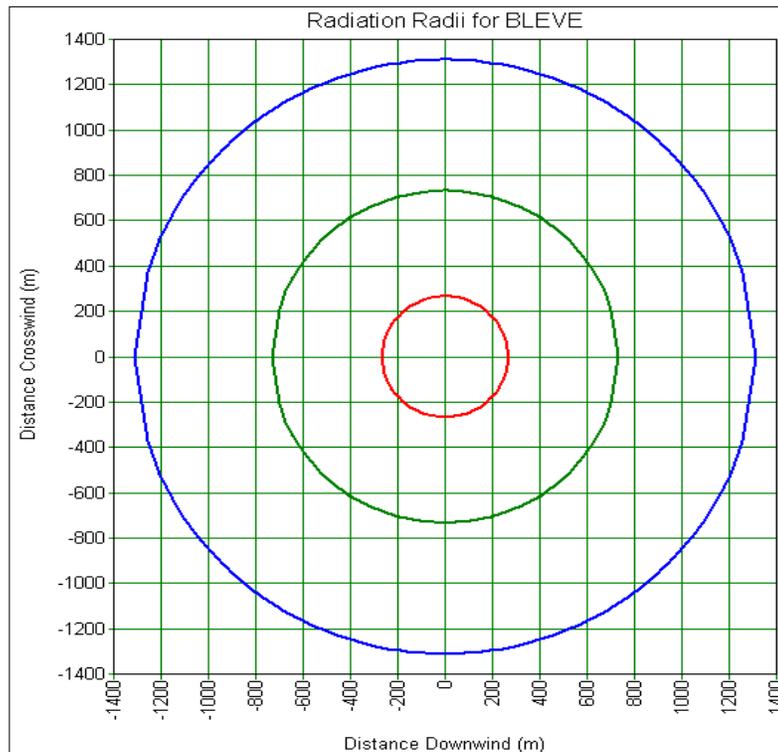


Figura 3.10. Muestra las elipses de radiación, la externa muestra un nivel de radiación de  $1.4 \text{ kW/m}^2$ , la media un nivel de radiación de  $5 \text{ kW/m}^2$  y la interior  $37.5 \text{ kW/m}^2$ . Para una estabilidad 2/F.

Así mismo el diámetro de la bola de fuego, la duración de la combustión y la altura del suelo al centro de la bola de fuego, son valores cercanos, esto debido a la similitud de las ecuaciones. El flujo superficial emitido si tiene un margen de diferencia de  $75.67 \text{ kW/m}^2$ , esto pese a que tanto PHAST como en Excel se hace uso de la misma ecuación (ecuación 2.51, planteada en el capítulo 2), la fracción de calor radiante es un parámetro que origina tales diferencias, mientras que para los modelos en Excel se propone un valor de entre 0.3 y 0.4, en PHAST el cálculo es más detallado, hace uso de la ecuación 3.7.

$$R = 0.27 \left( \frac{P_{Sat}}{10P_{Atm}} \right)^{0.32} \quad 3.7$$

### 3.9 Radiación de un incendio de charco

Considere que un aceite de transformador escapa por ruptura de tubería a un flujo volumétrico de  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Un dique circular con un diámetro de 25m, contiene la fuga. Si el líquido se incendia, estimar el flujo térmico en un receptor a 50m de distancia desde el borde del área del dique. Asumir un día sin viento con 50% de humedad relativa. Estimar el flujo térmico usando la fuente puntual y el modelo sólido de radiación de nube.

#### MODELO EN EXCEL

Para la resolución del problema, se hace uso de un modelo de *incendio en un charco*, para el cual las variables de entrada se muestran en la tabla 3.33.

Tabla 3.33 Datos de entrada para el modelo en Excel para el caso 3.9.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Flujo volumétrico de la fuga	$V_L$	0.1	$\text{m}^3/\text{s}$
Diámetro del dique	D	25	m
Distancia del charco de fuego al receptor	D	50	m
Calor de combustión del líquido	$\Delta H_c$	43,738	kJ/kg
Calor de vaporización	$\Delta H_v$	255.1	kJ/kg
Temperatura de ebullición del líquido	$T_e$	354.6	K
Temperatura ambiente	$T_a$	298	K
Densidad del líquido	P	948.1	$\text{Kg}/\text{m}^3$
Densidad del aire a 20 °C y 1 atm	$\rho_a$	1.2	$\text{Kg}/\text{m}^3$
Constante de la aceleración gravitacional	G	9.81	$\text{m}/\text{s}^2$
Humedad relativa	RH	50	%
Calor específico del líquido	Cp	2.194	kJ/kg-K

#### MODELO EN PHAST

Para efectuar la simulación en PHAST, es necesario proporcionar los datos de entrada necesarios o bien revisar los predefinidos para las condiciones atmosféricas, para el caso en de estudio, como se muestra en la tabla 3.34.

Tabla 3.34 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.9.

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	50	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Nombre	Aceite transformador	
Componente	Fracción mol	
n-Eicosano	0.144	
n-Heneicosano	0.159	
n-Nonadecano	0.13	
n-Octadecano	0.103	
n-Tetracosano	0.255	
n-Tricosano	0.209	
Fase	Líquido	
Inventario	56,886	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	Si	
Diámetro del dique	25	m
Tipo de superficie	Concreto	
Datos del recipiente		
Temperatura	25	° C
Presión	0.34	Bar g
Datos del escenario		
Tipo de escenario	10min de liberación	
Dirección de la fuga	Horizontal	
Elevación de la fuga	1	m

El resultado más significativo cuando se presenta un incendio de charco es flujo térmico que recibe un receptor a una distancia especificada, este resultado se muestran en la tabla 3.35. También se indican en esta tabla, la altura de la flama y el diámetro máximo que el charco pudiera llegar a alcanzar.

Tabla 3.35 Cuadro comparativo de los resultados más significativos para el problema 3.9.

Resultados calculados	Excel		PHAST
	Modelo de fuente puntual	Modelo sólido de radiación de nube.	
Flujo térmico a un receptor (KW/m <sup>2</sup> )	7.47	1.36	3.13
Altura de la flama (m)	45.42		95.38
Diámetro del charco(m)	30.33		10.16

## Análisis de resultados

Los parámetros que definen a la flama producida por un incendio de charco de fuego, son la altura  $a$  y el radio de la flama, para los cálculos en Excel solo existe una metodología para el cálculo de dichos parámetros. Los modelos de fuente puntual y modelo sólido de radiación solo son aplicables para el cálculo del flujo térmico a un receptor.

Existen marcadas diferencias entre los resultados en Excel y PHAST, para la altura de la flama, y sin embargo cabe señalar que la ecuación indicada por PHAST, coincide con la empleada por el modelo en Excel (Ecuación 2.62). La diferencia radica en el cálculo del diámetro del charco.

El nivel de radiación obtenido empleando el modelo sólido de radiación de nube en Excel, cotejado con la tabla 1.7 indica que el nivel de radiación no representa un peligro, dado que un nivel de radiación de hasta  $1.6 \text{ kW/m}^2$  no causará incomodidad por exposición prolongada. Sin embargo, mediante el modelo de fuente puntual en Excel se obtuvo una radiación de  $7.47$ , y como la tabla 1.7, indica que desde  $4 \text{ kW/m}^2$  es suficiente para causar dolor a personal que no se cubra en 20 segundos y es posible la formación de ampollas en la piel (quemaduras de segundo grado), entonces este modelo nos esta indicando que si existe un riesgo.

El modelo en Excel tiene dos posibles métodos para encontrar el flujo térmico que recibirá un receptor, se observa que mediante el modelo de fuente puntual el valor es casi 5.5 veces mayor que el obtenido con el modelo de radiación sólido de nube, el cual es más cercano al valor que proporciona PHAST, presentan una diferencia de  $1.77 \text{ kW/m}^2$ , así puede considerarse que un valor intermedio entre los predichos en Excel por el modelo de fuente puntual y el de radiación sólido de nube, puede ser el adecuado, obsérvese que el resultado de PHAST cae entre estos dos. En la figura 3.11 puede observarse el nivel de radiación en función de la distancia.

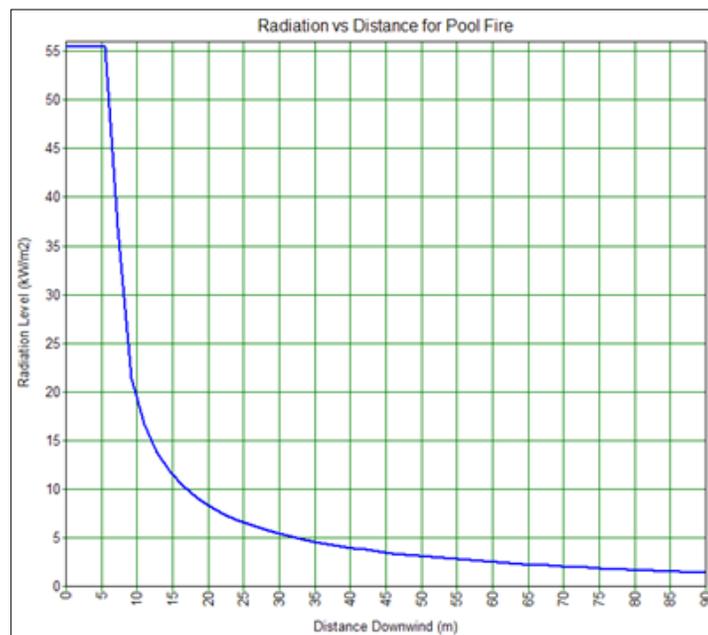


Figura 3.11 Relación del nivel de radiación en función de la distancia, obtenido en PHAST para una categoría 1.5/F, por incendio de un charco en el suelo de aceite de transformador.

Sin embargo, de los resultados proporcionados por PHAST, la altura de la flama pudiera considerarse un resultado fuera de lo que posiblemente pudiera ocurrir en realidad; es por ello que el juicio del analista es muy importante en un análisis de consecuencias.

### 3.10 Flujo radiante para una ráfaga de fuego

Un orificio de 25mm, ocurre en una tubería larga resultando en una fuga de gas metano puro y una flama. El metano esta a presión de 100 bar man. La ruptura ocurre a 2m de distancia de la tierra. Determinar el calor de flujo radiante para un punto en la tierra 15m fuera de la flama resultante. La temperatura ambiente es 298 K y la humedad relativa es 50%.

#### MODELO EN EXCEL

Para resolver el problema en Excel, es necesario aplicar un modelo de *dardo de fuego*, los datos necesarios para aplicar este modelo son mostrados en la tabla 3.36.

Tabla 3.36 Datos de entrada para el modelo en Excel, ejemplo 3.10.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Número de moles de nitrógeno	$\eta N_2$	7.52	gmol
Constante gravitacional	$g_c$	1	kgm/Ns <sup>2</sup>
Constante de los gases	$R_g$	0.0821	m <sup>3</sup> atm/kgmolK
Peso molecular del aire	$PM_a$	29	kg/kgmol
Diámetro de orificio	$d_j$	25	mm
Temperatura de flama	$T_f$	2200	K
Temperatura ambiente	$T_j$	298	K
Peso molecular del combustible	$PM_f$	16	kg/kgmol
Altura sobre el nivel del suelo	$h$	2	m
Presión atmosférica	$P_a$	101325	Pa
Presión del gas	$P$	1.00E+07	Pa
Relación Cp/Cv	$k$	1.32	SU
Punto donde se recibe la radiación	$y$	15	m
Humedad relativa	$H_R$	0.5	Fracción
Fracción de energía convertida	$\eta$	0.2	SU
Energía de combustión	$\Delta H_c$	50000	kJ/kg
Número de moles de combustible	$\eta_f$	1	gmol
Número de moles de oxígeno	$\eta O_2$	2	gmol
Número de moles de CO <sub>2</sub>	$\eta CO_2$	1	gmol
Número de moles de agua	$\eta W$	2	gmol

#### MODELO EN PHAST

Para la simulación en PHAST se ha seleccionado el modelo fuente de tanque/tubería, los datos necesarios requeridos por este modelo se muestran en la tabla 3.37.

Tabla 3.37 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.10.

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	24.85	° C
Humedad relativa	50	%
Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Metano	
Fase	Líquido	
Inventario	1000	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	
Elevación	2	m
Datos del recipiente		
Temperatura	24.85	° C
Presión	100	Bar g
Altura Hidráulica	ND	m
Datos del escenario		
Diámetro de la fuga	25	mm
Dirección de la fuga	Vertical	
Elevación de la fuga	2	m
Sección inflamable		
Forma de la flama	API RP 521	

Nota: ND indica no disponible.

A partir de las simulaciones en PHAST y en Excel se obtuvieron una serie de resultados, los más significativos de acuerdo al enunciado del problema se presentan en la tabla 3.38.

Tabla 3.38 Cuadro comparativo de los resultados más significativos obtenidos en PHAST y en Excel.

Resultados Calculados	Excel	PHAST		
		API	Shell	
Velocidad de descarga del gas	Kg/s	8.368	8.176	8.176
Altura de la flama	m	4.99	25.58	28.76
Flujo térmico a un receptor	kW/m <sup>2</sup>	22.07	6.06	5.01

#### Análisis de resultados

Para este caso de dardo de fuego se observa una gran discrepancia en los resultados obtenidos, especialmente en el flujo térmico a un receptor, estos resultados requieren de consideración pues si nos

basamos enteramente en un resultado PHAST, podríamos estar subestimando las consecuencias pues para una radiación de  $6 \text{ kW/m}^2$ , de acuerdo a la tabla 1.5, se tiene un tiempo de umbral para que una persona sienta dolor de 9 segundos, pero para una intensidad de radiación como la resultante del modelo Excel el tiempo es de 2 segundos.

### 3.11 Porcentaje de fatalidades de una relación fija de concentración-tiempo establecida

El cloro es una sustancia comúnmente empleada en la industria química; suponga que como causa de una liberación accidental de esta sustancia se presenta una exposición a la nube formada durante 20 min. Y que dicha nube presenta una concentración de 400ppm.

#### MODELO EN EXCEL

El modelo en Excel será resuelto mediante una ecuación probit, para lo cual es necesario indicar la concentración y el tiempo de exposición para la sustancia tóxica bajo estudio, estas se muestra en la tabla 3.39.

Tabla 3.39. Variables de entrada para el modelo en Excel para el problema 3.11.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Concentración	C	400	ppm
Tiempo de exposición	Te	20	min

El desarrollo del modelo en Excel requiere además que se especifiquen los valores de las constantes a, b y n a partir de la tabla A10 del apéndice A, dichos valores se muestran en la tabla 3.40.

Tabla 3.40. Valores de las constantes a, b y n para usar en la ecuación probit.

Constante	Valor
a =	-8.29
b =	0.92
n =	2

Una vez calculado el valor del probit,  $Y=5.49$ , con la ecuación 2.78, se transforma este valor de probit en un porcentaje de fatalidades con la tabla A9 del apéndice A, obteniéndose un porcentaje de 69%.

#### MODELADO EN PHAST

Para la resolución del problema en Excel, se hace uso del modelo de tanque/tubería, y como la sustancia es toxica, entonces obtendremos además de los resultados de descarga y dispersión, que proporciona este modelo siempre que es seleccionado, los resultados de probit y porcentaje de fatalidades. Los datos requeridos para efectuar la simulación se muestran en la tabla 3.41.

Tabla 3.41 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, ejemplo 3.11.

Modelo fuente	Tanque/Tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	70	%

Continuación de la tabla 3.41...

Presión atmosférica	1.013	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Cloro	
Fase	Líquido	
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	
Datos del escenario		
Tipo de escenario	Ruptura catastrófica	
Concentración de interés	400	ppm
Tiempo promedio	20	min
Elevación	1	m

A partir de la simulación en PHAST y en Excel se obtienen resultados del número de probit y el porcentaje de fatalidades, mostrados en la tabla 3.42.

Tabla 3.42 Resultados obtenidos de la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.11.

Resultados Calculados	GPQRA	PHAST
Máxima concentración en la nube	400 ppm	NC
Probit	5.49	6.9
Porcentaje de fatalidades	69%	97%

### Análisis de resultados

El número probit y el porcentaje de fatalidades presentan diferencias debidas a que los valores de las constantes a, b y n para la ecuación probit son distintos, en el modelo Excel se hace uso de los citados en el Apéndice A10 (Guarda Costa U.S) y como se indica en la tabla 3.43 los valores de las constantes empleadas por PHAST son distintas. En el cálculo del porcentaje de fatalidades, el error principalmente estriba en el uso de la tabla A9 para la conversión de probit a porcentaje, mientras que PHAST hace uso directo de la ecuación para el cálculo de la probabilidad de muerte.

Tabla 3.43 Valores de las constantes a, b y n para la ecuación Probit empleados por PHAST.

Constante	Valor
a =	-10.1
b =	1.11
n =	1.65

La relación del número probit en función de la distancia en la dirección del viento se muestra en la figura 3.12a, y en la figura 3.12b se muestra la probabilidad de fatalidad en función de la distancia en la dirección del viento, como puede observarse en la figura 3.12b para una distancia dada en la dirección del viento, la probabilidad de muerte es mayor que para personas que se encuentran al aire libre que para las que se encuentran resguardadas en alguna edificación; en la figura 3.12a se observa que el número de probit, es mayor en un área abierta (curva azul), que en un área cerrada; por ello se puede decir que para este caso el riesgo es mayor para las personas que se encuentran al aire libre que para aquellas que se encuentran resguardadas dentro de alguna edificación.

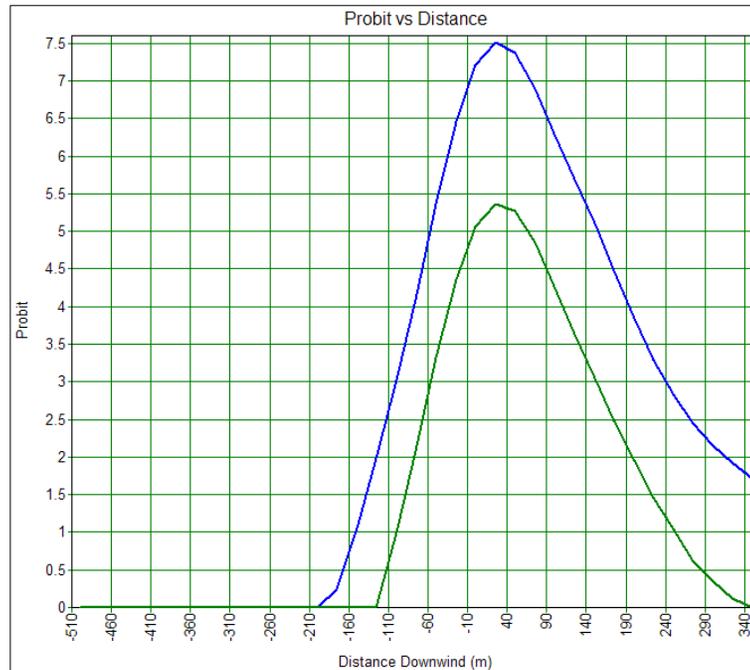


Figura 3.12 (a) Curva de relación de número probit en función de la distancia en la dirección del viento.  
(b) Para una condición de estabilidad 1.5/F.

### 3.12 Fuga de amoniaco

#### Descripción del Accidente

El 13 de abril de 2005 se presentó una fuga de amoniaco, en el municipio de Nanchital, Veracruz, en una línea que va de las instalaciones de Cosoleacaque a la Terminal Marítima de Pajaritos (tramo de 12km). El accidente se suscitó cuando personal de una empresa contratada por PEMEX realizaba labores de mantenimiento y por error seccionaron una línea activa de 10 pulgadas de diámetro a una presión de 12 kg/cm<sup>2</sup> que transportaba amoniaco, en lugar de una línea vacía y lista para su reparación de seis pulgadas de diámetro que transportaba propileno, que se localiza aproximadamente a 1.5m de la línea de amoniaco. El accidente consistió en una liberación de amoniaco, a través de la ruptura total del ducto, se presume que se liberaron 80 toneladas y que la duración de la fuga fue de cuatro horas.

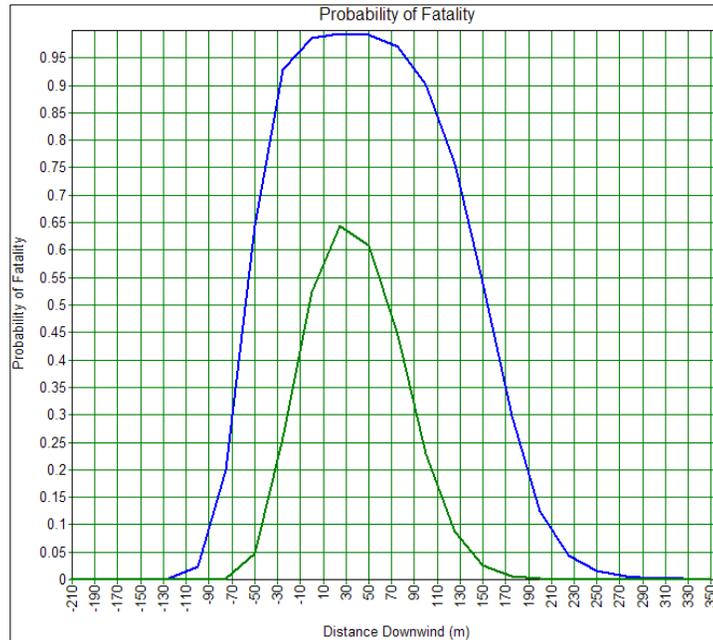


Figura 3.12 (b) Muestra la probabilidad de fatalidad en función de la distancia en la dirección del viento. Para una condición de estabilidad 1.5/F.

El resultado de ésta fuga fue la emisión a la atmósfera de un gran volumen de este peligroso gas, intoxicaciones leves a la población de Veracruz, la muerte de cinco trabajadores y 900 personas evacuadas de tres colonias: Guadalupe, Tepeyac y San Miguel.

El procedimiento que debió seguirse, consiste primero en depresionar la línea a la que se le dará mantenimiento, posteriormente esta se endulza con nitrógeno para que el gas sea inerte y se evite el riesgo de explosiones y así poder manipular la línea.

### MODELO EN EXCEL

Se sabe que el amoníaco en la línea a la presión de  $12 \text{ kg/cm}^2$  y temperatura ambiente ( $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se encuentra en estado líquido, pero en el momento de la ruptura en la línea, la presión cambia súbitamente a la atmosférica ( $1.01 \text{ kg/cm}^2$ ) por lo que el amoníaco líquido se vaporiza.

Por ello se empleó el modelo en Excel de "Descarga de un gas a través de un orificio", para obtener el flujo másico y así calcular el tiempo de descarga; las variables de entrada necesarias para emplear este modelo en Excel, se muestran en la tabla 3.44. Se sabe que la fuga fue a través de una ruptura total de la tubería, sin embargo debe considerarse que debido a la caída de presión que ocurre en el ducto, el flujo másico liberado al inicio será diferente del flujo másico liberado al tiempo  $t$ , donde  $t > 0$ ; así mismo este fenómeno influye en el tiempo total de liberación del inventario de amoníaco en el ducto, por ello, y con base a las recomendaciones del banco mundial, el diámetro del orificio ha sido especificado como el 30% del diámetro de la tubería.

Tabla 3.44 Datos de entrada para el modelo en Excel, *descarga de un gas a través de un orificio*, ejemplo 3.12.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Constante de los gases	$R_g$	8314.47	$m^3.Pa/K.Kgmol$
Capacidad Calorífica específica del gas	K	1.3	SU
Constante gravitacional	$g_c$	1	$kg.m/N.s^2$
Diámetro del orificio	D	0.076	m
Presión antes del orificio	$P_1$	1176798	Pa
Presión en el orificio	$P_2$	101120	Pa
Temperatura	T	301	K
Peso molecular del gas	PM	17.03	kg/kgmol
Pérdidas de fricción en la entrada	$HLF_1$	0.5	SU
Pérdidas de fricción en la salida	$HLF_2$	1	SU
Coefficiente de Descarga	$C_D$	0.85	SU

La *descarga de un gas a través de un orificio* puede ser resuelta mediante un método adiabático o isotérmico, los resultados del modelo en Excel, son los siguientes:

Método Isotérmico  $m = 7.94$  kg/s

Método Adiabático  $m = 7.47$  kg/s

### MODELO EN PHAST

Para simular el escenario de la ruptura de una línea se empleó como modelo fuente el de tanque/tubería, y el escenario de fuga a través de un orificio. La totalidad de datos requeridos por el software se muestran en la tabla 3.45.

Tabla 3.45 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, problema 3.12.

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	27	° C
Humedad relativa	80	%
Presión atmosférica	1.011	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	1.5	m/s
Estabilidad Pasquill	F	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Amoniaco	
Fase	Vapor	
Inventario	80	TON

Continuación de la tabla 3.45...

Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Concreto	
Elevación	0	m
Dirección de la liberación	Horizontal	
Datos del escenario		
Temperatura	27	° C
Presión	10.75	Bar man
Tipo de escenario	Fuga por orificio	
Diámetro del orificio	3	plg

Los resultados más significativos de la descarga estimados con PHAST son los siguientes:

Fracción de líquido	0.02	
Flujo másico	7.61	Kg/s

Nótese que la fracción de líquido es de 0.02, o bien el 99.98% es amoniaco gas. Un resultado similar puede obtenerse con un diagrama de Mollier para las propiedades de amoniaco, donde se lee que a las condiciones del amoniaco en la tubería de 12Kg/cm<sup>2</sup> y 27°C este existe como líquido saturado, tras la liberación súbita se alcanzan condiciones atmosféricas, esto da como resultado, siguiendo una ruta isotérmica, amoniaco en fase vapor únicamente. Este análisis es el que confiere validez al uso del modelo en Excel, *descarga de un gas a través de un orificio*.

#### Análisis de resultados

El amoniaco es un gas venenoso para el ser humano ya que la exposición a niveles altos puede producir irritación y quemaduras serias en la piel y en la boca, la garganta, los pulmones y los ojos. En casos graves, produce edema pulmonar y neumonía, inclusive, puede ser fatal. En casos extremos de exposición a concentraciones altas, se presentan daños severos a los pulmones y efectos cardiovasculares secundarios que provocan convulsiones, coma y finalmente la muerte.

De las simulaciones efectuadas, los resultados de mayor importancia se concentran en la tabla 3.46. La duración de la fuga, es un parámetro importante cuando se presenta la fuga de una sustancia toxica, para estimar el tiempo de la duración de la fuga se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de liberación} = \frac{\text{Inventario (Kg)}}{\text{Flujo másico de liberación (Kg/s)}}$$

Tabla 3.46 Resultados de flujo másico de descarga para la fuga de amoniaco.

MODELO	FLUJO MÁSI DESCARGADO	DURACIÓN DE LA FUGA
Modelo en PHAST	m = 7.61 kg/s	2.96 Hrs
Método Isotérmico	m = 7.94 kg/s	2.84 Hrs
Método Adiabático	m = 7.47 kg/s	3.02 Hrs

Se sabe, a partir de las notas periodísticas, que la liberación duró 4 hrs, aproximadamente. Los resultados aquí presentados por lo tanto presentan un error, este se indica en la tabla 3.47.

Tabla 3.47. Cuadro comparativo del error obtenido respecto a la realidad a partir de las simulaciones.

	Tiempo (Hrs)	% Error
PHAST	2.96	25.91
Excel método isotérmico	2.84	28.9
Excel método adiabático	3.02	24.4

Nótese con base al error estimado respecto a la duración real de la fuga que el método adiabático desarrollado en Excel y el resultado PHAST, es más cercano a la realidad que el resultado estimado en Excel. Además del flujo másico liberado, es conveniente indicar la concentración en partes por millón (ppm) que se alcanzó debido al accidente, para ello se hace uso del modelo en Excel de una liberación continua; con una metodología idéntica a la empleada en el ejemplo 3.4, se puede trazar una curva (Figura 3.13) que muestre la concentración a lo largo de la línea central.

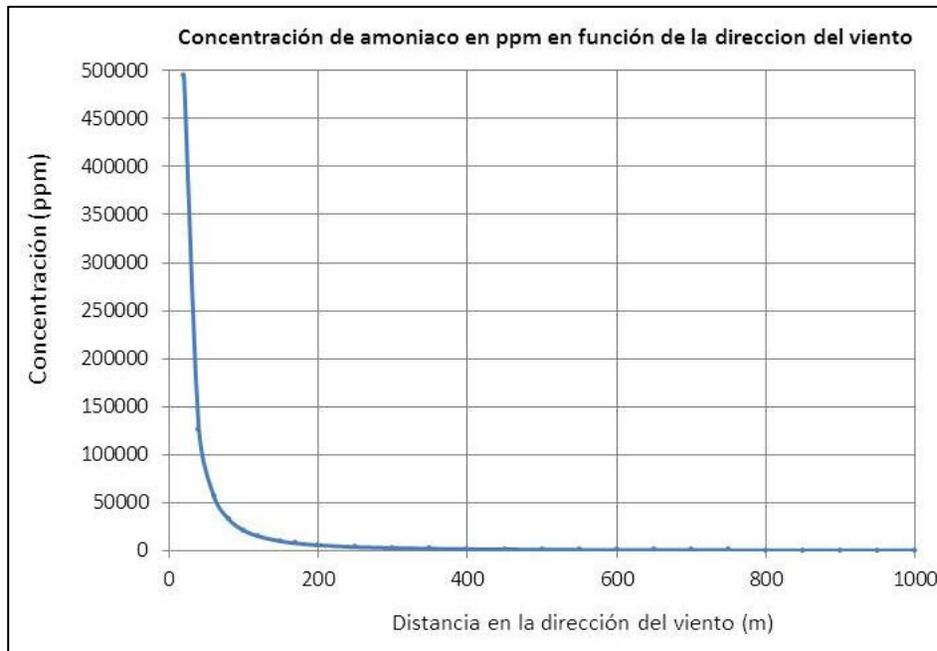


Figura 3.13 Concentración (ppm), en función de la distancia en la dirección del viento (m) para la fuga de amoníaco suscitada en Nanchital, Veracruz, en 2005.

El amoníaco posee un olor muy fuerte y se puede detectar en concentraciones de hasta 50 ppm en el aire, a partir de las cuales se siente fuerte irritación del tracto respiratorio superior; la exposición a 250 ppm es soportable para muchas personas hasta por una hora. Las exposiciones mayores a 500 ppm resultan en quemaduras nasofaríngeas y de la tráquea, obstrucción de las vías respiratorias, acumulación de fluido en los pulmones, afección respiratoria y edema bronquial y alveolar. Exposiciones a concentraciones de 2,500 a 4,500 ppm son fatales en un periodo de 30 minutos; concentraciones de entre 5,000 y 10,000 ppm son letales de forma inmediata.

De acuerdo a dicha figura se puede concluir que personas que estaban a una distancia de 800 m en la dirección del viento se vieron afectadas por una concentración de 500 ppm, como mínimo. Y en una distancia menor a los 200m las personas expuestas según la figura 3.13, quedaron expuestas a una concentración letal. La figura 3.13, se trazó con un modelo en Excel idéntico al desarrollado para el caso 3.4 sobre *liberación continua*, presentado previamente, y empleando las ecuaciones mostradas en la tabla A3 del apéndice A, para el cálculo de los coeficientes de dispersión de Pasquill-Guifford para emisiones continuas, con condiciones urbanas, ya que como se demostró en el caso teórico 3.4, las condiciones urbanas de los modelos en Excel son más factibles de ser comparadas con el modelo de dispersión de PHAST.

Una figura similar a la 3.13, es la 3.14 obtenida del software PHAST, donde se muestra la concentración en ppm en función de la distancia en la dirección del viento.

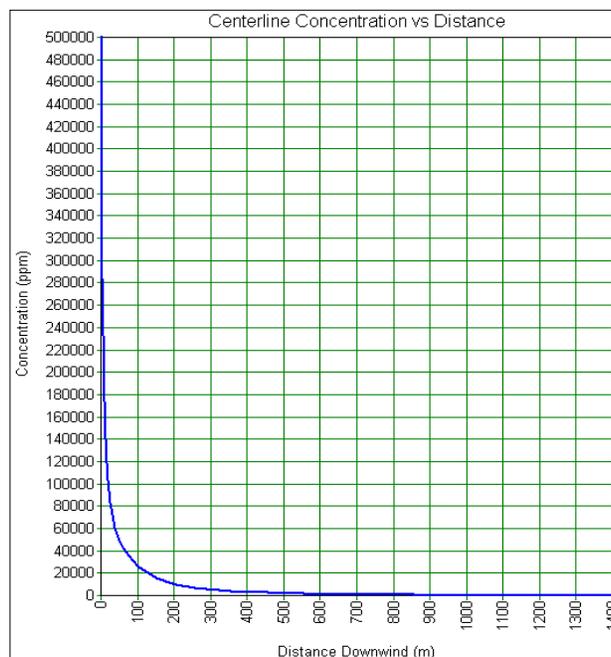


Figura 3.14 Para una categoría 2/D la relación de concentración como una función de la distancia en la dirección del viento.

La figura 3.14, obtenida en PHAST indica que la concentración máxima tolerable en el ambiente (500 ppm) se tiene hasta en 900m en la dirección del viento. En informes emitidos después del accidente, se cita un área de una hectárea que presentan suelo, flora y fauna severamente afectada. Otros informes reportan que el día del accidente el área de afectación era de 5 hectáreas; se sabe que se estableció un cerco de seguridad de 800m en la dirección del viento y 600m en la dirección en contra del viento.

Resulta útil el empleo de un modelo que describa la "Isopleta de la nube" para conocer el área de afectación de ésta fuga, a una concentración de 250 ppm ya que es el límite máximo tolerado en el ambiente hasta por una hora por muchas personas y una concentración o exposición mayor causa severos daños a la salud. La isopleta puede observarse en la figura 3.15. Esta tiene un área de 38,240.6 m<sup>2</sup> (3.82 ha).

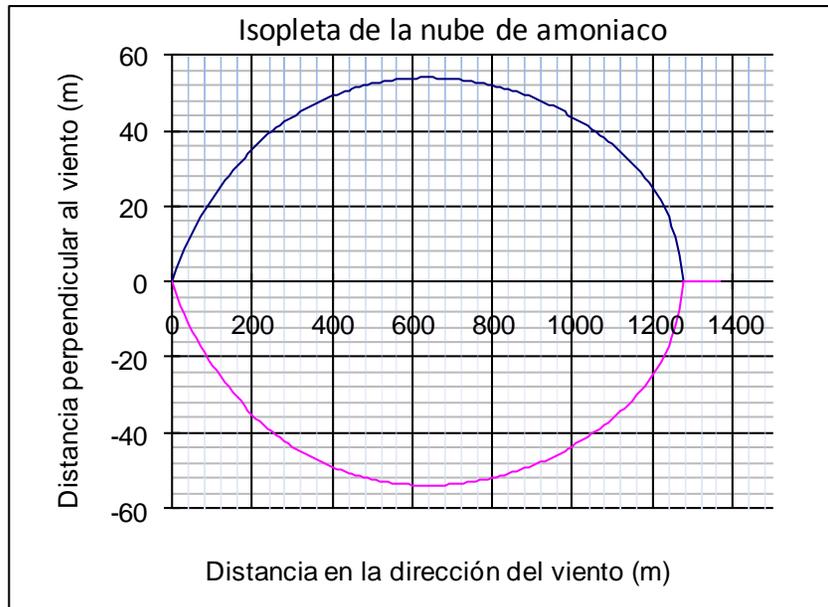


Figura 3.15 Isopleta de la nube formada por la liberación de amoniaco a una concentración de 500 ppm.

PHAST indica que el área afectada es de  $161126\text{m}^2$ , (16.11 Ha) este resultado puede observarse también en la figura 3.16, donde adicionalmente se observan superpuestas tres áreas de afectación para otras tres concentraciones, donde puede apreciarse que el área de mayor riesgo por su alto potencial de inflamabilidad es de  $44\text{m}^2$ .

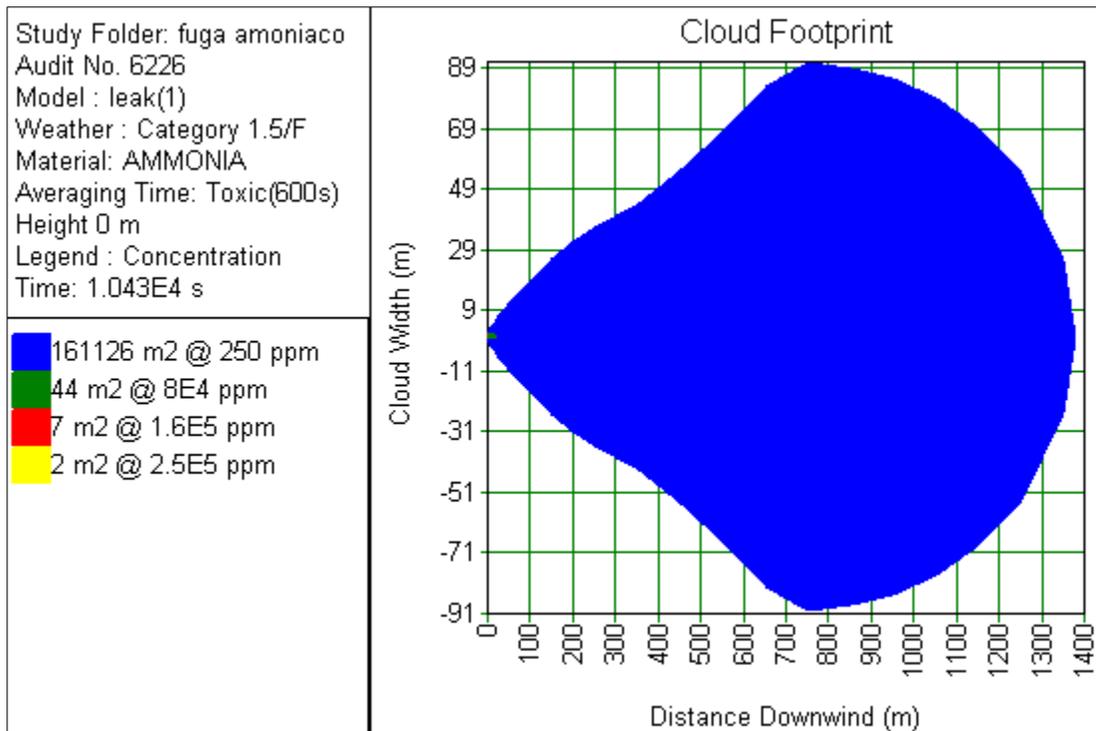


Figura 3.16 Nube formada por la liberación de amoniaco. Estabilidad de categoría 1.5/F.

PHAST, presenta resultados adicionales, como son el reporte probit, y la posibilidad de una explosión retardada. En relación al reporte probit, se muestra en la figura 3.17 la probabilidad de muerte, en función de la distancia en la dirección del viento. El informe oficial indica la muerte de 5 personas, de acuerdo con la curva mostrada en esta figura, a una distancia de 25m, en la dirección del viento, la probabilidad de muerte es del 99% y después decrece.

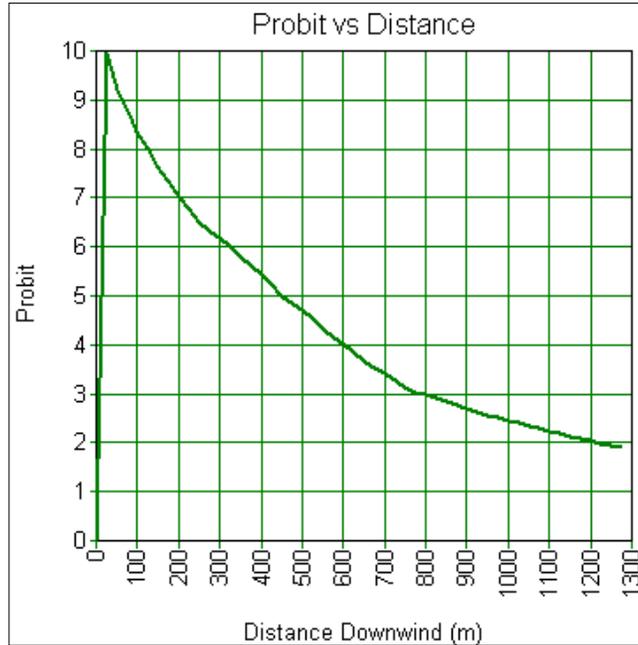


Figura 3.17 Probabilidad de muerte en función de la distancia en la dirección del viento, para la fuga de amoníaco.

### 3.13 Explosión de carro tanque cargado con GLP (*Gas Licuado de Petróleo*)

#### Descripción del accidente

El 11 de agosto de 2005 entre las 15:00 y las 15:30, un estallido cimbró al poblado de Lucio Blanco, a 30 kilómetros de Matamoros, Tamaulipas. El caso enlutó a 8 hogares y llenó de cicatrices imborrables a 56 heridos. La explosión fue producto del irresponsable chofer del tráiler de la empresa de Autotransportes Migar S.A. de C.V. que venía de llenar sus dos tanques en Tergas ubicado en el Km 3+400 de la carretera Rosita–Lucio Blanco del municipio de Matamoros, cruzó las vías del ferrocarril a la altura del poblado Lucio Blanco pretendiendo ganarle la delantera al tren, tras el accidente el conductor salió ileso y huyó.

El evento se produjo cuando un tráiler a exceso de velocidad cargado con 2 pipas con capacidad de 25,000 L de GLP cada una, fue arrollado por un tren al tratar de ganarle el paso a éste. El tren golpeó inicialmente a la cabina y al primer contenedor, contrario a lo que pudiera pensarse, no explotó inmediatamente, sino que, como en cualquier fuga de gas, empezó a salir el combustible y a extenderse por el poblado, en un momento dado, y habiendo transcurrido aproximadamente 20 minutos, el gas fue tocado por alguna chispa y se provocó un flamazo que desencadenó una explosión volando el tanque averiado por los aires y cayendo a 400 metros de distancia de donde había sido alcanzado por el tren, después de unos instantes al consumirse el GLP de la primera y a consecuencia de la explosión, el segundo contenedor explota también debido al calentamiento del tanque.

Se presentó una destrucción total en un radio de 20m del impacto, además de que una de las boyas voló a una distancia de 400m. La explosión afectó hasta 500m a la redonda. De inmediato se presentaron daños muy importantes, la muerte de 2 personas, decenas de heridos que llenaron los hospitales públicos y privados de Matamoros. Migar S.A., la empresa responsable de la pipa pagó 4 millones 650 mil pesos de indemnización.

Con la situación antes descrita se hace una simulación con los modelos planteados a continuación:

### MODELO EN EXCEL

Dado que son dos pipas, para la primera se calculan la cantidad de material fugado a través del orificio de la primera pipa, y los efectos de un dardo de fuego. Para la segunda se analiza el flujo térmico por BLEVE.

Para el análisis de la BLEVE seguida de una bola de fuego, se estima que el calentamiento fue hasta una temperatura de aproximadamente 200 °C, lo que debilita al contenedor y lo hace explotar a unos 25 bar de presión considerada como la presión de fatiga del acero-cisterna, la presión de vapor interna generada por el GLP debido al calentamiento y la acción eficiente de las válvulas de relevo.

El flujo de descarga y el flujo térmico del dardo de fuego que se produjo como consecuencia de la fuga en el primer carro tanque, y que es la causa principal que se produzca la BLEVE, se pueden calcular a partir del modelo en Excel *dardo de fuego*, los datos de entrada se muestran en la tabla 3.48.

Tabla 3.48 Datos de entrada para el modelo en Excel de formación de dardo de fuego por fuga de LPG de pipa.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Coeficiente de descarga	Cd	0.85	
Constante gravitacional	$g_c$	1	kgm/Ns <sup>2</sup>
Constante de los gases	$R_g$	0.0821	m <sup>3</sup> atm/kgmolK
Peso molecular del aire	PM <sub>a</sub>	29	kg/kgmol
Diámetro de orificio	$d_j$	25.4	mm
Temperatura de flama	$T_f$	2200	K
Temperatura ambiente	$T_j$	298	K
Peso molecular del combustible	PM <sub>f</sub>	48.81	kg/kgmol
Altura sobre el nivel del suelo	h	1.5	m
Presión atmosférica	$P_a$	101250	Pa
Presión del gas	P	5E6	Pa
Relación Cp/Cv	k	1.4	SU
Punto donde se recibe la radiación	y	15	m
Humedad relativa	H <sub>R</sub>	0.7	Fracción
Fracción de energía convertida	$\eta$	0.2	SU
Energía de combustión	$\Delta H_c$	46076.62364	kJ/kg
Número de moles de combustible	$\eta_f$	1	gmol
Número de moles de oxígeno	$\eta_{O_2}$	2	gmol
Número de moles de CO2	$\eta_{CO_2}$	1	gmol
Número de moles de agua	$\eta_W$	2	gmol
Número de moles de nitrógeno	$\eta_{N_2}$	7.52	gmol

Los resultados obtenidos de la simulación en Excel, del modelo de *dardo de fuego*, se muestran en la tabla 3.49. Donde el resultado del flujo másico descargado es importante para emplearlo en los modelos de dispersión.

Tabla 3.49 Resultados del modelo en Excel de un dardo de fuego producido por fuga de GLP.

Resultados calculados	Símbolo	Valor	Unidades
Relación L/dj	$R_L/d_j$	120.6	SU
Altura de la flama	L	3.01	m
Área de la fuga	A	0.00049	m <sup>2</sup>
Flujo del combustible	M	7.45	kg/s
Altura de la radiación	R	3.01	m
Longitud de la radiación	X	15.3	m
Factor de visión	Fv	3.4E-4	m <sup>-2</sup>
Transmitancia atmosférica	$\tau_a$	0.790	SU
Presión parcial del agua	$P_w$	2211.9	Pa
Fracción del combustible en la mezcla de combustión	CT	0.095	SU
Radiación recibida	$E_R$	27.70	kW/m <sup>2</sup>

### Modelo de BLEVE

La ejecución del modelo BLEVE en Excel requiere de los datos de entrada mostrados en la tabla 3.50.

Tabla 3.50 Datos de entrada para el modelo en Excel de una BLEVE ocasionada en un tanque de GLP.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Masa inicial	M	10,418	Kg
Presión parcial del agua en aire	$P_w$	2810	Pa
Fracción de radiación de combustión	R	0.3	SU
Distancia	L	200	m
Calor de combustión	Hc	46350	kJ/kg

Los resultados obtenidos del modelo de *BLEVE* en Excel se muestran en la tabla 3.51.

### MODELO EN PHAST

Para llevar a cabo el modelo en PHAST, se debe especificar el inventario, esto se hace mediante las siguientes ecuaciones:

Para calcular el inventario de fuga, se deben conocer el volumen y la densidad del gas LP; considerando que la densidad del GLP es,  $\rho_{GLP} = 520.9 \text{ Kg/m}^3$  el inventario puede estimarse del modo siguiente:

$$inventario = V * \rho = (25m^3) \left( 520.9 \frac{kg}{m^3} \right) = 13,022.5kg$$

Considerando que el tanque en estudio estaba al 80% de su capacidad, el inventario a considerar es de 10,418Kg. Para el primer tanque se modela una fuga de 10 min de duración Para el caso de la simulación

de la fuga los datos de entrada se muestran en la tabla 3.52. Los datos de clima han sido ajustados de acuerdo a lo que ha sido reportado por el INEGI para que los resultados sean más congruentes con los reales.

Tabla 3.51 Resultados en Excel del modelo de BLEVE, que involucra LPG de una pipa.

Datos de entrada	Símbolo	Valor	Unidades
Diámetro máx. de la bola de fuego	$D_{\max}$	126.674572	m
Altura del centro de la bola de fuego	$H_{\text{BLEVE}}$	95.0059288	m
Diámetro inicial a nivel del suelo	$D_{\text{inicial}}$	164.68	m
Flux de radiación emitido	E	292.38	kW/m <sup>2</sup>
Factor de visión	$F_{21}$	0.07391074	SU
Transmitancia	$t_a$	0.62671284	SU
Distancia del centro de la bola al receptor	$X_c$	221.418442	m
La distancia de la superficie de la flama al receptor	$X_s$	158.081156	m
Duración de combustión de la bola de fuego	$t_{\text{BLEVE}}$	9.82819953	S
Flux de radiación recibido	$E_r$	13.54	W/m <sup>2</sup>

Tabla 3.52 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, para la fuga de GLP

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	70	%
Presión atmosférica	1.0125	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	6.5	m/s
Estabilidad Pasquill	B	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Gas LP	
Fase	Líquido Saturado	
Inventario	10,418	Kg
Cabeza hidráulica del tanque	1.67	m
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Suelo Seco	
Elevación	1.5	m
Dirección de la liberación	Horizontal	
Datos del recipiente		
Temperatura	25	° C
Presión	Líquido Saturado	
Datos del escenario		
Tipo de escenario	Fuga	
Diámetro del orificio	0.025	m
Distancia de interés	1,000	m

El modelo seleccionado en PHAST, de tanque tubería modela no sólo la descarga, sino también los escenarios peligros que pudieran ocurrir, dependiendo del material y de las condiciones de almacenamiento, el escenario de *dardo de fuego* propuesto arriba para las corridas en Excel como posible consecuencia de la fuga, es un escenario que también considera PHAST. Los resultados más significativos de la simulación en PHAST, se muestran en la tabla 3.53, tanto de descarga como del dardo de fuego.

Tabla 3.53. Resultados de la descarga y dardo de fuego, tras la liberación de GLP de una pipa, como consecuencia de un accidente carretero, mediante PHAST.

Resultados calculados	Valor	Símbolo
Velocidad final (Velocidad del dardo)	360.87	m/s
Flujo másico de descarga	7.69	Kg/s
Velocidad en el orificio	210.75	m/s
Presión de salida	3.98	Bar
Temperatura de salida	3.47	°C
Duración de la liberación	20	min
Ángulo de la flama respecto a la horizontal	90	SU
Poder emisivo	44.07	kW/m <sup>2</sup>
Longitud de la Flama	71	m
Radio Máximo de la Flama	-	m

Para el caso del segundo carro-tanque se considera que ocurre una BLEVE, para simularla en PHAST, se empleó un modelo fuente de tanque/tubería, y un escenario de ruptura catastrófica; los datos de entrada para la simulación se muestran en la tabla 3.54.

Tabla 3.54 Variables de entrada para la simulación del escenario de riesgo en PHAST, para la fuga de GLP

Modelo fuente	Tanque/tubería	
Condiciones atmosféricas y zona de localización de la instalación		
Temperatura ambiente	25	° C
Humedad relativa	70	%
Presión atmosférica	1.0125	Bar
Radiación solar	0.5	
Condiciones meteorológicas al momento de la fuga de la sustancia peligrosa		
Condición	Estable	
Velocidad del viento	6.5	m/s
Estabilidad Pasquill	B	
Sustancia peligrosa bajo estudio		
Material	Propano	
Fase	Líquido	
Inventario	10,418	Kg
Características del sitio en que se encuentra el recipiente		
Dique	No	
Tipo de superficie	Suelo seco	

Continuación de la tabla 3.54...

Datos del recipiente		
Temperatura	Líquido saturado	
Presión	23.9	Bar man.
Datos del escenario		
Tipo de escenario	Ruptura catastrófica	

La BLEVE que ocurre en el segundo tanque, como consecuencia de un calentamiento en la coraza, debido a las llamas del *dardo de fuego* que se produjo por la fuga inicial que se presentó en el primer tanque al momento del impacto, presenta dimensiones y un flujo térmico que se describen en la tabla 3.55.

Tabla 3.55 Resultados para la BLEVE que ocurre en la segunda pipa.

Resultados calculados	Valor	Unidades
Fracción de líquido	0.36	SU
Radio BLEVE	63.14	m
Altura BLEVE	74.11	m
Duración	9.8	s
Poder emisivo de la flama	240.15	kW/m <sup>2</sup>

#### Análisis de resultados

Siempre que se realiza un análisis de consecuencias debe tenerse en cuenta que lo más importante es la estimación de los daños por sobrepresiones, radiación y toxicidad, según sea el caso. Para este caso la concentración en ppm es importante para saber en qué rangos de distancia en la dirección del viento la nube formada es inflamable, para el LPG el límite inferior de inflamabilidad (LFL) es de 17,647 ppm y el superior (UPL) 92,934 ppm.

La figura 3.18, muestra dos curvas, superpuestas, de la concentración en función de la distancia en la dirección del viento. De acuerdo con la figura 3.18, y los resultados en PHAST, la nube es inflamable después de los 6m y antes de 32m en la dirección del viento. Los resultados en Excel indican que la nube presenta riesgo de incendio entre los 5m y 21m de distancia en la dirección del viento.

La concentración de la nube también puede observarse en la figura 3.19, donde se observa la concentración de la nube vista de frente desde el punto de liberación y en función de la distancia que recorre en la dirección del viento, esta figura se conoce también como vista frontal de la nube, o isopleta, la cual se puede obtener empleando el modelo en Excel, esta se aprecia en la figura 3.20.

Obsérvese que las figuras 3.18, 3.19 y 3.20, describen la evolución de la nube en dos dimensiones, tomando como referencia todos los casos la concentración en la dirección del viento, o bien la línea central. Esta evolución de la nube puede apreciarse mejor en el software PHAST, o sea, ver como se dispersa en el espacio y a través del tiempo es lo que se conoce como opción *Dinámica* de los gráficos.



Figura 3.18 Concentración (ppm) en función de la distancia para la liberación de Gas LP de una Pipa. Categoría de 6.5/B.

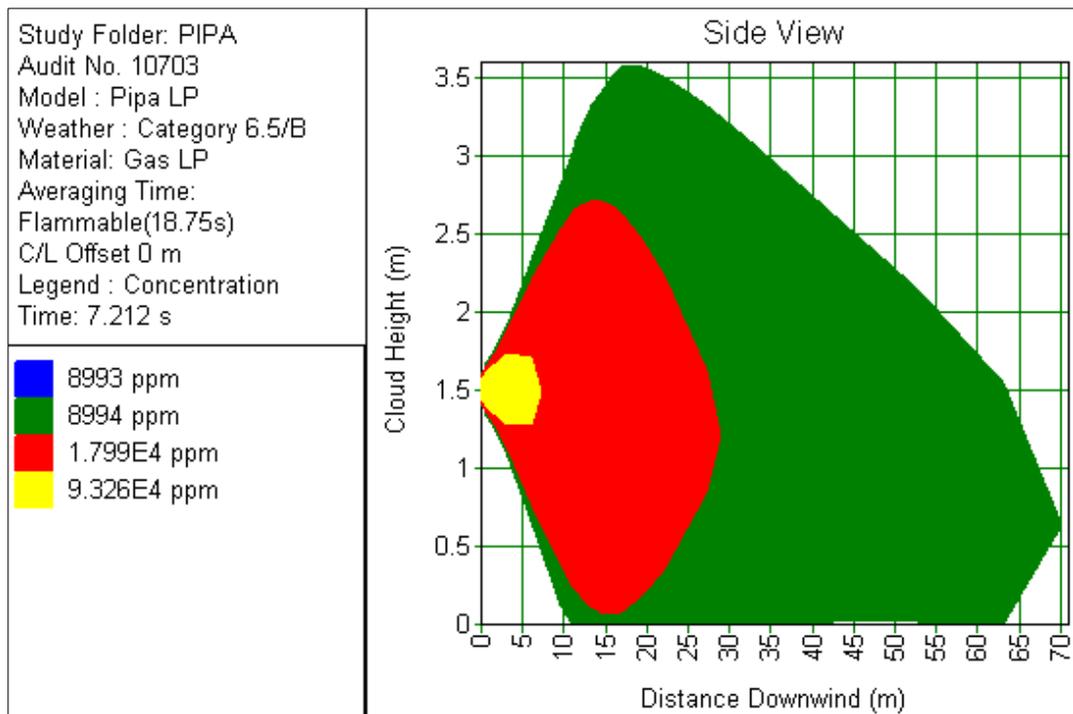


Figura 3.19 Concentración de la nube en la vertical (altura de la nube) en función de la distancia en la dirección del viento. Para la fuga de GLP, en 7.212s.



Figura 3.20 Isopleta de la nube en la vertical (altura de la nube) en función de la distancia en la dirección del viento, para la fuga de GLP

Los niveles de radiación, son un parámetro importante, como se ha indicado en el capítulo 2, la radiación tiene efectos sobre las personas y las estructuras. La SEMARNAT en su guía para la elaboración de estudios de riesgo indica que se deben trazar los radios de afectación, donde un nivel de radiación de  $1.4 \text{ kW/m}^2$  representa una zona de afectación, y  $0.5 \text{ kW/m}^2$  representa la zona de amortiguamiento. Obsérvese en la figura 2.21 las distancias que alcanzan los radios por la radiación del dardo de fuego; el radio de la zona de amortiguamiento esta a casi 144m en la dirección del viento y 120m en la perpendicular al viento.

En la figura 2.22, se observan los radios generados al modelar la BLEVE, estos alcanzan casi 570m en la dirección del viento e igual distancia en la perpendicular al viento; destaca de esta comparación la gran diferencia en la magnitud de los radios; por ello es importante hacer notar nuevamente el poder destructivo que tienen las BLEVE's, por los altos niveles de radiación que generan.

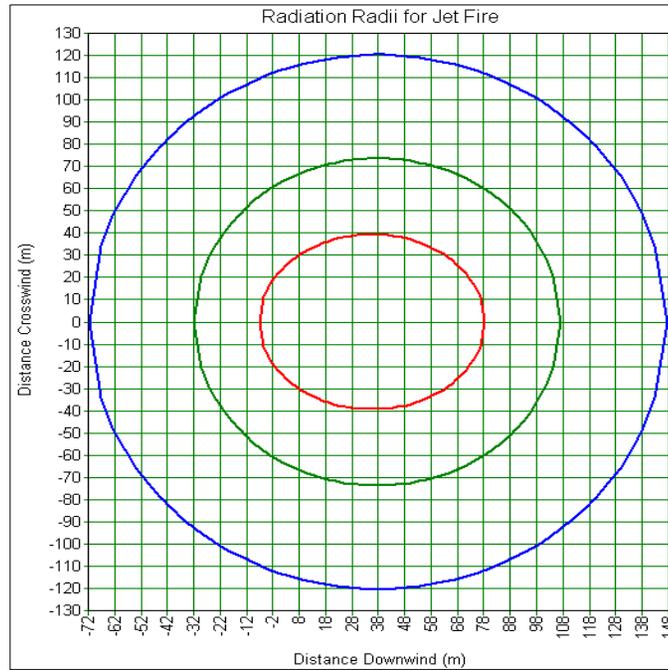


Figura 3.21 Niveles de radiación generados por el dardo de fuego, consecuencia de la ignición del material fugado de la pipa de LPG. La elipse externa muestra un nivel de radiación de  $0.5 \text{ kW/m}^2$ , la de en medio  $1.4 \text{ kW/m}^2$ , y la interior una radiación de  $5 \text{ kW/m}^2$ . Para una categoría de estabilidad de 6.5/B.

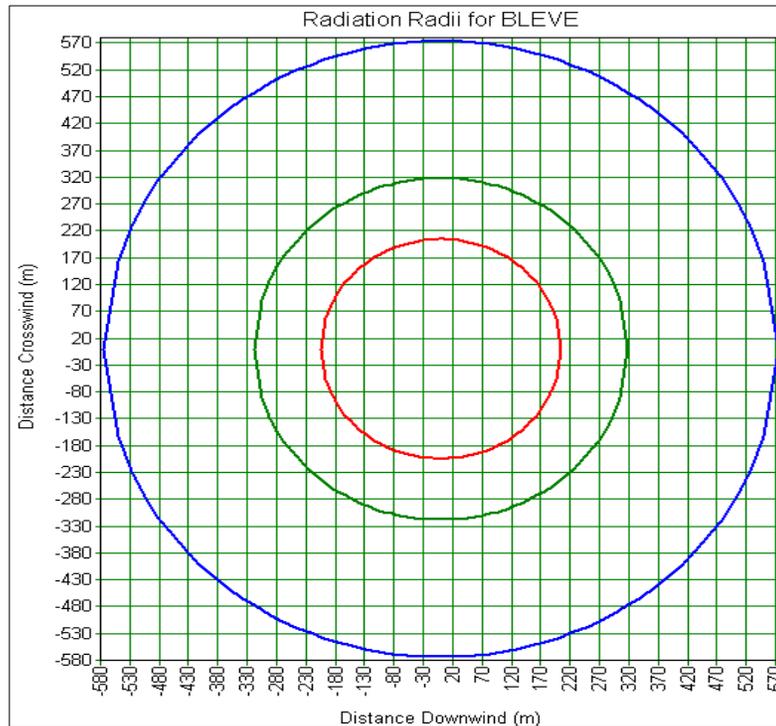


Figura 3.22 Niveles de radiación generados por la explosión BLEVE del segundo tanque. El radio externo muestra un nivel de radiación  $0.5 \text{ kW/m}^2$  el radio del centro un nivel de radiación de  $1.4 \text{ kW/m}^2$ , el radio interno  $12.5 \text{ kW/m}^2$ .

La sobrepresión es otro parámetro de interés en el análisis de consecuencias. En la descripción del problema se ha descrito la posible presencia del estallido del primer carro-tanque, (sin ser BLEVE), este fenómeno genera sobrepresiones de importancia como se muestra en la figura 3.23; y en la figura 3.24 se muestran los radios de afectación por la generación de la onda de sobrepresión.

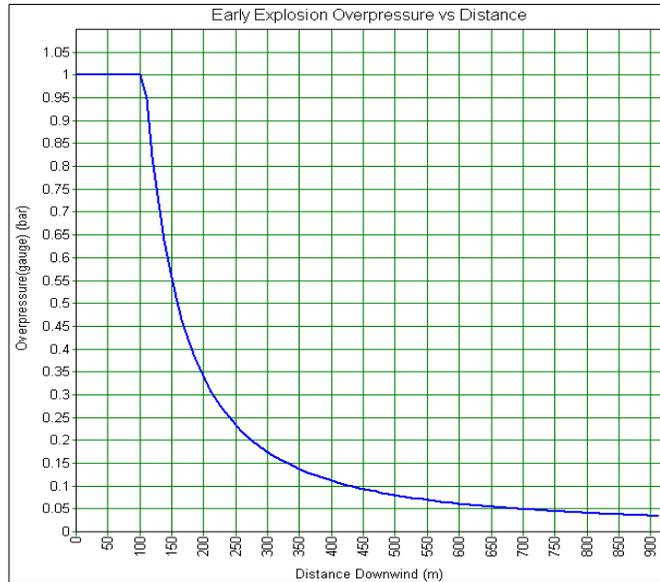


Figura 3.23 Nivel de sobrepresión en función de la distancia en la dirección del viento. Para una estabilidad de 6.5/B.

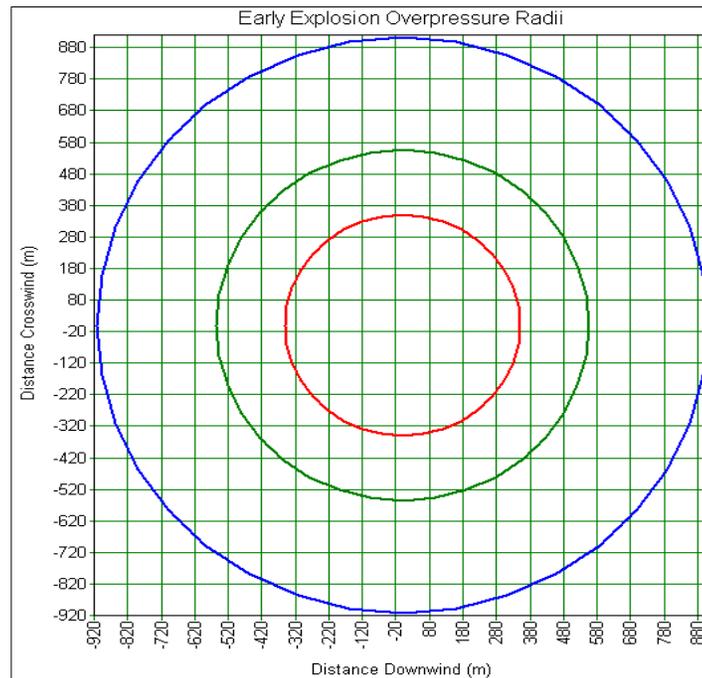


Figura 3.24 Radios de sobrepresión en función de la distancia en la dirección del viento. El radio externo muestra una sobrepresión de 0.03447 bar. El radio del centro un nivel de sobrepresión de 0.06895 ba. Y el radio interno 0.1379 bar. Para una condición de clima de 6.5/B.

De los resultados obtenidos se observa que para el análisis del primer carro tanque el flujo liberado es de 7.45 Kg/s con una duración de 23.3min, y de acuerdo con PHAST 7.68 kg/s, con una duración de 20 min, se estima que en el accidente real transcurrieron 20 min antes de que se suscitara la explosión del primer tanque, ya que pese a que se ha estudiado un dardo de fuego, el accidente real corresponde a un flamazo, o incendio súbito de la nube que se había formado. Hasta el momento se han omitido en este estudio, las consecuencias del flamazo, por no contar con un modelo en Excel, sin embargo la figura 3.25, obtenida de PHAST, nos da una idea de los radios de afectación por este fenómeno.

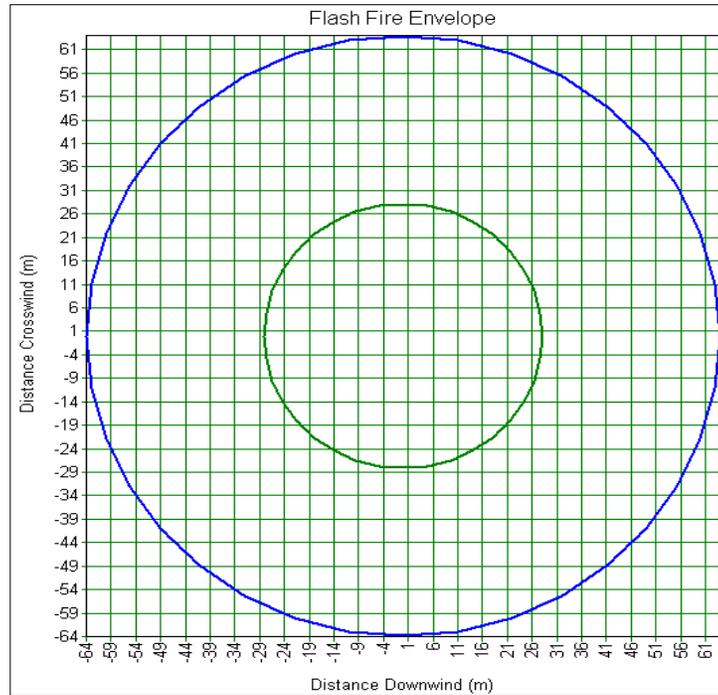


Figura 3.25 Radios de afectación debido al flamazo de la nube formada como consecuencia de la fuga en la primera pipa de GLP. Radio exterior a 8993 ppm, y radio interno a  $1.799 \times 10^4$  ppm.

Respecto al dardo de fuego estudiado, el resultado de mayor importancia es la radiación emitida. El modelo en Excel indica que a 15 m la radiación es de  $27 \text{ kW/m}^2$ , y PHAST indica que es de  $44.07 \text{ kW/m}^2$ , de acuerdo con la tabla 1.7, del capítulo I, una radiación arriba de  $25 \text{ kW/m}^2$  es energía suficiente para encender madera en exposiciones largas, y arriba de  $37.5 \text{ kW/m}^2$  se causa daño a equipo de proceso y colapso de estructuras. Los reportes sobre el accidente indican una destrucción total en un radio de 20m, un radio de 100m severamente afectado, y afectaciones hasta los 500m de distancia. Estos daños pueden ser atribuidos principalmente a la BLEVE ocurrida como consecuencia del calentamiento del segundo tanque, ya que como se indica en la figura 3.22, una intensidad de radiación de  $1.4 \text{ kW/m}^2$  la cual ya no causara incomodidad para las personas solo esta después de un radio de 570m en la dirección del viento, esto indica que el resultado PHAST, ha sobreestimado 70m lo que ha ocurrido en realidad. Por su parte el modelo en Excel, requiere la ejecución del mismo a la distancia de interés, si se fija esta igual a 570m (para comparar con PHAST) la radiación es de  $1.95 \text{ kW/m}^2$ , y para alcanzar una radiación de  $1.4 \text{ kW/m}^2$ , que es la que no causa incomodidad a las personas la distancia estimada es de 670m, esto representa 170 metros adicionales respecto al radio de afectación real reportado.

## CONCLUSIONES

Dado el crecimiento de la industria química, y el manejo, producción y transporte de sustancias peligrosas, resulta de importancia la realización de un análisis de riesgos, que incluya una evaluación de la magnitud de las consecuencias de los posibles eventos para ayudar a buscar las medidas de seguridad que prevengan o mitiguen los accidentes en caso de ocurrir.

Por medio de los balances de energía mecánica, modelos teóricos y semiempíricos para la dispersión de contaminantes bajo reacción química y la dinámica de las nubes, se realizó un análisis de consecuencias que describe los efectos derivados de la liberación no controlada de una sustancia química que por sus características de toxicidad, problemas de sobrepresión y de los altos niveles de radiación térmica producidos por la combustión de materiales inflamables, pueda tener consecuencias para las personas, el ambiente y los equipos; y se compararon los resultados con los predichos mediante el uso del software comercial PHAST, a partir de los cual se concluye que:

- Los modelos de descarga en Excel se limitan a descargas a una sola fase.
- El modelo de descarga de líquido de Excel presenta para el resultado de flujo de descarga una desviación negativa del 6.38%, respecto a PHAST.
- El modelo de descarga de un gas, presenta una desviación negativa de 3.22% del método isotérmico, y 7.52% del método adiabático respecto a PHAST, de acuerdo al caso teórico presentado. Sin embargo para el caso de fuga de amoniaco la desviación de los resultados de Excel respecto a PHAST es positiva, siendo 4.33% para el método isotérmico, y 1.83% para el método adiabático. En el caso de fuga de GLP, de una pipa la desviación del resultado Excel es negativa respecto a PHAST, con un 3.12%, método isotérmico.
- Para el modelo de dispersión de una liberación continua, se compara la concentración en ppm; el modelo en Excel presenta una desviación negativa de 30.21% respecto al modelo PHAST, para una estabilidad 2F. Para la fuga de amoniaco la desviación de Excel respecto a PHAST de la concentración en ppm, a 500m es de 11%.
- Para el modelo de dispersión de una liberación instantánea la desviación del resultado del modelo en Excel respecto a PHAST es negativa, de 96.7%.
- Para el modelo de Explosión de nube de vapor, mediante la metodología TNT, el modelo en Excel presenta resultados adicionales de importancia tal como se cita en la tabla 3.25, del capítulo III. El resultado comparable de sobrepresión a una distancia dada, muestra en Excel una desviación positiva respecto a PHAST del 14.01%. La metodología Baker-Strehlow, y multi-energía presentan las siguientes desviaciones del modelo en Excel respecto a PHAST.

	Multi-Energía	Baker-Strhlow
Energía total confinada	-3.14	-4.5
Sobrepresión	5.7	1.6
Duración	19.0	1.6

- El modelo BLEVE, tanto el caso teórico como el estudio de la BLEVE, de un tanque que transportaba GLP, presenta una desviación positiva del 3% para el radio de la bola de fuego, de Excel respecto a PHAST. El estimado de la desviación en la duración de 0.05%. El flujo superficial emitido varía 28.11% en el caso teórico y 21.7% en el caso del carro tanque de GLP, del resultado de Excel respecto a PHAST. El resultado de la altura de la bola de fuego de Excel respecto a PHAST de acuerdo al caso teórico varía un 0.05%, y 26.6% según el caso del tanque de GLP.
- Para el charco de fuego con base al caso teórico, la altura de la flama es 47.6% mayor la que se reportan PHAST, y el diámetro del charco de fuego es 33.49% mayor en Excel.
- Para el caso del dardo de Fuego, comparando el modelo en Excel, con el método API de PHAST, se concluye que la altura de la flama es 80.7% mayor en PHAST, que en Excel y que el radio del dardo de fuego es 72.5% mayor en Excel que en PHAST.

Con base a las aseveraciones citadas se observa que los modelos de descarga a una sola fase, así como BLEVE y UVCE, presentan la menor desviación. Sin embargo, para dispersión en vista de que en Excel se emplearon ecuaciones gaussianas y PHAST emplea su propio modelo de dispersión generalizado, los resultados presentan diferencias. Para los dardos de fuego, la comparación solo puede llevarse a cabo para las dimensiones de la flama resultante, altura y diámetro, ya que tanto el modelo en Excel, como en la de PHAST, nos arrojan resultados adicionales, pero ninguno coincide.

En general los modelos propuestos por la literatura mostrados en el presente trabajo, concuerdan bien con los que arroja el software PHAST, para determinadas condiciones de liberación de una sustancia peligrosa.

Con base a los resultados y el análisis mostrado en el capítulo III, se pueden emplear los modelos en Excel como una herramienta que permite realizar un análisis de consecuencias, con la misma confianza que proporciona el uso de un software PHAST, siempre que se estudien descargas de sustancias químicas peligrosas, que al ser liberadas se encuentran en fase vapor o líquida, ya que los modelos de *descarga*, en Excel no incluyen el tratamiento de liberaciones a dos fases, la cual si es una opción en PHAST. Los modelos de dispersión pueden usarse siempre y cuando se trate de nube boyante positiva y neutral, ya sea liberada instantánea o continuamente, pero no cuando se trate de un gas muy denso.

Los resultados de los modelos de dardo de fuego y charco de fuego en Excel, difieren de los presentados por PHAST, éste último tiende a arrojar resultados muy por encima de los de Excel, y aunque se recomienda que los resultados estén sobreestimados cuando se realiza un análisis de consecuencias, es importante que no estén fuera de la realidad.

Respecto a los modelos de efectos, en primer lugar debe señalarse que están íntimamente ligados a los resultados que arrojan los cálculos de dispersión, de los cuales se han indicado ya las diferencias sustanciales, motivo por el cual, es de esperarse que los resultados difieran; en segundo lugar debe considerarse que la metodología probit empleada en PHAST es diferente de la que se uso para el modelo en Excel. Con base al trabajo realizado se sugiere el uso de la metodología probit empleada en el modelo

en Excel ya que es más versátil, aunque debe tenerse en cuenta que requiere del sustento de un buen modelo de dispersión.

Debe considerarse que el uso de los modelos en Excel requiere de un mayor conocimiento por parte del usuario para poder determinar qué modelo emplear en un análisis de consecuencia, además de que la cantidad de datos de entrada es mayor; a diferencia de PHAST, donde el usuario solo necesita saber los datos del proceso para obtener un resultado, el conocimiento es necesario para interpretar los resultados.

La desventaja principal de PHAST la constituye el alto costo de la licencia para el uso del software, además de que representa una desventaja para quien usa PHAST por primera vez, no saber que está haciendo el software, para llegar al resultado, sin embargo, la solución es hacer uso del manual de usuario incluido en este.

Una parte muy importante cuando se realiza un Análisis de consecuencias es el criterio del analista que realiza el estudio, para que, independientemente del modelo matemático que esté empleando pueda determinar si las distancias de afectación que está calculando son realistas.

## ANEXOS

## APÉNDICE A (Tablas)

Tabla A1. Correlaciones para el Factor de Expansión  $Y$ , y la relación de caída de presión sónica  $(P1-P2)/P1$  como una función de pérdida en la cabeza  $K_f$ . Las correlaciones son dentro del 1% del valor real en el rango especificado.

Valor de la función, $y$	A	B	C	D	Rango de $K_f$
Factor de Expansión, $Y$	0.0006	-0.0185	0.1141	-0.5304	0.1-100
Relación de caída de presión sónica, $k = 1.2$	0.0009	-0.0308	0.261	-0.7248	0.1-100
Relación de caída de presión sónica, $k = 1.4$	0.0011	-0.0302	0.238	-0.6455	0.1-300
Relación de caída de presión sónica, $k = 1.67$	0.0013	-0.0287	0.213	-0.5633	0.1-300

Fuente: (AIChE/CCPS, 2000)

Tabla A2. Parámetro de rugosidad de la superficie,  $z_0$ .

Rugosidad superficial, $z_0$ , metros	Clasificación del terreno	Descripción del terreno
3-10	Altamente urbano	Centros de ciudades con altos edificios, con grandes desniveles o área montañosa
1-3	Área urbana	centros de ciudades, villas, ciudades llenas de arboles
1	Área residencial	Área con gran cantidad de edificios de poca altura, área boscosa, zonas industriales con pocos obstáculos.
1	Refinerías grandes	Columnas de destilación y otros equipos de altura considerable
0.5	Refinerías pequeñas	Equipos pequeños, sobre un área pequeña
0.3	Tierra cultivada	Área abierta con gran crecimiento, casas dispersas
0.1	Suelo plano	Pocos árboles, hierbas, llanuras de hierba
0.001	Agua abierta	Largas extensiones de agua, llanuras desérticas
0.0001	Mar	Mar abierto en calma, nieve cubriendo el suelo, terreno ondulado

Fuente: (AIChE/CCPS, 2000)

Tabla A3. Ecuaciones recomendadas para el calculo de los coeficientes de dispersion de Pasquill-Guifford de dispersion de emisiones continuas (Plumas).

Clase de estabilidad	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
	Condiciones Rurales	
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.01x(1+0.0003x)^{-1}$
Condiciones Urbanas		
A-B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24 x ( 1 + 0.001x)^{+1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20 x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14 x ( 1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08 x ( 1 + 0.0015x)^{-1/2}$

Fuente: (AIChE/CCPS, 1996)

Nota: La distancia en la dirección del viento, x, y los coeficientes de dispersión tienen unidades de metros.

Tabla A4. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de coeficientes de dispersión Pasquill-Guifford, de liberaciones instantáneas (Puff). \*

Tipo	Estabilidades Pasquill-Gifford	$\sigma_y - \sigma_x$ (m)	$\sigma_z$ (m)
A	Condiciones extremadamente inestables.	$0.18x^{0.92}$	$0.60x^{0.75}$
B	Condiciones moderadamente inestables.	$0.14x^{0.92}$	$0.53x^{0.73}$
C	Condiciones ligeramente inestables.	$0.10x^{0.92}$	$0.34x^{0.71}$
D	Condiciones neutras.	$0.06x^{0.92}$	$0.15x^{0.70}$
E	Condiciones estables.	$0.04x^{0.92}$	$0.10x^{0.65}$
F	Condiciones muy estables.	$0.02x^{0.92}$	$0.05x^{0.61}$

Fuente: (AIChE/CCPS, 1996)

Nota: La distancia en la dirección del viento, x, y los coeficientes de dispersión tienen unidades de metros.

Tabla A5. Ecuaciones para las funciones de los parámetros de explosión en la figura B1. Las funciones son tabuladas usando la función de la forma siguiente:

$$\log_{10} \phi = \sum_{i=0}^n c_i (a + b \cdot \log_{10} Z)^i$$

Donde  $\phi$  es la función de interés;  $c_0$ , a, b son constantes provistas en la tabla abajo, y Z es la distancia escalada ( $m/kg^{1/3}$ )

Constante	Rango	Sobrepresión $p^0$ (Kpa)	Impulso $i_p$ (Pa s)	Tiempo de duración $t_d$ (ms)	Tiempo de llegada $t_a$ (ms)
	1	0.0674≤Z≤40	0.0674≤Z≤0.955	0.178≤Z≤1.01	0.0674≤Z≤40
	2		0.956≤40	1.01≤Z≤2.78	
	3			2.78≤Z≤40	
a	1	-0.214362789151	2.0676190872100	1.92946154068000	-0.20242571617800
	2		-1.9470884674700	-2.12124925252121	
	3			-3.53626218091000	
b	1	1.350342499930	3.0760329666000	5.25099193925000	1.37784223635000
	2		2.4069774540600	9.29962886110000	
	3			3.46349745571000	
c0	1	2.780769165770	2.5245562092500	-0.61422760355900	-0.05916342880460
	2		1.6728164586300	0.31540924578400	
	3			0.68690664244090	
c1	1	-1.695898874100	-0.5029927636860	0.13014371767500	1.35706496258000
	2		-0.3845190269650	-0.02979442689760	
	3			0.09330353040090	
c2	1	-0.154159376846	0.1713356452350	0.13487251195400	0.05249279864500
	2		-0.0260816706301	0.03063295528800	
	3			-0.00058494208830	
c3	1	0.514060730593	0.0450176963051	0.03915742769060	-0.19656395408600
	2		0.0059579875382	0.01834055740860	
	3			-0.00226884995013	
c4	1	0.098855436527	-0.0118964626402	-0.00475933664702	-0.06017700522880
	2		0.0145445261070	-0.01739646662110	
	3			-0.00295908591505	
c5	1	-0.293912623038		-0.00428144598008	0.06963602708910
	2		-0.0066328933473	-0.00106321963633	
	3			0.00148029298689	
c6	1	-0.026811234502			0.02152974900920
	2		-0.0028418932720	0.00562060030977	
	3				
c7	1	0.109097496421			-0.01616589307850
	2		0.0013644816227	0.00016182174990	
	3				
c8	1	0.001628467563			-0.00232531970294
	2			-0.00068601889440	
	3				
c9	1	-0.021463103024			0.00147752067524
	2				
	3				
c10	1	0.000145672338			
	2				
	3				
c11	1	0.001678477523			

Fuente: (Lees, 1996)

Tabla A6. Daño estimado para estructuras comunes basado en sobrepresiones (Clancey, 1972). Estos valores deben ser usados solo para estimados aproximados.

Presión		Daños producidos
psig	kPa	Valores de Sobrepresión por Clancey (1972).
0.02	0.14	Ruido molesto (137 dB si es de baja frecuencia 10-15 Hz).
0.03	0.21	Ruptura ocasional de ventanas bajas que ya estén bajo tensión.
0.04	0.28	Ruido fuerte (143 dB), falla de vidrio por efecto sónico.
0.1	0.69	Ruptura de ventanas pequeñas bajo tensión.
0.15	1.03	Presión típica para ruptura de vidrio.
0.3	2.07	“Distancia segura” (95% de probabilidad de no sufrir daños importantes en personas); límite de proyectiles; algún daño a techos de casas; 10% del vidrio de ventanas se rompe.
0.4	2.76	Daño estructural menor limitado.
0.5-1.0	3.4-6.9	Ventanas grandes y pequeñas se hacen añicos; daño ocasional a marcos de ventanas.
0.7	4.8	Daño menor a estructuras de casas.
1	6.9	Demolición parcial de casa, las vuelve inhabitables.
1-2	6.9-13.8	Asbestos corrugados se hacen añicos; falla de paneles y mamparas de aluminio, madera o acero corrugado.
1.3	9	Marcos de acero del revestimiento de edificios ligeramente distorsionados.
2	13.8	Colapso parcial de paredes y techos de casas.
2-3	13.8-20.7	Paredes de concreto o bloques de hormigón, no reforzadas, se estrellan.
2.3	15.8	Límite inferior de daño estructural serio. Umbral (1%) de rotura de tímpanos en personas.
2.5	17.2	50% destrucción de la mampostería de casas.
3	20.7	Máquinas pesadas (3000 lb) en edificios industriales sufrieron poco daño, edificio con marcos de acero distorsionado y arrancado de sus cimientos.
3-4	20.7-27.6	Demolición de edificio sin marcos o de paneles de acero; ruptura de tanques de almacenamiento de petróleo.
4	27.6	Ruptura de revestimiento de edificios industriales ligeros.
5	34.5	Postes de madera para servicios partidos; prensa hidráulica alta (40,000 lb) en edificio ligeramente dañada.
5-7	34.5-48.2	Destrucción casi completa de casas.
7	48.2	Volcadura de vagones de ferrocarril cargados.
7-8	48.2-55.1	Paneles de ladrillo, 8-12 in de grosor, no reforzados, fallan por cizalla o flexión.
9	62	Vagón de ferrocarril cargado completamente demolido.
10	68.9	Probable destrucción total de edificios; máquinas herramienta pesadas (7,000 lb) desplazadas y dañadas seriamente, herramientas para maquinaria muy pesadas (12,000 lb) sobrevivirán.
14.3	98.7	Umbral (1%) de probabilidad de muertes por hemorragia pulmonar.
25.1	173.5	90% de probabilidad de muertes por hemorragia pulmonar.
300	2068	Formación de cráter.

Fuente: (AICHE/CCPS, 2000)

Tabla A7. La fracción de energía total convertida a radiación para hidrocarburos:

Combustible	Fracción
Hidrógeno	0.20
Metano	0.20
Etileno	0.25
Propano	0.30
Butano	0.30
C <sub>5</sub> y mayores	0.40

Fuente: (Mudan and Croce, 1988)

Tabla A8. Valores de las constantes a,b y n en la ecuación probit para algunas sustancias.

Sustancia	U.S Coast Guard (1980)			Banco Mundial (1998)		
	a	b	n	a	b	n
Acroleína	-9.931	2.049	1	-9.93	2.05	1
Acrlonitrilo	-29.42	3.008	1.43			
Amoniaco	-35.9	1.85	2	-9.82	0.71	2
Benceno	-109.78	5.3	2			
Bromo	-9.04	0.92	2			
Monóxido de Carbono	-37.98	3.7	1			
Tetracloruro de carbono	-6.29	0.408	2.5	0.54	1.01	0.5
Cloro	-8.29	0.92	2	-5.3	0.5	2.75
Formaldehido	-12.24	1.3	2			
Ácido clorhídrico	-16.85	2	1	-21.76	2.65	1
Ácido cianhídrico	-29.42	3.008	1.43			
Ácido fluorhídrico	-25.87	3.354	1	-26.4	3.35	1
Ácido sulfhídrico	-31.42	3.008	1.43			
Metil bromuro	-56.81	5.27	1	-19.92	5.16	1
Isocianato de Metilo	-5.642	1.637	0.653			
Dióxido de nitrógeno	-13.79	1.4	2			
Fosgeno	-19.27	3.686	1	-19.27	3.69	1
Óxido de propileno	-7.415	0.509	2			
Dióxido de sulfuro	-15.67	2.1	1			
Tolueno	-6.794	0.408	2.5			

Fuente: (AIChE/CCPS, 2000)

Tabla A9. Conversión de Probits a porcentajes

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.08
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.42
30	4.48	4.5	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.69
40	4.75	4.77	4.8	4.82	4.85	4.87	4.9	4.92	4.95	4.95
50	5	5.03	5.05	5.08	5.1	5.13	5.15	5.18	5.2	5.2
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.47
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.77
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.18
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.05
%	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

Fuente: (AIChE/CCPS, 2000)

APÉNDICE B (Figuras)

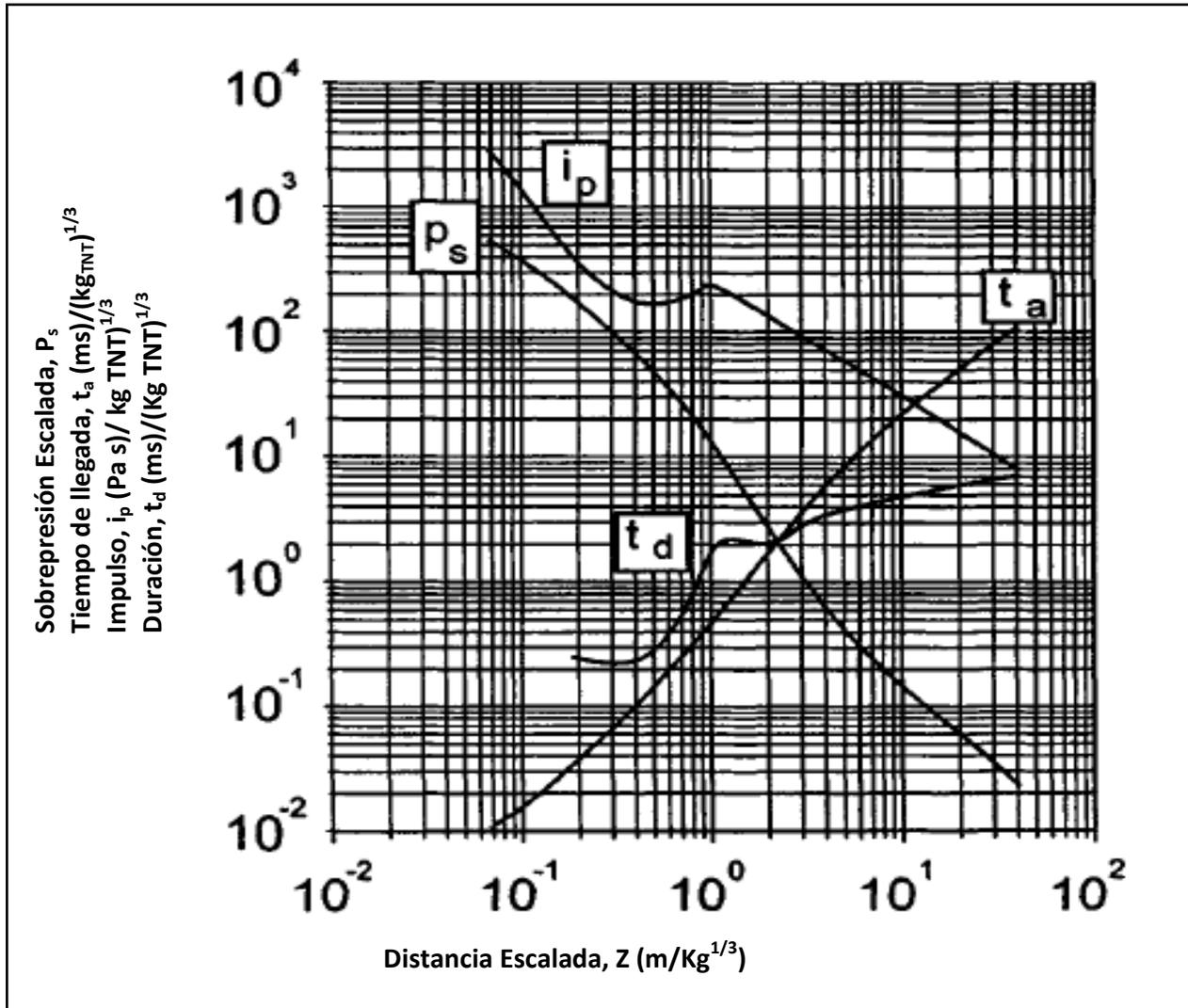
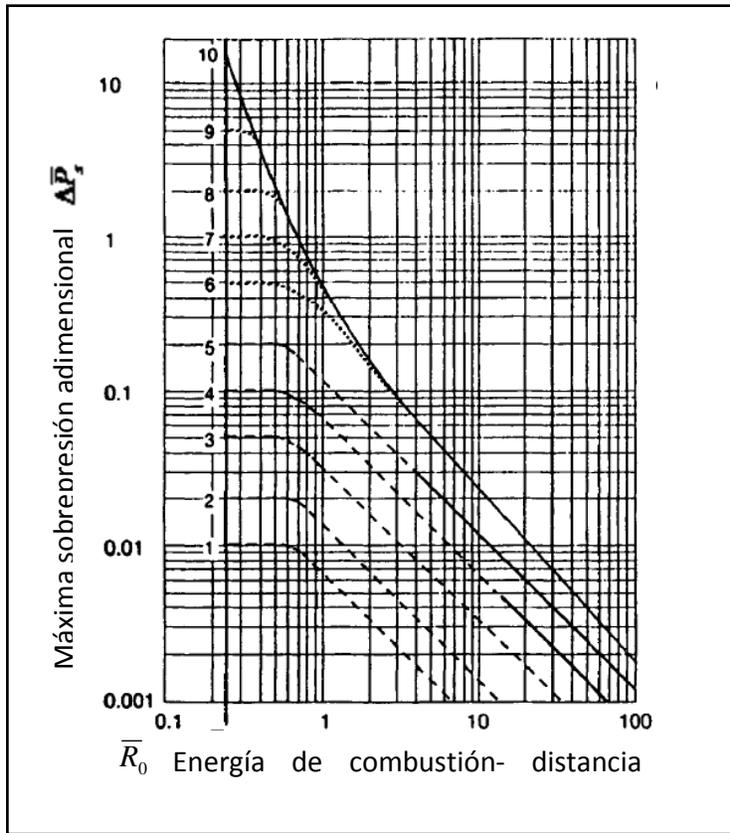


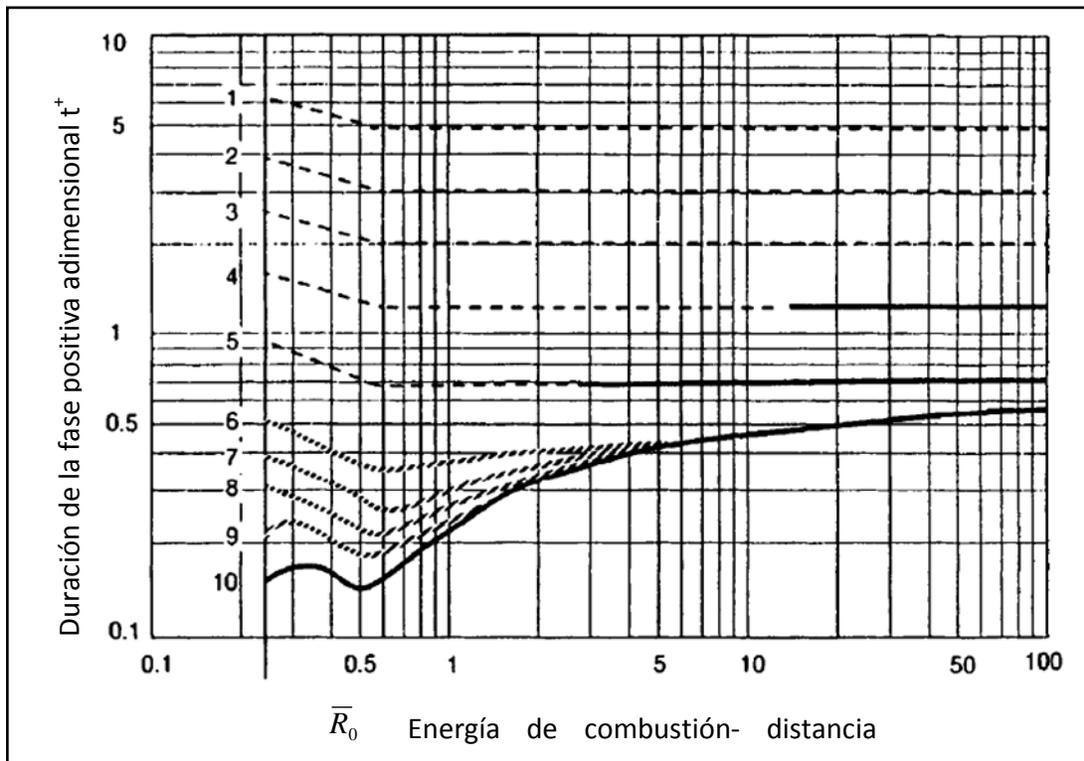
Figura B1. Parámetros de la onda de choque para una explosión esférica de TNT en una superficie a nivel del mar. (Lees, 1996).

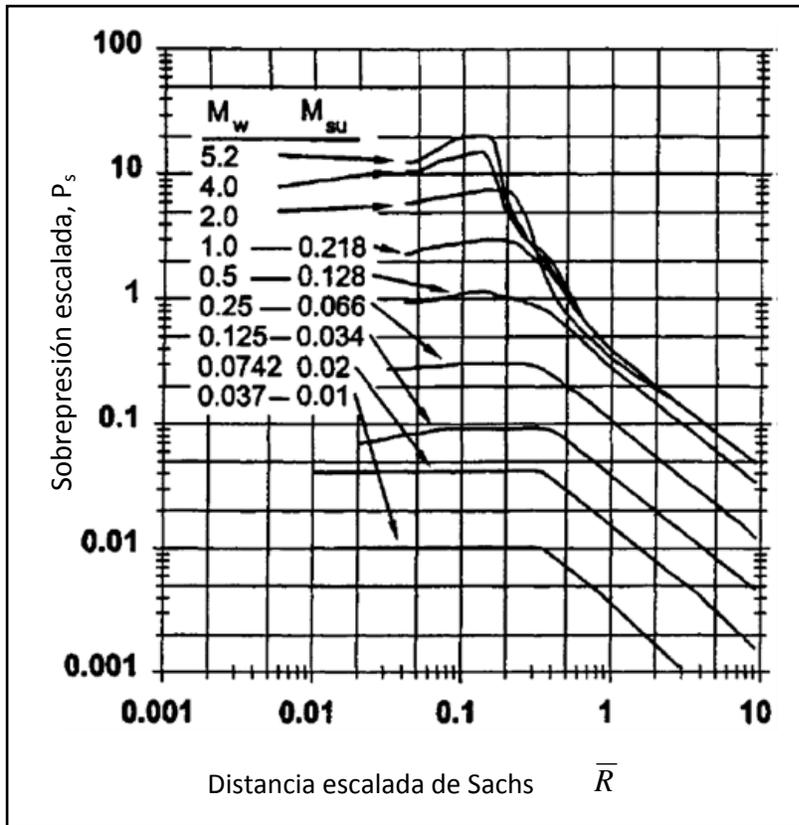


Modelo de TNO Multi-Energía para explosiones de nubes de vapor.

Figura B2. (Izquierda) Sobrepresión escala de Sachs en función de la distancia escalada. (AIChE/CCPS, 1994).

Figura B3. (Abajo) Duración de la fase positiva en función de la distancia escalada de Sachs. (AIChE/CCPS, 1994)

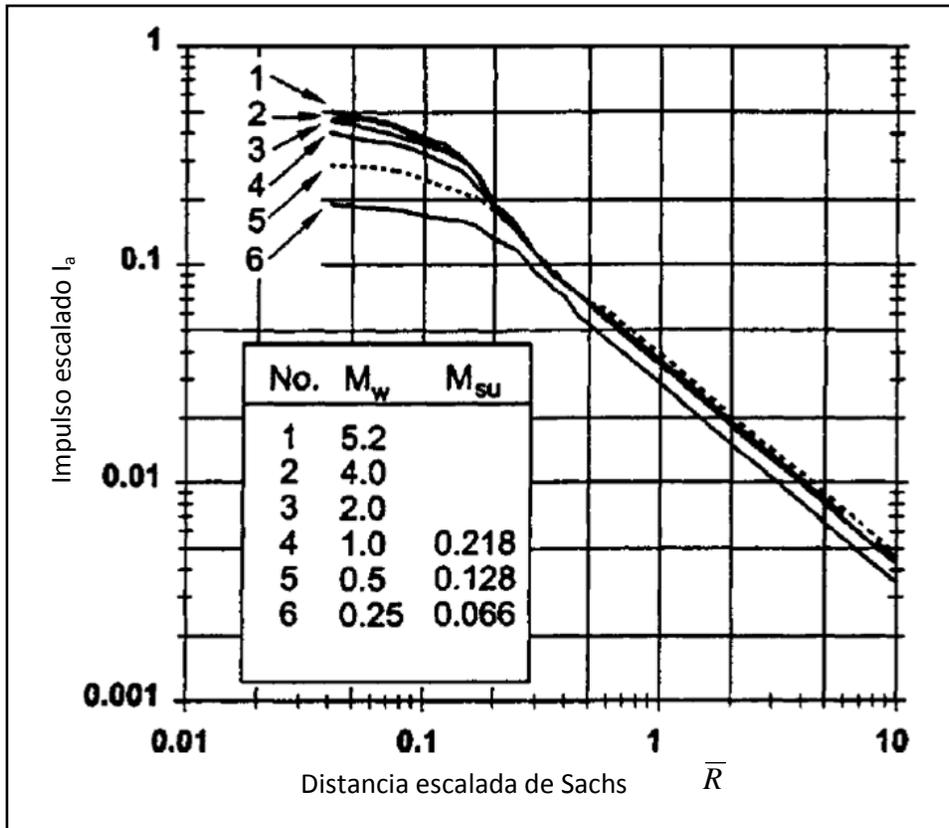




Modelo de Baker – Strehlow para explosión de nubes de vapor.

Figura B4. (Izquierda) Sobrepresión escalada como una función de la distancia escalada. (AIChE/CCPS, 2000)

Figura B5. (Abajo) Impulso escalado como una función de la distancia escalada. (AIChE/CCPS, 2000)



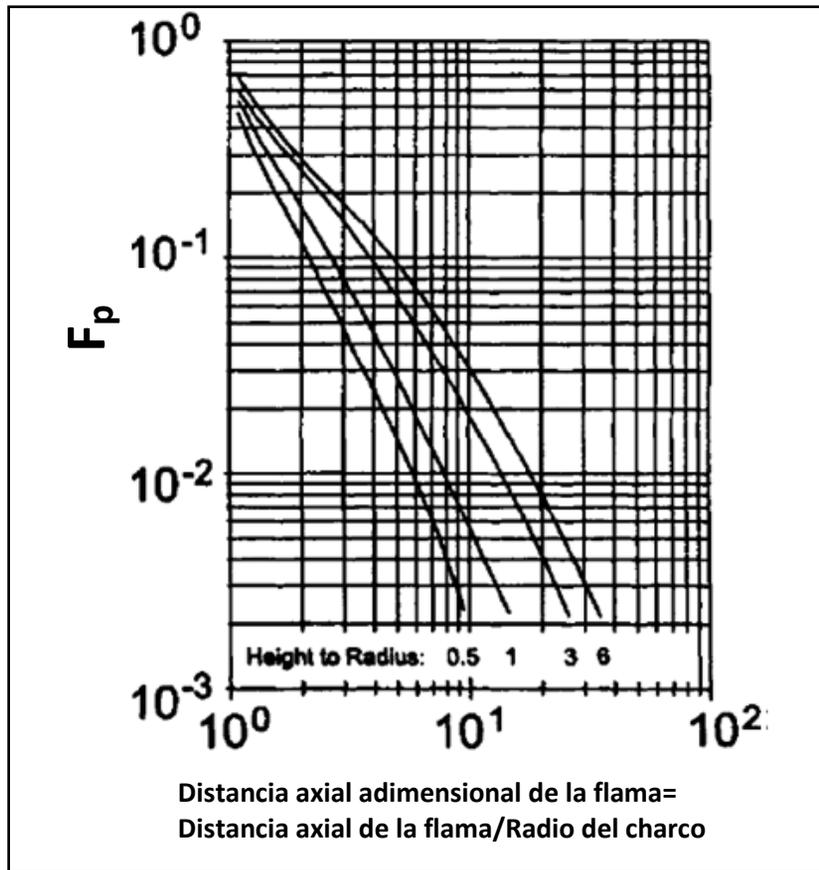


Figura B6. Factor de visión máximo para un receptor a nivel de suelo de una radiación proveniente de un cilindro circular recto. (AIChE/CCPS, 2000)

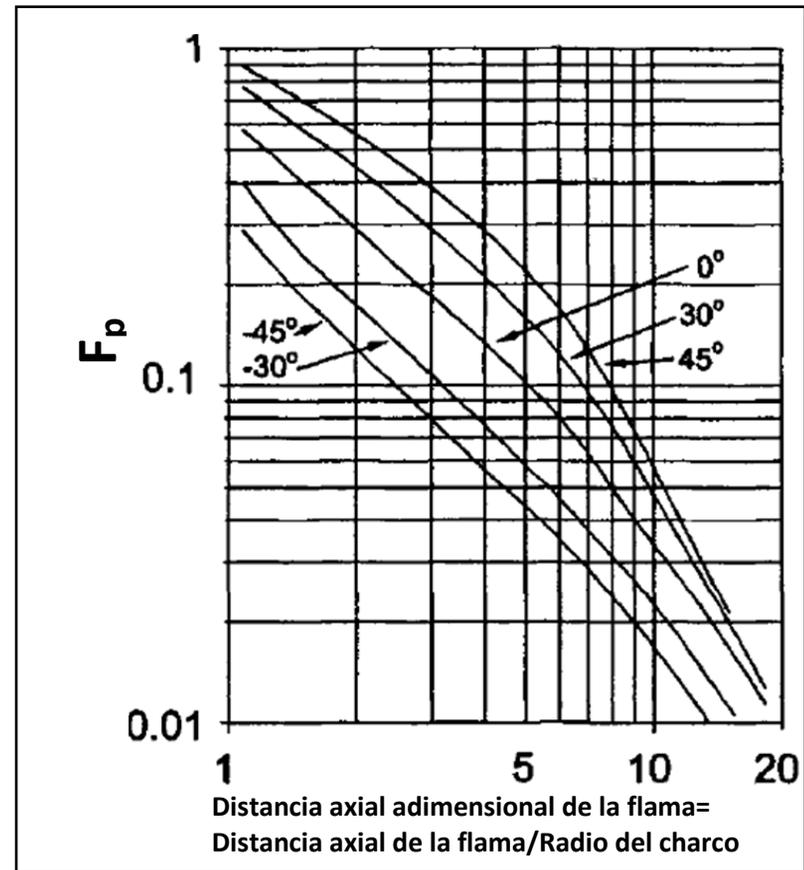


Figura B7. Factor de visión máximo para un receptor a nivel de suelo de una radiación proveniente de un cilindro circular inclinado. (AIChE/CCPS, 2000)

## APÉNDICE C

### C1 Propiedades constantes

Estas son cantidades que definen un material dado. PHAST, usa la base de datos de DIPPR®, Instituto de diseño para datos y propiedades físicas (por sus siglas en inglés, Design Institute for Physical Property Data) para describir dichas sustancias. Cuando se agrega un nuevo material se debe dar un valor para cada propiedad

Tabla C1. Propiedades constantes de los materiales incluidos en PHAST.

General	Inflamable	Tóxico
Temperatura crítica	Límite inferior de Flamabilidad	Concentración tóxico ERPG 1
Presión crítica	Límite superior de Flamabilidad	Concentración tóxico ERPG 2
Punto normal de ebullición	Combustión Ct	Concentración tóxico ERPG 3
Punto de fusión	Combustión At	IDELH
Peso molecular	Calor de combustión	STEL
Ecuación de estado a usar	Eficiencia de Explosión TNT	Propiedad tóxica N
Indicar si el material es inflamable y/o tóxico	Poder superficial emisivo máximo	Propiedad tóxica A
Indicar si el material es reactivo con la atmósfera	Velocidad de longitud de incendio de charco	Propiedad tóxica B
	velocidad máxima de incendio	Coeficiente de respuesta humana 1
	tipo de flama: Luminosa o humeante	Coeficiente de respuesta humana 2
		Factor de debilitamiento 1
		Factor de debilitamiento 2

Asociación ácida	Relación con el agua
Rango de interpolación de entalpía	Tensión superficial agua-líquido
Coeficientes de dímero	Solubilidad en agua
Coeficientes de trímero	Calor de Solución
Coeficientes de hexámero	Coeficiente de transferencia de calor en agua
Coeficientes de octámero	Modelo de reacción con agua

Fuente: (PHAST Help System, v6.1).

### C2 Propiedades Variables

Estas son derivadas de las propiedades constantes usando el sistema de la propiedad elegida, la principal variable es la temperatura, la presión es requerida también en algunas propiedades. El usuario no introduce ningún valor para las propiedades variables, pero los valores que han sido derivados son accesibles para el usuario en el programa PHAST, seleccionando la opción “point property”.

El programa usa las ecuaciones DIPPR para obtener las propiedades variables. Las ecuaciones usadas por el programa son siete, se enlistan en la tabla C2 y las propiedades que se pueden calcular con dichas ecuaciones se listan en la tabla C3.

Tabla C2. Ecuaciones DIPPR para el cálculo de propiedades variables de las sustancias en función de la temperatura.

Número	Ecuación
100	$Y = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4$
101	$Y = \exp\left[A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT^E\right]$
102	$Y = \frac{AT^B}{1 + \frac{C}{T} + \frac{D}{T^2}}$
104	$Y = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^3} + \frac{D}{T^8} + \frac{E}{T^9}$
105	$Y = \frac{A}{B^{[1+(1-T/C)^D]}}$
106	$Y = A(1 - T_r)^{(B + CT_r + DT_r^2 + ET_r^3)}$
107	$Y = A + B\left(\frac{C/T}{\sinh C/T}\right)^2 + D\left(\frac{E/T}{\cosh E/T}\right)^2$
114	$Y = \frac{A^2}{\tau} + B + -2 \cdot A \cdot C \cdot \tau - A \cdot D \cdot \tau^2 - \frac{1}{3} \cdot C^2 \cdot \tau^3 - \frac{1}{2} \cdot C \cdot D \cdot \tau^4 - \frac{1}{5} \cdot D^2 \cdot \tau^5$
116	$Y = A + B \cdot \tau^{0.35} + C \cdot \tau^{\frac{2}{3}} + D \cdot \tau + E \cdot \tau^{\frac{4}{3}}$

Fuente: (PHAST Help System, v6.1).

Donde:

$Y$	=	Es la propiedad
$T$	=	temperatura en K
$T_r$	=	temperatura reducida
$A, B, C, D, E$	=	Coefficientes específicos por sustancia y propiedad
$\tau$	=	1-Tr

Tabla C3. Propiedades fundamentales calculadas a partir de las ecuaciones DIPPR.

Propiedad	Unidades	Ecuación
1 Capacidad calorífica del líquido	kJ/Kg K	100 ó 114
2 Capacidad calorífica del vapor	kJ/Kg K	102
3 Conductividad térmica del vapor	kJ/Kg K	102
4 Conductividad térmica del líquido	kJ/Kg K	100
5 Densidad de líquido	kg/m <sup>3</sup>	105 ó 116
6 Presión de vapor saturado	Pa	101
7 Tensión superficial	dina/cm	100 ó 106
8 Viscosidad del líquido	Pa*s	101
9 Viscosidad del vapor	Pa*s	102
10 Segundo coeficiente virial	m <sup>3</sup> /Kmol	104

Fuente: (PHAST Help System, v6.1).

## APÉNDICE D

### D.1 PERFIL ATMOSFÉRICO

Los perfiles de variación con respecto a la altura, velocidad del viento, presión y temperatura atmosférica, empleados por PHAST, usan la longitud de Monin-Obukhov. Esta es calculada de la fórmula de Haven y Spicer's (1990) y depende de la clase de estabilidad y de la longitud de la rugosidad de la superficie  $z_0$  como se muestra en la figura D1.

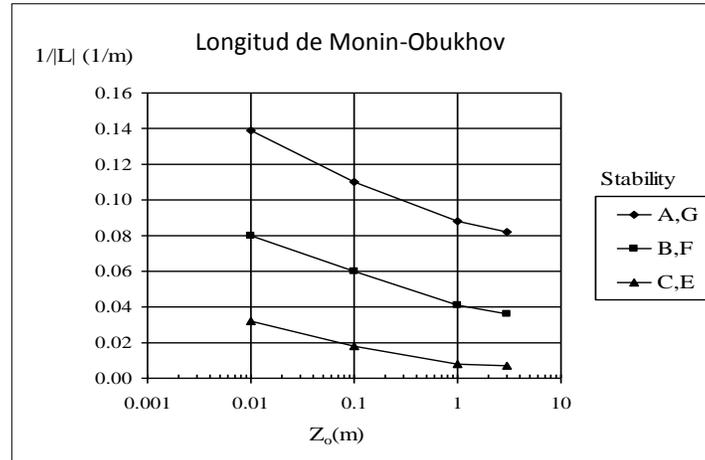


Figura D1. Longitud de Monin-Obukhov en función de la rugosidad de la superficie. (Witlox, 2000)

La figura D1 traza los módulos de la longitud inversa de Monin-Obukhov en función de la longitud de la rugosidad de la superficie para diferentes clases de estabilidad. La longitud de Monin-Obukhov es negativa para estabilidades de clase A a C, y positiva para estabilidades de clase E a G. Para una estabilidad de clase D,  $L=\infty$  (señalado por un valor grande  $L=10^5$ m) mientras que para las condiciones no neutras se adopta la ecuación D1, donde:  $L$  en m y los parámetros  $a_{Monin}$  y  $b_{Monin}$  son dados como una función de la clase de estabilidad en la tabla D1.

$$L = a_{Monin} z_0^{b_{Monin}} \quad D1$$

Tabla D1. Parámetros  $a_{Monin}$  y  $b_{Monin}$  como una función de la clase de estabilidad

Clase de estabilidad	A	A/B	B	B/C	C	C/D	E	F	G
$a_{Monin}$	-11.4	-17.2	-26	-56.5	-123	-425	123	26	11.4
$b_{Monin}$	0.1	0.135	0.17	0.235	0.3	0.375	0.3	0.17	0.1

Fuente: (Witlox, 2000).

El perfil de la ley de potencia es una aproximación logarítmica del perfil del viento dada por:

$$u_a(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) - \Psi \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad D2$$

Donde  $u_*$  es la velocidad de fricción (m/s),  $k$  constante de Von Karman 0.40,  $z_0$  longitud de rugosidad superficial (m),  $L$  longitud de Monin-Obukov (m).

## BIBLIOGRAFÍA

1. AIChE/CCPS, 2000, ***Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 2a. Edición, 754 pp.
2. AIChE/CCPS, 1999, ***Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 1999, 324 pp.
3. AIChE/CCPS, 1994, ***Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVES***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 387 pp.
4. AIChE/CCPS, 2003, ***Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon processing facilities***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 460 pp.
5. AIChE/CCPS, 2008, ***Guidelines for Hazard Evaluation Procedures***, Hoboken, New Jersey: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 3<sup>ra</sup> Edición, 461 pp.
6. AIChE/CCPS, 2000a, ***Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 2a. Edición, 2000, 754 pp.
7. AIChE/CCPS, 1996, ***Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 2<sup>nd</sup> Edition, 292 pp.
8. API, 1996, **API Recommended Practice 521: Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems**, 2nd Ed. Washington: American Petroleum Institute.
9. Bernal Natalio y Edgar Avila, 2005, ***Veracruz: fuga de amoníaco; 5 muertos***, El Universal, Jueves 14 de abril de 2005.
10. Bestratén Belloví Manuel, Turmo Sierra Emilio, NTP 293, ***Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica***, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, Gobierno de España, Junio 2010.  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp\\_293.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/201a300/ntp_293.pdf)
11. BOLETÍN DE PRENSA PEMEX, 2005, ***Se atiende fuga de amoníaco en Nanchital, Veracruz***, 14 de Abril de 2005. Boletín No. 87, PEMEX. (Julio, 2010)

<http://www.pemex.com/index.cfm?action=news&sectionID=8&catID=40&contentID=3045>

12. Crowl, Daniel A., 2003, **Understanding Explosions**, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety New York, 214 pp.
13. DeVaul, George E., et-al, 1995, **Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases**, American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, United States of America, 144 pp.
14. Díaz Alonso Fernando, 2006, Tesis Doctoral: "**Análisis de consecuencias y Zonas de Planificación para explosiones industriales accidentales**", Universidad de Murcia, Mayo 2006. (Julio,2010)  
[http://www.tdr.cesca.es/TDX/TDR\\_UM/TESIS/AVAILABLE/TDR-1019106-125534//DiazAlonso.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TDX/TDR_UM/TESIS/AVAILABLE/TDR-1019106-125534//DiazAlonso.pdf)
15. Frank P. Lees, 1986, **Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assesment and control**, Volume 1, Second Edition, Butterworh-Heinemann, Great Britain.
16. GUIAR, 2010, Grupo de Investigación Analítica de Riesgos, **Analisis de Riesgos**, Universidad de Zaragoza, España, (Junio, 2010). [http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An\\_riesgo/An\\_riesgo.htm](http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_riesgo/An_riesgo.htm)
17. GUIAR, 2010a, Grupo de Investigación Analítica de Riesgos, **Metodologia Probit**, Universidad de Zaragoza, España, (Junio 2010). [http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An\\_conse/Probit.htm](http://www.unizar.es/guiar/1/Accident/An_conse/Probit.htm)
18. H.Keith Lawrence and Douglas B. Walters, 1985, **Compendium of Safety Data Sheets for Research and Industrial Chemicals**.
19. Lacarriere Norberto, **Palabras férreas. Lucio Blanco: Zona minada e ignorada**, Martes, 12 de Agosto de 2008, (Julio 2010).  
<http://radio.autechonline.com/index.php/lasnoticias/47-palabras-ferreas-por-norberto-lacarriere>
20. Mudan, K. S., and P. A. Croce (1988), **Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires**, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Boston, MA: Society of Fire Protection Engineers.
21. NOM-010-STPS-1999, **Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral**. D.O.F. 13-III-2000, (aclaración y fe de erratas D.O.F. 21-VIII-2000).

22. NOM-018-STPS-2000 **Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo**, D.O.F. 27-X-2000. (aclaración D.O.F. 2-I-2001).
23. NRF-018-PEMEX-2007, **Estudios de Riesgo**, Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, Subcomité técnico de Normalización de PEMEX Petroquímica, Enero de 2008.
24. Peña Joaquín, 2005, Aumentan muertos por explosión de pipa en Matamoros, Noticieros Televisa, (Julio 2010) <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/467288.html>
25. PHAST *Help system v6.1*, **Manual del usuario de PHAST**, DNV Version 6.1.
26. **Procedimiento de evaluación de riesgos tecnológicos en el entorno**, Servicio de Protección Civil, Barcelona, Gobierno de España, 2002.
27. Redacción, **Alarma nueva fuga de amoniaco en Veracruz**, Noticieros Televisa. Méx, 15 abril, 2005. (Julio, 2010) <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/439162.html>
28. SEMARNAT 2008, **Guía para la elaboración del estudio de Riesgo Ambiental** (Instalaciones en Operación), Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, , Octubre 2008.
29. Torres Barbosa Armando y Roberto Aguilar Grimaldo, 2005, **Tamaulipas: Explota pipa al chocar contra un tren**, El Universal, Viernes 12 de agosto de 2005.
30. XEPL Noticias, 2005, **Tragedia en Matamoros** XEPL Noticias de Cuauhtémoc, Chihuahua, México, Noticias con la fuerza de la verdad, 12 de Agosto de 2005, (Julio 2010).  
<http://www.xepl.com.mx/completa1.php?s=region&i=23149>
31. Turmo Sierra Emilio, NTP 321: **Explosiones de nubes de vapor no confinadas**: evaluación de la sobrepresión, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, Gobierno de España. (Mayo,2010)  
[http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_321.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_321.pdf)

32. Van den Bosch, C. J. H. and Weterings, R. A. P., 2005. ***Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)***, "Yellow Book", The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO), Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 2.
33. Villa, Alberto A., 2010, **Tetraedro del fuego: Lo básico**, Seguridad Cuatro, Blog de la materia Seguridad IV - Prevención y Extinción de Incendios, jueves 8 de abril de 2010 (Diciembre 2010).  
<http://seguridadcuatro.blogspot.com/2010/04/tetraedro-del-fuego-lo-basico.html>
34. Witlox, Adrian Holt H.W.M., Torstein K. Fanneløp, David Webber, John L. Woodward and Staale Selmer-Olsen, 2000, ***Unified Dispersion Model (UDM), Theory Manual***, DNV Software Products and Development, London UK, January 2000.
35. Woodward, John Lowell, 1998, ***Estimating the Flammable Mass of a Vapor Cloud***, New York: American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety, 298 pp.
36. World Bank (1985), **Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques**, ed. P. J. Kayes. Washington, DC: Office of Environmental and Scientific Affairs, World Bank.