



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

“METODOS PARA LA IDENTIFICACION Y EVALUACION DE RIESGOS EN LOS PROCESOS POR EL MANEJO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS”

T E S I S

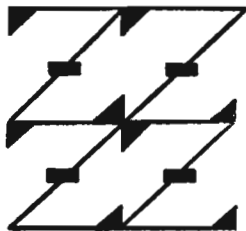
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO

PRESENTAN:

**GUSTAVO ADOLFO PALMA MERCADO
RAUL CASTRO DIAZ**

DIRECTOR DE TESIS:

ING. SERGIO CHAVEZ LOPEZ



LO HUMANO
EJE
DENUESTRA REFLEXION

MEXICO, D. F.

2005

m350403



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/065/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: PALMA MERCADO GUSTAVO ADOLFO

P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. Hugo Héctor Martínez Rojas
VOCAL	Ing. Sergio Chávez López
SECRETARIO	Quim. Carlos Salvador Valadez Sánchez
SUPLENTE	Quim. Martha Ortiz Rojas
SUPLENTE	I.Q. Gonzalo Rafael Coello García

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D.F., 14 de Diciembre del 2004.

EL JEFE DE LA CARRERA

M. EN C. ANDRES AQUINO CANCHOLA





**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/064/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CASTRO DÍAZ RAÚL

P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. Hugo Héctor Martínez Rojas
VOCAL	Ing. Sergio Chávez López
SECRETARIO	Quim. Carlos Salvador Valadez Sánchez
SUPLENTE	Quim. Martha Ortiz Rojas
SUPLENTE	I.Q. Gonzalo Rafael Coello García

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D.F., 14 de Diciembre del 2004.

EL JEFE DE LA CARRERA

M. EN C. ANDRES AQUINO CANCHOLA



AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por ser la luz que guía mi camino y por permitirme llegar a donde estoy.

A MIS PADRES GUSTAVO Y MARÍA DEL CARMEN, por su inagotable apoyo incondicional, aliento y ejemplo constante, sin el cual mi realización profesional no hubiera sido posible. Que Dios los bendiga y mil gracias por ser mis queridos Padres.

A MI MADRE, la parte más importante y querida de mi vida, quien con su compañía, comprensión y cariño me ha impulsado en mi desarrollo personal y profesional. En verdad te reconozco tu labor para conmigo, por ser mi apoyo en los momentos buenos y malos. **TE AMO.**

A MI PADRE, por haberme inculcado los valores éticos y humanos que han sido guía en mi vida y que me han permitido a la vez obtener muchos logros personales y profesionales. Que difícil resulta expresar en tan poco espacio lo que eres y representas para mí, pero quiero que sepas que siempre has sido un ejemplo a seguir. **TE ADMIRO Y TE RESPETO PORQUE ERES UN GRAN HOMBRE.**

A MI HERMANA ERIKA, porque sé que siempre puedo contar contigo. **TE QUIERO.**

A MI ESPOSA XÓCHITL, cuyo apoyo, comprensión y amor me motiva a ser mejor y a seguir siempre adelante. **SIEMPRE CONTIGO.**

A TODA MI FAMILIA: abuelo, tíos, primos, suegros.

A MI ASESOR ING. SERGIO CHÁVEZ LÓPEZ, gracias por su tiempo, apoyo y valiosa colaboración en la realización y culminación de la presente Tesis.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, por permitirme la realización y culminación de mis Estudios Profesionales.

GUSTAVO ADOLFO PALMA MERCADO

AGRADECIMIENTOS

GRACIAS DIOS MÍO, por haberme dado la dicha de vivir y de haber finalizado mis Estudios Profesionales.

A MI PADRE Y A MI MADRE, por haberme dado la mejor herencia que pudieron darme, y por haber sido mi mejor guía en mi vida. A ti Padre que desde donde te encuentres, yo sé que estarás orgulloso de estos momentos tan importantes para mí. Que Dios los bendiga y permita seguir ofreciéndome sabios consejos para alcanzar cada uno de mis proyectos. **PADRE**, he aquí tu sueño y mi promesa cumplida **¡TE EXTRAÑO Y TE AMO!**

A MI ESPOSA, por su gran amor y apoyo para lograr mi desarrollo personal y profesional, porque has sido más que una compañera para mí en momentos buenos y malos. Gracias por tener la paciencia y saber apoyarme con palabras de aliento en momentos difíciles: **TE AMO**, que Dios te bendiga siempre.

AL ING. SERGIO CHÁVEZ LÓPEZ, por su gran apoyo en la realización de este trabajo tan importante y representativo en mi vida.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, por compartir ese gran aprendizaje para mi desarrollo Profesional.

RAÚL CASTRO DÍAZ

CONTENIDO

ABREVIATURAS	5
GLOSARIO DE TÉRMINOS	7
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1: EVALUACIONES DE RIESGO EN LOS PROCESOS: ANTECEDENTES.	18
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN LOS PROCESOS.	23
2.1 <u>METODOLOGÍA DE LISTA DE VERIFICACIÓN (CHECK LIST).</u>	23
2.1.1. Descripción.	23
2.1.2. Propósito.	24
2.1.3. Procedimiento de Análisis.	24
2.1.4. Tipos de Resultados.	25
2.1.5. Requerimientos de Recursos Humanos y Documentales.	25
2.1.6. Aplicación de la Metodología (Ejemplo).	26
2.2 <u>METODOLOGÍA QUE PASA SI...? (WHAT IF...?).</u>	32
2.2.1. Descripción.	32
2.2.2. Propósito.	32
2.2.3. Procedimiento de Análisis.	33
2.2.4. Tipos de Resultados.	35
2.2.5. Requerimientos de Recursos Humanos y Documentales.	35
2.2.6. Aplicación de la Metodología (Ejemplo).	36
2.3 <u>METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE OPERABILIDAD Y RIESGO (HAZOP, HAZARD AND OPERABILITY ANALYSIS).</u>	40
2.3.1. Descripción.	40
2.3.2. Propósito.	41
2.3.3. Procedimiento de Análisis.	41
2.3.4. Tipos de Resultados.	44
2.3.5. Requerimientos de Recursos Humanos y Documentales.	44
2.3.6. Aplicación de la Metodología (Ejemplo).	45
CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS.	49
3.1 <u>FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO.</u>	49

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

3.2	<u>MODELACIONES PARA EL CÁLCULO DE TASAS DE DESCARGA.</u>	51
3.2.1.	Modelos para liberaciones (fugas) en recipientes.	51
3.2.1.1.	Gases.	51
3.2.1.2.	Líquidos.	53
3.2.1.3.	Flujo a dos fases: líquidos saturados en equilibrio y en no equilibrio.	53
3.2.1.4.	Flujo a dos fases: líquidos refrigerados.	55
3.2.1.5.	Consideraciones/Limitaciones de los Modelos para liberaciones (fugas) en recipientes	55
3.2.1.6.	Aplicaciones prácticas de los Modelos para liberaciones (fugas) en recipientes (Ejemplos).	56
3.2.2.	Modelos para liberaciones (fugas) en tuberías.	69
3.2.2.1.	Gases.	69
3.2.2.2.	Líquidos	71
3.2.2.3.	Flujo a dos fases.	72
3.2.2.4.	Consideraciones/Limitaciones de los Modelos para liberaciones (fugas) en tuberías.	73
3.2.2.5.	Aplicaciones prácticas de los Modelos para liberaciones (fugas) en tuberías (Ejemplos).	74
3.2.3.	Secuencia a seguir para la aplicación de los Modelos para el Cálculo de Tasas de Descarga.	82
3.3	<u>MODELACIONES PARA EL CÁLCULO DE DERRAMES (FORMACIÓN DE CHARCOS DE LÍQUIDO) Y DE LA TASA DE EVAPORACIÓN.</u>	83
3.3.1.	Generalidades.	83
3.3.2.	Modelo Shaw & Briscoe (SB) para un derrame en agua de líquidos en ebullición.	85
3.3.3.	Modelo Shaw & Briscoe (SB) para un derrame en tierra de líquidos en ebullición.	88
3.3.4.	Consideraciones/Limitaciones de los Modelos SB.	93
3.3.5.	Modelo Sutton para un derrame en tierra de líquidos en no ebullición.	94
3.3.6.	Consideraciones/Limitaciones del Modelo Sutton.	96
3.3.7.	Modelo Clewell para un derrame en tierra de líquidos en no ebullición.	96
3.3.8.	Consideraciones/Limitaciones del Modelo Clewell.	97
3.3.9.	Secuencia a seguir para la aplicación de los Modelos para el Cálculo de Derrames (formación de charcos de líquido) y de la Tasa de Evaporación.	98
3.3.10.	Aplicaciones prácticas de los Modelos para el Cálculo de Derrames (formación de charcos de líquido) y de la Tasa de Evaporación (Ejemplos).	98
3.4	<u>MODELACIONES PARA FUEGOS.</u>	104
3.4.1.	Fundamentos.	104
3.4.2.	Modelación para charcos de fuego (Pool Fires).	111
3.4.2.1.	Consideraciones/Limitaciones del Modelo para charcos de fuego.	123
3.4.2.2.	Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo para charcos de fuego.	123
3.4.2.3.	Aplicación práctica del Modelo para charcos de fuego (Ejemplo).	124

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

3.4.3.	<i>Modelaciones para fuegos "jet" (Jet Fires).</i>	137
3.4.3.1.	<i>Modelo API.</i>	137
3.4.3.1.1.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo API.</i>	143
3.4.3.1.2.	<i>Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo API.</i>	143
3.4.3.1.3.	<i>Aplicación práctica del Modelo API (Ejemplo).</i>	144
3.4.3.2.	<i>Modelo TNO.</i>	150
3.4.3.2.1.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo TNO.</i>	153
3.4.3.2.2.	<i>Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo TNO.</i>	154
3.4.3.2.3.	<i>Aplicación práctica del Modelo TNO (Ejemplo).</i>	154
3.4.4.	<i>Modelaciones para "Bolas de Fuego" (Fireballs).</i>	159
3.4.4.1.	<i>Modelo.</i>	159
3.4.4.2.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo para Bolas de Fuego.</i>	161
3.4.4.3.	<i>Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo para Bolas de Fuego.</i>	161
3.4.4.4.	<i>Aplicación práctica del Modelo para Bolas de Fuego (Ejemplo).</i>	161
3.4.5.	<i>Modelación para fuegos "Flash" (Flash Fires).</i>	164
3.4.5.1.	<i>Consideraciones.</i>	164
3.4.5.2.	<i>Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo para Flash Fires.</i>	164
3.4.5.3.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo para Flash Fires.</i>	164
3.4.6.	<i>Medidas para la Prevención y Mitigación de Fuegos.</i>	165
3.5	<u>MODELACIONES PARA EXPLOSIONES.</u>	166
3.5.1.	<i>Fundamentos.</i>	166
3.5.2.	<i>Modelo para Explosión Física.</i>	178
3.5.2.1.	<i>Procedimiento para aplicar el Modelo de Explosión Física.</i>	179
3.5.2.2.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo para Explosión Física.</i>	179
3.5.2.3.	<i>Aplicación práctica del Modelo para Explosión Física (Ejemplo).</i>	180
3.5.3.	<i>Modelación para Explosiones de Vapores en Expansión de Líquidos en Ebullición (Boiling Liquid Expanding Vapors Explosions, BLEVE's).</i>	182
3.5.4.	<i>Modelaciones para Explosiones de Nubes de Vapor.</i>	183
3.5.4.1.	<i>Modelo de Equivalencia TNT.</i>	183
3.5.4.1.1.	<i>Procedimiento para aplicar el Modelo de Equivalencia TNT.</i>	184
3.5.4.1.2.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo de Equivalencia TNT.</i>	186
3.5.4.1.3.	<i>Aplicación práctica del Modelo de Equivalencia TNT (Ejemplo).</i>	186

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

3.5.4.2.	<i>Modelo de Correlación TNO.</i>	188
3.5.4.2.1.	<i>Procedimiento para aplicar el Modelo de Correlación TNO.</i>	188
3.5.4.2.2.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo de Correlación TNO.</i>	189
3.5.4.2.3.	<i>Aplicación práctica del Modelo de Correlación TNO (Ejemplo).</i>	189
3.5.4.3.	<i>Modelo de Multienergía TNO.</i>	191
3.5.4.3.1.	<i>Procedimiento para aplicar el Modelo de Multienergía TNO.</i>	192
3.5.4.3.2.	<i>Consideraciones/Limitaciones del Modelo de Multienergía TNO.</i>	193
3.5.4.3.3.	<i>Aplicación práctica del Modelo de Multienergía TNO (Ejemplo).</i>	196
CAPÍTULO 4: EFECTOS POR RADLACIONES TÉRMICAS, SOBREPRESIONES Y TOXICIDAD.		201
4.1	<u><i>EFECTOS POR RADLACIONES TÉRMICAS (FUEGOS/INCENDIOS).</i></u>	201
4.1.1.	<i>Fundamentos y Consideraciones.</i>	201
4.1.2.	<i>Evaluación de daños por Radiación Térmica (Ejemplo).</i>	207
4.2	<u><i>EFECTOS POR SOBREPRESIONES (EXPLOSIONES).</i></u>	209
4.2.1.	<i>Fundamentos y Consideraciones.</i>	209
4.2.2.	<i>Evaluación de daños por Sobrepresión (Ejemplo).</i>	215
4.3	<u><i>EFECTOS TÓXICOS.</i></u>	220
4.3.1.	<i>Fundamentos y Consideraciones.</i>	220
4.3.2.	<i>Evaluación de daños por Toxicidad (Ejemplo).</i>	223
APÉNDICES		
"A"	<u><i>EJEMPLOS DE FALLAS DE COMPONENTES Y ESCENARIOS DE FUGAS ACCIDENTALES.</i></u>	225
"B"	<u><i>TABLAS DE FACTORES DE VISTA GEOMÉTRICOS (F) PARA MODELACIONES DE CHARCOS DE FUEGO (POOL FIRES).</i></u>	231
BIBLIOGRAFÍA		242

ABREVIATURAS

AAR:	Actividades Altamente Riesgosas.
API:	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo).
BLEVE:	Boiling Liquid Expanding Vapors Explosion (Explosión de Vapores en Expansión de Líquidos en Ebullición).
CCPS:	Center for Chemical Process Safety (Centro para la Seguridad en los Procesos Químicos).
Cl₂:	Cloro.
CO₂:	Bióxido de Carbono.
CPQRA:	Chemical Process Quantitative Risk Analysis (Análisis de Riesgo Cuantitativo para Procesos Químicos).
DAP:	Fosfato de Diamonio.
DDV:	Derecho de Vía.
DFP:	Diagramas de Flujo de Proceso.
D. N.:	Diámetro Nominal.
DTI:	Diagramas de Tubería e Instrumentación.
EER:	Estudio de Evaluación de Riesgos.
ER:	Evaluación de Riesgos.
FEMA:	Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal de Administración de Emergencias).
HCV:	Válvula de Control Hidráulico.
LAH:	Alarma por Alto Nivel.
LI:	Indicador de Nivel.
LII:	Límite Inferior de Inflamabilidad.
LPG:	Gas Licuado del Petróleo.
LSI:	Límite Superior de Inflamabilidad.
MBD:	Miles de Barriles por Día.
N₂:	Nitrógeno.
NFPA:	Nacional Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra el Fuego).

PI:	Indicador de Presión.
PCV:	Válvula de Control de Presión.
PROBIT:	Probability unit (Unidad de Probabilidad).
SFPE:	Society of Fire Protection Engineering (Sociedad de Ingeniería de Protección contra el Fuego).
TNO:	The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (Organización Holandesa de Investigación Científica Aplicada).
TNT:	Trinitrotolueno.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACCIDENTE: Evento no planeado ó secuencia de eventos que resultan en consecuencias indeseables. Un incidente con consecuencias ó impactos específicos contra la seguridad.

ADMINISTRACIÓN DEL RIESGO: Aplicación sistemática de políticas, procedimientos, y/o prácticas administrativas para las tareas de análisis, evaluación y control de riesgos, tendientes a proteger a los empleados, público en general, medio ambiente y/o bienes de la Compañía.

ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS: Análisis de los efectos de incidentes, independientemente de la frecuencia ó la probabilidad.

ANÁLISIS DE RIESGO CUANTITATIVO: Desarrollo sistemático de estimados numéricos relacionados con la frecuencia y/ó consecuencia esperadas resultantes de accidentes potenciales asociados con una instalación u operación.

CANTIDAD DE REPORTE: Cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transporte dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

CONSECUENCIA: Resultado indeseable directo producto de una secuencia de accidentes que usualmente involucran un fuego, explosión ó liberación de un material tóxico. Las descripciones de las consecuencias pueden ser estimados cualitativos ó cuantitativos de los efectos de un accidente en términos de factores tales como: impactos a la salud, pérdidas económicas y así como también daño al medio ambiente.

CONTROL ADMINISTRATIVO: Procedimiento para dirigir y/o revisar sistemas de ingeniería ó desempeño humano asociados con las operaciones de una instalación.

CONTROL DE INGENIERÍA: Sistema específico de software ó hardware diseñado para mantener un proceso dentro de los límites de operación seguros, así como para reducir la exposición humana a los efectos de un incidente.

ERROR HUMANO: Cualquier acción humana, ó falta de la misma, que excede algún límite de aceptabilidad, es decir, una acción fuera de tolerancia en donde los límites del desempeño humano son definidos por el sistema.

EVALUACIÓN DE RIESGOS: Proceso por el cual los resultados de un análisis de riesgos son empleados para la toma de decisiones. Análisis del significado de situaciones riesgosas asociadas con un proceso ó actividad.

EVENTO: Una ocurrencia relacionada con el funcionamiento de un equipo o con una acción humana. Ocurrencia externa al sistema que le causa un desorden a éste.

EVENTO EPISÓDICO: Evento no planeado de duración limitada y usualmente asociado con un accidente.

EVENTO EXTERNO: Evento causado por un riesgo natural (sismos, tornados, temperaturas extremas ó inundaciones), ó por eventos inducidos por personas (choques aéreos, misiles, sabotaje, fuego, actividad industrial cercana, etc.).

EVENTO INICIADOR: El primer evento en una secuencia que puede resultar en un accidente a menos que los sistemas de protección instalados y/o las acciones humanas actúen oportunamente para prevenir ó mitigar el accidente.

EVENTO INTERMEDIO: Un evento que propaga ó mitiga el evento iniciador, durante una secuencia de accidentes.

FRECUENCIA: El número de ocurrencias por unidad de tiempo.

HAZOP: Método sistemático en el cual, los riesgos de proceso y los problemas potenciales de operación, son identificados empleando una serie de palabras guía para investigar las desviaciones de proceso.

IDENTIFICACIÓN DE RIEGOS: Localización precisa del material, sistema, proceso y/o características de una instalación que pueden producir consecuencias indeseables, por la ocurrencia de un accidente.

LIBERACIÓN EPISÓDICA: Liberación, de duración limitada, usualmente asociada con un accidente.

LISTA DE VERIFICACIÓN: Lista detallada de aspectos específicos (equipo, proceso, seguridad, etc.), empleada para evaluar la aceptabilidad o situación de un sistema u operación, comparada con normas establecidas.

MANEJO: Alguna o el conjunto de las actividades siguientes: producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso ó disposición final de sustancias peligrosas.

PELIGRO: Es una característica física o química, inherente, que tiene el potencial de causar daño a: la gente, la propiedad y el medio ambiente

PROBABILIDAD: Una medida de la frecuencia esperada de la ocurrencia de eventos.

RIESGO: Combinación de la frecuencia esperada (eventos por año) y la consecuencia (efectos por evento) de un solo accidente o de un grupo de accidentes. Es la medida cuantitativa de la consecuencia del peligro, medido en términos de probabilidad o frecuencia y magnitud o gravedad.

RIESGO AGUDO: Potencial para lesión ó daño, como resultado de una exposición (instantánea o de corta duración) a los efectos de un accidente.

RIESGO CRÓNICO: Potencial para lesión ó daño, como resultado de una exposición prolongada a una condición indeseable.

SECUENCIA DE EVENTOS: Series específicas y no planeadas de eventos, compuestos por un evento iniciador y por eventos intermedios, los cuales pueden conducir a un incidente.

SISTEMA DE MITIGACIÓN: Equipo y/ó procedimientos diseñados para interferir con la propagación de un accidente y/o para reducir las consecuencias de un incidente.

SISTEMA DE SEGURIDAD: Equipo y/o procedimientos diseñados para limitar o terminar una secuencia de accidentes, para de esta manera mitigar al accidente y sus consecuencias.

SUSTANCIA PELIGROSA: Aquella que por sus altos índices de inflamabilidad, explosividad, toxicidad, reactividad, radioactividad, corrosividad o acción biológica, puede ocasionar una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes.

TEMPERATURA DE AUTOIGNICIÓN: La temperatura más baja a la cual una mezcla de combustible/oxidante se prenderá espontáneamente, bajo condiciones de prueba especificadas.

INTRODUCCIÓN

La identificación y evaluación de riesgos en los procesos, forman parte de los Programas de Prevención tendientes a una adecuada administración del riesgo en el manejo de sustancias peligrosas. Al respecto, los aspectos que complementan dichos Programas son:

1. ***Información de Seguridad del Proceso*** (riesgos de las sustancias peligrosas manejadas, tecnología del proceso y equipo de proceso).
2. ***Estudios de Evaluación de Riesgos*** (dentro de los cuales se incluye la ***identificación, evaluación y control de los riesgos*** involucrados en un proceso)
3. ***Procedimientos de Operación*** (arranque, operaciones normales y de emergencia, puesta fuera de operación, etc.).
4. ***Entrenamiento*** (capacitación inicial para personal asignado a un nuevo proceso, programas anuales para reafirmar el conocimiento y documentación de la capacitación impartida).
5. ***Integridad Mecánica para recipientes a presión, tanques de almacenamiento, bombas, sistemas de tuberías, sistemas y dispositivos de venteo y relevo, sistemas de emergencia y controles*** (procedimientos escritos, capacitación para actividades de mantenimiento, inspección y prueba, deficiencias de equipo, aseguramiento de la calidad).
6. ***Administración del cambio para químicos del proceso, tecnología, equipo y procedimientos*** (bases técnicas, impacto del cambio sobre la salud y la seguridad, modificaciones a procedimientos operativos, tiempo necesario para el cambio y requerimientos de autorización).
7. ***Auditorías*** (para verificar que los procedimientos y prácticas llevadas a cabo son adecuados).
8. ***Investigación de Incidentes*** (generación de un reporte dentro del cual se incluya la siguiente información: fecha del incidente, fecha en que se inició la investigación, descripción del incidente, factores que contribuyeron al incidente y recomendaciones resultantes de la investigación).

9. **Participación de los Empleados** (consulta con los empleados o sus representantes, sobre la conducta y desarrollo tanto de los análisis de riesgo en los procesos como de los otros elementos de administración de seguridad del proceso).
10. **Contratistas** (personal capacitado; conocimiento de riesgos fuego, explosión y/o liberación tóxica; seguimiento a reglas de seguridad; control de entradas, permanencia y salidas, etc.).
11. **Programa de Respuesta a Emergencias** (procedimientos para notificación de fugas a público y dependencias de respuesta a emergencias; documentación de primeros auxilios y tratamiento médico de emergencia; procedimientos y medidas para respuesta a emergencias después de una fuga; procedimientos para el uso de equipo de respuesta a emergencias y para su inspección, prueba y mantenimiento; capacitación para todos los empleados en procedimientos relevantes, etc.).

Estudios de Evaluación de Riesgos (EER)

Los Estudios de Evaluación de Riesgos son utilizados para resaltar las debilidades en el diseño y/o en la operación de las instalaciones, las cuales pueden guiar a: liberaciones accidentales (fugas) de sustancias químicas, derrames, fuegos y/o explosiones. Estos estudios proporcionan información para ayudar a mejorar la seguridad y el manejo del o de los riesgos en una actividad dada. Asimismo, estos estudios complementan las actividades más tradicionales de salud y seguridad, tales como: protección contra caídas, resbalones, uso del equipo de protección personal, monitoreo de la exposición de los empleados a las sustancias químicas, etc.

Muchas técnicas de evaluación de riesgos (ER) también pueden ser usadas para ayudar a satisfacer las necesidades relacionadas con: la operabilidad, la economía y los aspectos ambientales. La ER, típicamente, utiliza métodos cualitativos para analizar las fallas potenciales de los equipos y los errores humanos que pueden guiar a accidentes. Los estudios también pueden hallar las áreas de desequilibrio en los sistemas administrativos de la organización dentro de un programa de administración de seguridad en los procesos. Por ejemplo, una ER, de un proceso existente, puede revelar las fallas en la administración de las instalaciones y/o las deficiencias en las prácticas de mantenimiento.

Un requisito importante, para realizar un EER, es la identificación de los riesgos. Los riesgos que no han sido identificados no pueden ser estudiados. Una evaluación sistemática y eficiente de los riesgos, precedida de un esfuerzo detallado de identificación de riesgos, puede incrementar la confianza de la gerencia ó administración de una empresa en cuanto a su habilidad para manejar el riesgo en sus instalaciones.

Una parte muy importante al llevar a cabo una ER a través de las diversas etapas de un proyecto ó de una planta en operación, es la de conocer cual es la mejor técnica para el estudio.

Los estudios de evaluación de riesgos usualmente, se enfocan en las causas y consecuencias de los eventos episódicos (por ejemplo: liberación accidental de un químico), en lugar de los efectos potenciales de las condiciones que pueden existir rutinariamente (por ejemplo: contaminante emitido a partir de un punto de emisión registrado) u ocurrir ocasionalmente en las instalaciones. De esta manera, los estudios de riesgo usualmente no consideran los aspectos relacionados con la salud industrial y/o la seguridad.

Elementos de un Accidente de Proceso

Los métodos de evaluación de riesgos pueden ayudar a las organizaciones a entender mejor los riesgos, asociados con un proceso, y así como también a reducir la frecuencia y las consecuencias de los accidentes potenciales.

Un riesgo de proceso representa una amenaza potencial a la gente, a la propiedad y al medio ambiente. Normalmente, hay una relación directa entre la magnitud de los riesgos de proceso y la severidad de un accidente; por ejemplo: el inventario más grande de un material peligroso, y las condiciones físicas más severas bajo las cuales el material es manejado. El primer evento en una secuencia de accidente es el llamado evento iniciador. Hay varias clases de eventos que pueden iniciar accidentes: fallas del equipo ó de software, fallas en los sistemas de administración, errores humanos y eventos externos.

Por otra parte, los eventos intermedios pueden dividirse en dos clases: *factores de propagación y factores de reducción de riesgos.*

Los factores de propagación son:

- Fallas de las medidas establecidas de protección (por ejemplo, error de operación ó falla de válvula de relevo).
- Circunstancias que exacerban la consecuencia de una secuencia de accidente (por ejemplo, condiciones meteorológicas pobres).

Los factores de reducción de riesgos son:

- Respuestas efectivas de los sistemas de seguridad de ingeniería y de los controles administrativos.
- Circunstancias fortuitas que reducen ya sea la frecuencia esperada de la secuencia de accidentes, ó la severidad de las consecuencias del accidente (por ejemplo: no se estaba ahí cuando el accidente sucedió).

Evaluación de Riesgos durante las Etapas de un Proyecto.

Una parte importante de los estudios de evaluación de riesgos, durante las diversas etapas de un proyecto, es la de conocer que técnica es la mejor para el estudio. Uno de los factores más importantes, que influyen en cual técnica elegir, es saber cuanta información está disponible para realizar el trabajo. Algunos métodos de evaluación de riesgos pueden ser inapropiados ó imposibles de ejecutar, en una etapa en particular del proceso, debido a información inadecuada ó inapropiada del mismo.

Objetivos de Análisis y Alcances.

El objetivo primordial para un estudio de evaluación de riesgos depende de varios factores, incluyendo en que etapa se encuentra el proyecto cuando la evaluación de riesgos es realizada. Obviamente, como un proyecto evoluciona, los tipos de situaciones riesgosas cambian de situaciones generales, acerca de la química básica del proceso, a aspectos más detallados relacionados con el equipo y los procedimientos.

Si los objetivos deseados y el alcance no pueden ser finalizados en el tiempo disponible, empleando la técnica de evaluación de riesgos más apropiada, entonces la administración debe proporcionar recursos de análisis adicionales ó, quizá, revisar los objetivos de análisis y así como también los alcances.

Requerimientos de Información.

Los estudios de evaluación de riesgos pueden ser realizados usando información disponible del proceso, incluyendo DFP's, datos químicos del proceso, diagramas de tubería, instrumentación y control, hojas de datos, especificaciones de equipo y así como también procedimientos en general. Otra información, tal como los planos de localización y reportes de incidentes, proporcionan, a los evaluadores, una mayor perspectiva sobre riesgos potenciales.

En la actualidad, la calidad de cualquier evaluación de riesgos depende directamente de la calidad de la información disponible para el(los) analista(s). Un sistema para recopilar y documentar la información de un proceso, resulta ser una parte clave de la infraestructura necesaria para apoyar un programa de evaluación de riesgos.

Requerimientos Humanos.

El nivel y tipos de conocimientos que el personal debe tener para participar en un EER, depende de varios factores, incluyendo el tipo de proceso u operación analizada, la técnica seleccionada, así como el objetivo del análisis. Los EER de la más alta calidad requieren de los esfuerzos combinados de un equipo multidisciplinario, estructurado básicamente por los siguientes participantes:

- *Líder*, el cual proporciona tanto dirección para el análisis como organiza y ejecuta actividades de análisis. Normalmente, el líder del equipo es el miembro más experimentado en la aplicación de la técnica de evaluación de riesgos seleccionada.
- *Escritor*, el cual documenta formalmente las discusiones que toman lugar en las reuniones de evaluación de riesgos.
- *Expertos (químico, ingenieros civil, eléctrico, mecánico, de proceso, de seguridad, etc.)*, los cuales son seleccionados por su conocimiento específico acerca de algún aspecto del proceso que se este analizando, tal como química del proceso, diseño de equipo, procedimientos operativos, estrategia de control ó prácticas de mantenimiento.

En términos generales, el equipo debe estar integrado por miembros con experiencia práctica en operaciones, mantenimiento e ingeniería, así como con personal con conocimiento especial acerca de aspectos tales como: química del proceso, inspección, instrumentación, regulaciones ambientales y estándares tanto de seguridad industrial como corporativos.

Marco Legal

En México, la regulación de las actividades que se consideran altamente riesgosas, por la magnitud o gravedad de los efectos que puedan generar en el equilibrio ecológico o el ambiente, está contemplada dentro del Título Cuarto (Protección al Ambiente), Capítulo V (Actividades consideradas como altamente riesgosas) de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Al respecto, se considera como Actividad Altamente Riesgosa (AAR), el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte.

Dichas sustancias y sus cantidades de reporte, se encuentran consignadas en el *primero y segundo listados de Actividades Altamente Riesgosas*, publicados en el Diario Oficial de la Federación el 28 de marzo de 1990 para sustancias tóxicas y el 04 de mayo de 1992 para sustancias inflamables y explosivas.

Bajo el contexto citado con anterioridad, las actividades de *identificación y evaluación de riesgos* en la realización de AAR, son consideradas dentro de un Estudio de Riesgo Ambiental (SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). Dicho estudio está compuesto por dos partes:

1. Aquella en donde se emplean una serie de metodologías de tipo cualitativo y cuantitativo para identificar y jerarquizar riesgos, y
2. Análisis de Consecuencias, en donde se utilizan modelos matemáticos de simulación para cuantificar y estimar dichas consecuencias.

El objetivo fundamental de la Evaluación del Riesgo Ambiental, es definir y proponer la adopción de un conjunto de medidas preventivas que permitan prevenir, o incluso evitar, los riesgos a la sociedad y el ambiente.

1

EVALUACIONES DE RIESGO EN LOS PROCESOS: ANTECEDENTES

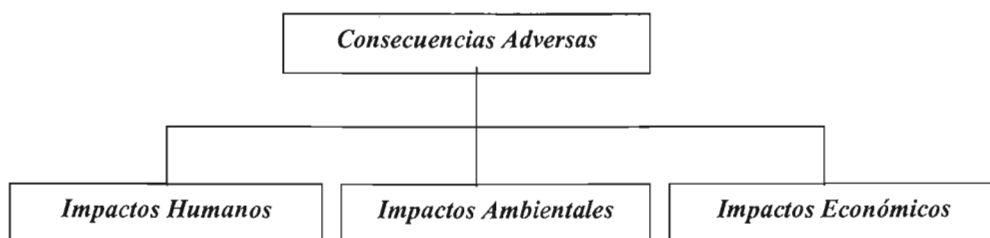
Métodos y Resultados de la Identificación de Riesgos

La identificación de riesgos involucra dos tareas clave:

1. Identificación de consecuencias específicas no deseadas.
2. Identificación de: materiales, sistemas, procesos y/o características de la instalación, que puedan producir dichas consecuencias.

La primera tarea es relativamente fácil, pero es esencial dado que esta define los alcances de la segunda tarea. Las consecuencias no deseadas pueden clasificarse básicamente en impactos: humanos, ambientales y económicos. Dentro de esta clasificación, pueden encontrarse categorías de consecuencias específicas adversas, como se muestra en la Figura 1:

FIGURA 1



Impactos Humanos: Lesiones a: consumidores, comunidad y personal en general, y así como también pérdidas de empleos y efectos psicológicos.

Impactos Ambientales: Contaminación interna y externa de: aire, agua y suelo.

Impactos Económicos: Daño a propiedad, pérdida de inventario, paro de producción, calidad pobre del producto, pérdida de mercado, imagen negativa y responsabilidad legal.

Cada una de estas categorías pueden, además, subdividirse por el tipo de daño que pueden producir (por ejemplo: exposición tóxica, exposición térmica, sobrepresión, fuerza mecánica, radiación y choque eléctrico). De esta manera, las consecuencias de interés son definidas, lo cual facilita la tarea de identificación de riesgos.

A menos que las consecuencias de interés sean definidas, el analista puede identificar aquéllos sistemas, procesos y/o características de la instalación que pueden ser un riesgo de interés. Por eso, es esencial que la técnica de identificación de riesgos sea bastante completa para identificar todos los riesgos importantes. Sin embargo, si la aproximación (técnica) no proporciona alguna discriminación entre los riesgos, más y menos importantes, entonces los intentos de evaluación de riesgos subsecuentemente serán confusos por el número de riesgos potenciales a ser examinados. Los métodos más comunes para la identificación de riesgos incluyen el análisis de las propiedades de los materiales de proceso y así como también de las condiciones de proceso, la revisión de la experiencia de una Empresa en la industria, desarrollo de matrices de interacción, y aplicación de técnicas de evaluación de riesgos.

Un factor importante, para el uso de éstas técnicas, es conocer la complejidad y el tamaño del sistema a analizar:

- *Sistema Simple o Pequeño:* Un ejemplo de estos sistemas es un área de almacenamiento y descarga, conformada por: una estación de ferrocarril, líneas de transferencia, bombas, tanques de almacenamiento y así como también líneas de retorno y control de vapor a presión.
- *Sistema Complejo o Grande:* Un ejemplo de este sistema es un proceso en donde se llevan a cabo reacciones químicas, conformado por un sistema de alimentación, una sección de reacción, un área de separación y recuperación del producto, sistema de

alivio de emergencia, tubería de conexión roscada y sistemas de control. Este proceso incluye, dentro de su infraestructura, de 10 a 20 recipientes mayores incluyendo reactores, columnas y acumuladores.

Cada técnica de ER se lleva a cabo básicamente en 3 fases:

1. *Preparación:* En donde se llevan a cabo actividades tales como: recopilación de información, definición del alcance del análisis y organización de reuniones.
2. *Evaluación:* En donde se incluye el análisis de actividades relacionadas con la técnica de ER seleccionada (por ejemplo: reuniones con el equipo analizador).
3. *Documentación:* En donde no solamente se lleva a cabo el registro de los resultados, del equipo analizador, sino también el desarrollo, la revisión y finalización del uso de la técnica de ER seleccionada y de su reporte correspondiente. Dicho reporte contiene: una descripción breve del proceso, una sinopsis de los resultados importantes, una breve explicación del significado de los puntos de desarrollo y los resultados de la técnica.

Empleo de las Técnicas de Evaluación de Riesgos para Identificar Riesgos.

Las tres técnicas que más se utilizan, desde el punto de vista cualitativo, para la identificación de riesgos son:

- *Listas de verificación (CHECK LIST).*
- *¿Qué pasa si..? ó ¿Qué pasaría si..? (WHAT IF..?).*
- *Análisis de operabilidad y riesgo (HAZOP).*

Los resultados que se obtienen con la aplicación de estas metodologías son dictados por el tipo y la calidad de la información empleada.

La técnica de análisis de *Lista de Verificación (CHECK LIST)*, proporciona una lista de preguntas y aspectos que deben resolverse por cada químico en el proceso y para el proceso como un todo. La desventaja de esta técnica es que ninguna Lista de Verificación puede anticipar cada situación potencialmente riesgosa. Las Listas de

Verificación, más completas, también tienden a ser muy amplias, lo cual hace tedioso el completarlas; sin embargo, las Listas de Verificación pueden adaptarse para un proceso ó Compañía en particular.

Dado que las técnicas de análisis *¿Qué pasa si...? (WHAT IF...?)* y *Análisis de Operabilidad y Riesgo (HAZOP)* son procesos creativos, tienden a revelar riesgos no esperados ó únicos dentro de un proceso. Sin embargo, y a menos que el líder del equipo tenga una amplia experiencia y los miembros del equipo cuenten con una experiencia apropiada, los riesgos importantes podrán ser determinados.

En general, no es eficiente emplear estas técnicas con el solo propósito de identificar riesgos cuando se cuenta con información adecuada para el equipo, respecto a la ejecución de las tareas de identificación y evaluación de riesgos. Sin embargo, y cuando la información es limitada, como puede ser el caso de procesos nuevos ó diseños conceptuales de nuevas unidades, las técnicas de evaluación de riesgos pueden usarse efectivamente para identificar riesgos tanto como los analistas lo deseen, limitando su estudio a un nivel general de detalle.

Resultados Característicos de la Identificación de Riesgos.

Usualmente, los esfuerzos para la identificación de riesgos resultan en listas simples de materiales ó condiciones que pueden resultar en situaciones riesgosas:

- Lista de materiales inflamables.
- Lista de materiales tóxicos y por productos.
- Lista de reacciones peligrosas.
- Lista de químicos y cantidades que deben ser reportadas si se liberan al medio ambiente.
- Lista de riesgos (toxicidad, inflamabilidad) asociados con un sistema.
- Lista de contaminantes y condiciones de proceso que pueden conducir a una reacción en cadena.

Un analista puede usar estos resultados para definir el alcance apropiado y seleccionar la técnica apropiada para realizar un estudio de evaluación de riesgos. En general, el alcance y la complejidad de los estudios, subsecuentes, de evaluación de riesgos será directamente proporcional al número y tipo de riesgos identificados y así como también a la profundidad con la cual éstos sean entendidos. Si el grado de algunos riesgos es desconocido (por ejemplo: el efecto de una transferencia de calor incompatible por la fuga de un fluido en el proceso), puede requerirse investigación adicional antes de que la evaluación de riesgo pueda proceder.

2

METODOLOGÍAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN LOS PROCESOS

2.1 METODOLOGÍA DE LISTA DE VERIFICACIÓN (CHECK LIST).

2.1.1. Descripción.

Un análisis de Lista de Verificación emplea una serie de puntos o pasos, de un procedimiento, para verificar el estatus de un sistema. Las Listas de Verificación, tradicionales, varían ampliamente en su nivel de detalle, y son frecuentemente empleadas para indicar el cumplimiento con estándares y prácticas. Esta técnica es fácil de usar, y puede aplicarse en cualquier etapa de un proceso o proyecto. A la vez, las Listas de Verificación pueden emplearse para familiarizar a personal inexperto con un proceso dado, comparando los atributos de un proceso con varios requerimientos establecidos dentro de la Lista de Verificación.

Una Lista de Verificación detallada, proporciona las bases para una evaluación estándar de riesgos de proceso. Por otra parte, las Listas de Verificación de riesgo genéricas, a menudo son combinadas con otras técnicas de identificación de riesgos para evaluar situaciones peligrosas; asimismo, son limitadas por la experiencia de quien las estructura, por lo que se requiere amplia experiencia y gran conocimiento del personal encargado de dicha tarea. Las Listas de Verificación deben auditarse y actualizarse regularmente.

Muchas organizaciones utilizan Listas de Verificación, estándar, para controlar el desarrollo de un proyecto (desde el diseño inicial hasta el desmantelamiento de la planta). Las Listas de Verificación completadas (llenas), deben ser con frecuencia aprobadas por varios miembros del equipo y gerentes antes de que un proyecto pase a una siguiente etapa, sirviendo por lo tanto como medio de comunicación y como forma de control.

2.1.2. Propósito.

Las Listas de Verificación, tradicionales, son usadas primeramente para asegurar que las organizaciones cumplan con normas y/o prácticas estándar. En algunos casos, los analistas usan una Lista de Verificación, más general, en combinación con otro método de evaluación de riesgos, para descubrir los riesgos más comunes que una Lista de Verificación puede no determinar.

2.1.3. Procedimiento de Análisis.

Una vez que el alcance del análisis ha sido definido, la Lista de Verificación consta de 3 pasos principales:

1. Selección ó desarrollo de una Lista de Verificación apropiada.

El analista debe seleccionar una Lista de Verificación, apropiada, a partir de recursos disponibles (estándares internos, códigos de consenso, lineamientos industriales). Si no existe una Lista de Verificación, específica ó relevante, entonces el analista debe usar su propia experiencia y la información disponible, de referencias autorizadas, para generar una Lista de Verificación apropiada.

Una Lista de Verificación debe ser preparada por un ingeniero experimentado que éste familiarizado con la operación general de la planta y así como también con las políticas y los procedimientos estándar de la Compañía. Una lista de verificación se desarrolla de tal manera que los aspectos de un diseño u operación del sistema que no cumplan con las prácticas industriales estándares comunes ó de la Compañía, sean descubiertos a través de respuestas a las preguntas en la Lista de Verificación. Una vez que la Lista de Verificación ha sido preparada, ésta puede aplicarse por ingenieros con menos experiencia como una evaluación independiente ó como parte de otro estudio de revisión de riesgos.

2. Ejecución ó desarrollo de la Revisión.

El análisis de un sistema existente debe incluir visitas e inspecciones visuales de las áreas de proceso en revisión; efectuadas éstas por los miembros del equipo de ER. Durante éstas visitas, los analistas comparan el equipo de proceso y las operaciones con los aspectos

considerados dentro de la Listas de Verificación. El revisor responde a los puntos de la Lista de Verificación basándose en: las observaciones de la visita de campo, la documentación del sistema, entrevistas con personal operativo y percepciones del personal en general. Cuando los atributos del sistema observado ó las características operativas no corresponden con las características deseadas, específicas, consideradas dentro de la Lista de Verificación, el analista nota la deficiencia. Un análisis de Lista de Verificación para un nuevo proceso, antes de la construcción, es usualmente efectuado por los miembros del equipo enfocándose en: la revisión de los dibujos de proceso, el llenado de la Lista de Verificación y la discusión de las deficiencias.

3. Documentación de los Resultados.

El equipo de ER efectúa el análisis resumiendo las deficiencias notadas durante las visitas y/o reuniones. El reporte debe contener una copia de la Lista de Verificación, que fue utilizada para efectuar el análisis. Cualquier recomendación, específica, para mejorar la seguridad, debe ser estipulada, desde el principio, con explicaciones apropiadas.

2.1.4. Tipos de Resultados.

Para crear una Lista de Verificación tradicional, el analista define prácticas operativas ó de diseño estándares las cuales se emplean para generar una lista de preguntas basadas en deficiencias ó diferencias. Una Lista de Verificación completa contiene respuestas del tipo “sí”, “no”, “no aplica” ó “necesita más información” para las preguntas establecidas. Los resultados cualitativos varían con la situación específica, pero generalmente estos conducen a una decisión de “sí” o “no” respecto al cumplimiento con procedimientos estándar. Asimismo, el conocimiento de estas deficiencias usualmente conduce a una lista desarrollada fácilmente de posibles alternativas para mejorar la seguridad.

2.1.5. Requerimientos de Recursos humanos y documentales.

Para ejecutar, de manera adecuada, esta metodología, se necesita: una Lista de Verificación apropiada, los procedimientos de diseño y un manual de prácticas operativas y así como también alguien que integre la Lista de Verificación y que tenga el conocimiento básico del proceso que se esté analizando. En el caso de contar con una Lista

de Verificación, relevante de trabajos previos, los analistas deben ser capaces de emplearla siempre y cuando tengan la guía necesaria. Si no se cuenta con una Lista de Verificación relevante, entonces una persona debe prepararla y llevar a cabo la evaluación; posteriormente, una persona experimentada ó un ingeniero del equipo, deben revisar los resultados y dirigir la siguiente acción.

El método de Lista de Verificación es versátil. El tipo de evaluación llevada a cabo con una Lista de Verificación puede variar y puede usarse, rápidamente, para evaluaciones simples ó para evaluaciones más costosas. En la **TABLA 1** se muestra un estimado del tiempo que se requiere para efectuar una ER, empleando la técnica de Lista de Verificación:

TABLA 1. ESTIMADOS DE TIEMPO PARA EMPLEAR LA TÉCNICA DE LISTA DE VERIFICACIÓN

<i>Alcance</i>	<i>Preparación</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Documentación</i>
Sistema simple/pequeño	2 a 4 horas	4 a 8 horas	4 a 8 horas
Proceso complejo/grande	1 a 3 días	3 a 5 días	2 a 4 días

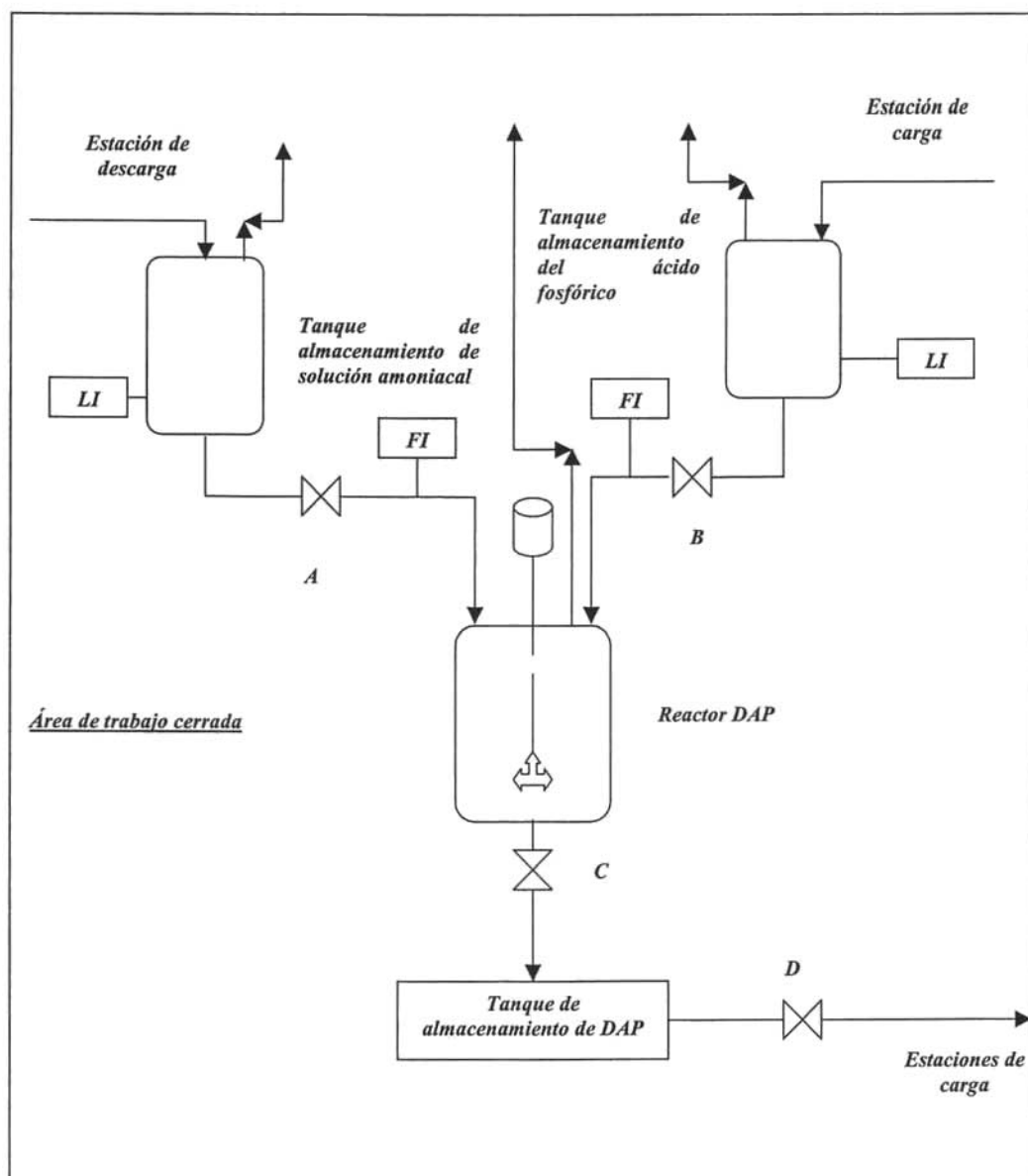
2.1.6. Aplicación de la Metodología (Ejemplo)

En un proceso continuo, como se muestra en la Figura 2 (pág. 28), una solución de ácido fosfórico y una solución de amoníaco reaccionan para formar fosfato de amonio (DAP), un producto no peligroso. El DAP fluye del reactor a un tanque de almacenamiento abierto. Se proporcionan válvulas de alivio en los tanques de almacenamiento y en el reactor con descargas fuera del área de trabajo cerrada.

Si se alimenta demasiado ácido fosfórico al reactor (comparado con la velocidad de alimentación del amoníaco), se crea un producto fuera de especificación, pero la reacción es segura. Si las velocidades de flujo del amoníaco y del ácido fosfórico se incrementan, la velocidad de la energía liberada se puede acelerar, y el reactor, tal como ha sido diseñado, puede ser incapaz de manejar el aumento de presión o de temperatura resultantes. Si se alimenta demasiado amoníaco al reactor (comparado con la velocidad de alimentación normal del ácido fosfórico), el amoníaco sin reaccionar puede ser llevado al tanque de almacenamiento del DAP. Cualquier residuo de amoníaco en el tanque DAP será liberado, en el área de trabajo cerrada, causando la exposición del personal. Los detectores de amonio y las alarmas previenen cualquier riesgo en el área de trabajo.

Se empleará una Lista de Verificación estándar de la compañía para llevar a cabo el análisis del sistema, en donde el personal que lleva a cabo la revisión de la toma de decisiones en cuanto a la Lista de Verificación, revisa la documentación e instrumenta las acciones tendientes a eliminar las deficiencias encontradas con la aplicación de la metodología.

FIGURA 2



Material

- *¿Todas las materias primas se siguen conformando, adquiriendo ó administrando, según las especificaciones originales?*
No, la concentración de amoníaco en la solución amoniacal ha sido incrementada para requerir una compra menos frecuente de amoníaco. Las velocidades de flujo, relativas del reactor, han sido ajustadas para las concentraciones mayores de amoníaco.

- *¿Cada adquisición de material es verificado?*
Sí, el proveedor ha demostrado ser muy confiable en el pasado. El etiquetado del camión, la factura y documentación de embarque se verifica antes de permitir la descarga, pero no se lleva a cabo un muestreo del tipo de material ó de la concentración a la cual se encuentra.

- *¿El personal operativo tiene acceso a las Hojas de Datos de Seguridad de Materiales?*
Sí, las Hojas de Datos de Seguridad de Materiales están disponibles las 24 horas del día, localizadas en el área de proceso y en la oficina de seguridad del edificio administrativo.

- *¿El equipo de extinción de incendios y el equipo de seguridad están adecuadamente localizados y mantenidos?*
No, la localización del equipo de extinción de incendios y del equipo de seguridad no ha cambiado, pero una nueva pared interior fue construida en las áreas de proceso. Debido a la nueva pared, algunos lugares de las áreas de proceso no pueden ser protegidos adecuadamente con el equipo de protección contra incendios existente. El equipo existente se encuentra en buenas condiciones y es inspeccionado y probado mensualmente.

Equipo

- *¿Todo el equipo ha sido inspeccionado según lo planeado?*
Sí, la cuadrilla de mantenimiento ha inspeccionado el equipo, en el área de proceso conforme a los estándares de inspección de la Compañía. Sin embargo, debido a los datos de falla el departamento de mantenimiento está preocupado y sugiere que las inspecciones del equipo, de manejo del ácido, sean constantes y con mayor frecuencia.
- *¿Las válvulas de relevo de presión han sido inspeccionadas según lo programado?*
Sí, el calendario de inspección y la programación han sido respetados.
- *¿Los sistemas de seguridad e interlocks han sido probados con una frecuencia apropiada?*
Sí, no han existido desviaciones del calendario de inspección y las inspecciones y el mantenimiento de los sistemas de seguridad e interlocks se han realizado, durante las operaciones del proceso, de acuerdo con las políticas de la Compañía.
- *¿Se encuentran disponibles los materiales apropiados de mantenimiento (refacciones, por ejemplo)?*
Sí, la Compañía mantiene un inventario de reemplazo de piezas como una política de economía, aunque el mantenimiento preventivo y las refacciones de corta duración ó que generalmente se descomponen, se encuentran disponibles. Otras partes, excepto piezas mayores de equipo, se encuentran disponibles, por acuerdo con un distribuidor local, en un lapso de 4 horas.

Procedimientos

- *¿Los procedimientos de operación se encuentran actualizados?*
Sí, los procedimientos operativos fueron actualizados, por escrito, hace 6 meses después de algunos cambios menores a los pasos de operación.

- *¿Los operadores siguen los procedimientos de operación?*
No, cambios recientes a los pasos de operación han sido instrumentados poco a poco. Los operadores sienten que uno de los cambios no considera la seguridad personal del operador.

- *¿Los nuevos operadores son entrenados adecuadamente?*
Sí, se ha implementado un programa de entrenamiento extensivo con revisiones y pruebas periódicas, y la ejecución del desempeño, durante el entrenamiento, se documenta para todos los empleados.

- *¿Como se maneja la comunicación durante el cambio de turno?*
Los operadores de turno se encuentran durante 30 minutos (debido a que el horario fue diseñado para que hubiera este traslape), permitiendo que el turno siguiente conozca el estado actual del proceso, en operación, por parte del turno anterior.

- *¿El mantenimiento, orden y limpieza es aceptable?*
Sí, el mantenimiento parece ser satisfactorio.

- *¿Los permisos u órdenes para un trabajo seguro están siendo utilizados?*
Sí, pero estas órdenes de trabajo no necesariamente requieren el paro de proceso para realizar algunas actividades, tales como pruebas, mantenimiento y/o componentes del sistema de seguridad.

2.2 METODOLOGÍA ¿QUÉ PASA SI...? (WHAT IF...?).

2.2.1. Descripción.

La técnica *¿Qué pasa si...?* es un análisis creativo de lluvia de ideas de una operación de proceso. Los analistas de riesgos revisan el proceso ó actividad en cuestión para ver si cumple con ciertos aspectos; por ejemplo, puntos potenciales de seguridad alrededor de los cuales los analistas hacen énfasis. Cada miembro del equipo debe aportar las respuestas respectivas a las preguntas *¿Qué pasa si...?* de acuerdo con los aspectos específicos que son de su interés ó que le preocupan. El análisis *¿Que pasa si...?* puede usarse para examinar virtualmente cualquier aspecto del diseño y operación del sistema (por ejemplo: edificios, sistemas de energía, materias primas, productos, almacenamiento, manejo de material, medio ambiente de trabajo, procedimientos de operación, prácticas de trabajo, prácticas administrativas, etc.). Es una herramienta de ER poderosa si el equipo analizador tiene experiencia, de otra manera los resultados podrían estar incompletos.

Esta técnica se aplica para evaluar el campo de sistemas de procesos, y es un método de análisis de riesgos general que puede aplicarse tanto a una sección del proceso como a toda la unidad. El análisis *¿Que pasa si...?* generalmente revisa el proceso, comenzando con la introducción del material y siguiendo el flujo hasta el final del proceso (o el límite definido por el alcance del análisis). Los análisis *¿Que pasa si...?* también pueden centrarse en un tipo particular de consecuencias (como por ejemplo la seguridad del personal, del público ó del ambiente). *Los resultados del análisis ¿Que pasa si...?* usualmente tratan situaciones de accidentes potenciales implicados por las preguntas y aspectos tratados por el equipo. Estas preguntas y aspectos, a menudo sugieren causas específicas para las situaciones de accidentes identificados.

2.2.2. Propósito.

El propósito de un análisis *¿Que pasa si...?* es identificar riesgos, situaciones de riesgo, ó eventos de accidentes específicos, que pueden producir una consecuencia indeseable. Un grupo experimentado, de personas, identifica posibles situaciones de accidentes, sus consecuencias y los sistemas de seguridad existentes, para entonces sugerir alternativas para la reducción del riesgo. El método puede involucrar el

examen de posibles desviaciones del diseño, la construcción, la modificación u operación. Esto requiere un entendimiento básico de la intención del proceso, con la capacidad de combinar mentalmente posibles desviaciones del diseño, que puedan resultar en un accidente. La metodología es un procedimiento poderoso si el equipo de ER es experimentado; de otro modo, los resultados pueden ser incompletos.

2.2.3. Procedimiento de Análisis.

Después de que el alcance del estudio es definido, el análisis *¿Que pasa si...?* consiste de los siguientes pasos:

1. Preparación para la Revisión:

La información necesaria para el método *¿Que pasa si...?* incluye la descripción del proceso y los dibujos y procedimientos de operación. Es importante que toda la información esté disponible, al equipo revisor de ER, preferentemente antes de que se lleven a cabo las reuniones.

Si una planta, existente, está siendo revisada, el equipo revisor querrá entrevistar al personal adicional responsable de: las operaciones, el mantenimiento y los servicios auxiliares u otros servicios. Adicionalmente, si el equipo va a conducir la reunión del análisis *¿Que pasa si...?* fuera de la sala de juntas, el equipo debe visitar la planta para obtener una mejor idea del arreglo de la planta, su construcción y operación. Antes de que la reunión de inicio, las visitas y las entrevistas deben de programarse.

La última parte de este punto es la preparación de algunas preguntas preliminares de *¿Que pasa si...?* para poder llevar el análisis en forma más activa y dirigida. Si el análisis es una actualización, de una revisión previa o un examen de la modificación de la planta, se pueden utilizar las preguntas de los reportes previos. Para una nueva planta, o como primera aplicación, deben desarrollarse preguntas preliminares, por los miembros del equipo, antes de la reunión, aunque las preguntas adicionales formuladas durante la reunión son esenciales.

2. *Ejecución de la Revisión:*

Las reuniones de revisión deben empezar con una explicación básica del proceso, dada ésta por el personal de la planta que tiene todo el conocimiento de la misma y del proceso, además de la experiencia relevante del área de investigación del equipo. La presentación también debe describir las precauciones de seguridad de la planta, el equipo de seguridad y los procedimientos de control de la salud.

El proceso es revisado por miembros del equipo, quienes manifiestan sus preocupaciones de seguridad. Sin embargo, el equipo no debe limitarse a las preguntas *¿Que pasa si...?*, anteriormente preparadas, o restringirse de emitir también sus preguntas; deben utilizar en conjunto la experiencia combinada y la interacción de todos los miembros del equipo para expresar todos aquellos puntos que crean necesarios para asegurar que la investigación es detallada. El equipo no debe apresurarse y no debe trabajar muchas horas consecutivas (idealmente un equipo debe trabajar no más de 4 a 6 horas por día).

Existen dos formas en que pueden llevarse a cabo las reuniones. Un modo preferido, por algunos, es el de primero escuchar todas las preguntas y aspectos de seguridad, y después empezar a considerarlos. Otra forma es considerar cada pregunta y aspecto uno a la vez, con el equipo, determinado el significado de cada situación. Ambas formas pueden dar resultado, pero es preferible enlistar todas las preguntas antes de responderlas, para evitar interrumpir el momento creativo del equipo. Si el proceso es complejo o largo, debe dividirse en pequeños segmentos para que el equipo no gaste varios días, consecutivos, solamente enlistando preguntas. A menudo el equipo pensará en preguntas adicionales como un resultado de considerar los aspectos ó puntos anteriores.

Inicialmente, el líder del equipo debe delinear el alcance propuesto del estudio y el equipo debe de estar de acuerdo con él. El equipo generalmente procede desde el principio hasta el final del proceso, aunque a veces el líder puede cambiar la revisión por otro orden lógico para encaminar de una mejor forma la revisión. El equipo responde a las preguntas y trata cada aspecto (o indica la necesidad de más información) para identificar: los riesgos, las consecuencias potenciales, los aspectos de ingeniería con respecto a

seguridad y las posibles soluciones. En el proceso, agregan cualquier pregunta *¿Que pasa si...?* nueva que se vuelve aparente durante el análisis (algunas veces, las respuestas propuestas son desarrolladas por individuos fuera de la reunión inicial, y después presentadas al equipo para discusión ó modificaciones).

3. *Documentación de los Resultados:*

Como cualquier estudio, la documentación es la clave para transformar los hallazgos del equipo en medidas para la eliminación ó reducción de riesgos. Adicionalmente, el equipo revisor, usualmente desarrolla una lista de sugerencias para mejorar la seguridad del proceso base analizado, en una tabla, en forma tabular. Las tablas o el documento narrativo de pregunta y respuesta, son los productos típicos generados por el análisis *¿Que pasa si...?*.

2.2.4. *Tipos de Resultados.*

En su forma simple, la metodología *¿Que pasa si...?* genera una lista de preguntas y respuestas, acerca del proceso. Esto también puede resultar en una lista tabular de situaciones riesgosas, sus consecuencias, medidas/sistemas de seguridad y posibles opciones para la reducción del riesgo.

2.2.5. *Requerimientos de Recursos humanos y documentales.*

Dado que la metodología *¿Que pasa si...?* es flexible, ésta puede llevarse a cabo en cualquier etapa de un proceso, empleando toda la información y los conocimientos disponibles. Para cada área del proceso, dos o tres gentes deben asignarse para efectuar el análisis; sin embargo, es preferible emplear un equipo de trabajo más grande. Es mejor integrar un equipo de trabajo grande, en el caso de analizar un proceso complejo, dividiendo al mismo en piezas pequeñas, en lugar de integrar un grupo pequeño que emplee un mayor tiempo para analizar todo el proceso.

El tiempo y costo de un análisis *¿Qué pasa si...?*, son proporcionales a la complejidad y número de áreas de la planta que serán analizadas.

En la **TABLA 2** se muestra un estimado del tiempo que se requiere para efectuar una ER empleando la técnica de análisis *¿Qué pasa si...?:*

TABLA 2. ESTIMADOS DE TIEMPO PARA EMPLEAR LA TÉCNICA ¿QUE PASA SI...?

<i>Alcance</i>	<i>Preparación</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Documentación</i>
Sistema simple/pequeño	4 a 8 horas	4 a 8 horas	1 a 2 días
Proceso complejo/grande	1 a 3 días	3 a 5 días	1 a 3 semanas

2.2.6. *Aplicación de la Metodología (Ejemplo).*

LPG Ducto. El ducto tiene su origen en una Estación de Regulación y Medición y su destino es una Válvula de Seccionamiento. Las principales especificaciones de la línea son las siguientes:

- *Diámetro Nominal:* 14"
- *Longitud:* 219 kilómetros
- *Servicio:* Gas Licuado del Petróleo
- *Capacidad:* 65 MBD
- *Instalaciones Superficiales:* Estaciones de Regulación y Medición, Trampas de Envío y Recibo de Diablos, Válvulas de Seccionamiento y Rectificadores.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

¿QUE PASA SI...?	CONSECUENCIAS Y/O RIESGOS	ELEMENTOS DE SEGURIDAD	ACCIONES O RECOMENDACIONES
1.- Hay fuga en el ducto por sobrepresionamiento, fallas mecánicas, desgaste de materiales, corrosión, golpe, erosión, errores humanos ó vandalismo?	<ul style="list-style-type: none"> • Posible formación de una nube inflamable y explosiva. • Baja de presión corriente arriba. • Pérdida de producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de aislamiento. • Válvulas de seccionamiento. • Sistema de protección catódica. • Indicadores de presión. • Explosímetros. • Procedimiento específico contra fugas, incendios y explosiones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener siempre por escrito, actualizados y disponibles, los planes de emergencia en caso de: falla, accidentes u otras contingencias en el ducto. • Continuar con el establecimiento, implementación y cumplimiento de los programas de: vigilancia, inspección y mantenimiento periódico al ducto y así como también de los programas de vigilancia (celajes terrestres) al DDV. • Implementar un programa anual de medición de espesores de la tubería. • Mantener un apriete adecuado en los espárragos de las conexiones mecánicas del ducto. • Mantener actualizada la base de datos referente a los registros de anomalías ó fugas en el ducto.
2.- Hay sobrepresión en el ducto?	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de esfuerzo mecánico en el ducto. • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. • Probable ruptura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos operativos. • Manual de válvulas de seccionamiento. • Monitoreo de condiciones operativas de la línea (presión) en campo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de los procedimientos operativos correspondientes. • Programa de mantenimiento a válvulas de seccionamiento.
3.- No se da mantenimiento a las uniones bridadas?	<ul style="list-style-type: none"> • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de mantenimiento a uniones bridadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Continuar con la implementación y aplicación de programas de mantenimiento a conexiones mecánicas del ducto.
4.- Las instalaciones superficiales del ducto (incluyendo cruces aéreos) son golpeadas por maquinaria pesada?	<ul style="list-style-type: none"> • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardas y cercas perimetrales con acceso restringido a personal ajeno a las instalaciones. • Señalamientos preventivos y restrictivos. • Celaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Certificar que los señalamientos informativos, restrictivos y preventivos cumplan con la normatividad aplicable. • Certificar que se mantengan aisladas eléctricamente las camisas de protección del ducto en los cruces con vías de comunicación.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

<i>¿QUE PASA SI...?</i>	<i>CONSECUENCIAS Y/O RIESGOS</i>	<i>ELEMENTOS DE SEGURIDAD</i>	<i>ACCIONES O RECOMENDACIONES</i>
5.- Hay corrosión presente en el ducto?	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de espesores del material de construcción del ducto. • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos de protección catódica (rectificadores). • Protección mecánica anticorrosiva (pintura). 	<ul style="list-style-type: none"> • Certificar que se mantengan aisladas eléctricamente las camisas de protección del ducto en los cruces con vías de comunicación. • Mantener en buen estado la protección mecánica anticorrosiva del ducto.
6.- Los manómetros se encuentran en mal estado?	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura de presión errónea. • Descontrol en condiciones de operación. 		<ul style="list-style-type: none"> • Continuar con la implementación y aplicación de los programas de mantenimiento y calibración de manómetros.
7.- Se presenta un movimiento térmico en alguna de las zonas del DDV del ducto?	<ul style="list-style-type: none"> • Probable fractura ó ruptura del ducto. • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis sísmico de la zona. • Cédula del material (mecánica). 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar el cejaje en caso de sismo. • Activación de procedimiento específico contra fugas, incendios y/ó explosiones.
8.- Hay fuego, incendio ó explosión en otro ducto que comparte el mismo derecho de vía?	<ul style="list-style-type: none"> • Probable presencia de efecto dominó. • Daño al material del ducto 		<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el cumplimiento efectivo de los programas de vigilancia, inspección y mantenimiento periódico de los ductos que comparten el mismo DDV. • Continuar con la implementación y aplicación de los programas de mantenimiento a las válvulas de seccionamiento, así como a la infraestructura de instrumentación y control del ducto. • Verificar la necesidad de un relevado de esfuerzos a material expuesto a altas temperaturas
9.- El vástago de alguna válvula de seccionamiento se atora al cerrar?	<ul style="list-style-type: none"> • En caso de emergencia no existe un corte de flujo de producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos de emergencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar que se cumpla el procedimiento de emergencia a válvulas de seccionamiento.
10.- El vástago de alguna válvula de seccionamiento se atora al abrir?	<ul style="list-style-type: none"> • Producción diferida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimientos de arranque. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar periódicamente los procedimientos de arranque correspondientes para certificar la adecuada operación de las válvulas.

**: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO :
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

¿QUE PASA SI...?	CONSECUENCIAS Y/O RIESGOS	ELEMENTOS DE SEGURIDAD	ACCIONES O RECOMENDACIONES
11.- Hay bloqueo en alguna válvula de seccionamiento?	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrepresionamiento en el ducto. • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bardas y cercas perimetrales. • Sistema de aislamiento y alivio. • Procedimiento específico contra fugas, incendios y explosiones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Certificar que los señalamientos informativos, restrictivos y preventivos cumplan con la normatividad aplicable. • Certificar en todo momento el buen estado de las cercas y bardas perimetrales, así como de puertas de acceso. • Verificar el cumplimiento efectivo de los programas de celaje para detectar condiciones anormales de operación del ducto.
12.- El diablo instrumentado ó de limpieza se atoró en algún tramo del ducto?	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrepresionamiento en el ducto. • Posible ruptura de línea al no suspender de forma inmediata el régimen de flujo establecido (empuje constante). • Probable fuga de LPG con posible formación de una nube inflamable y explosiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento específico para corridas de diablos. • El material con que se fabrican los diablos está diseñado especialmente para evitar taponamiento en el ducto. • Procedimiento específico contra fugas, incendios y explosiones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de los procedimientos operativos y/o de emergencia aplicables. • Certificar periódicamente que los recursos y medios de comunicación existentes sean los necesarios y suficientes para garantizar una operación segura del sistema, ya sea bajo condiciones normales de operación ó en emergencias.
13.- La corriente eléctrica de los rectificadores falla?	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de protección catódica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Unidad de suministro de energía. • Programa de mantenimiento para todos los rectificadores. • Celaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Continuar con la implementación y aplicación de los programas de mantenimiento a rectificadores.
14.- No se despresuriza la cubeta antes de sacar el diablo?	<ul style="list-style-type: none"> • Posible presencia de efecto "flash fire" (flamazo) en área de trampas de diablos. • Posible daño a personal operativo encargado de los trabajos de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Tomas o indicadores de presión en área de trampas de diablos. • Procedimientos operativos específicos para despresurización del sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Continuar con la capacitación constante del personal encargado de efectuar trabajos de recepción de diablos. • Certificar que todo trabajo de esta naturaleza se efectúe con el permiso escrito correspondiente, así como con todas las medidas de seguridad (procedimiento, equipo de seguridad) inherentes a la actividad. • Continuar con la implementación y aplicación de los programas de calibración y mantenimiento a indicadores de presión.

**2.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE OPERABILIDAD Y RIESGO
(HAZOP, HAZARD AND OPERABILITY ANALYSIS)M**

2.3.1. Descripción.

La esencia del acercamiento de la técnica de HAZOP, es la revisión de los dibujos de proceso y/o procedimientos en una serie de reuniones, durante las cuales un equipo multidisciplinario usa un protocolo descrito con anterioridad para evaluar, en una forma metódica, el significado ó desviaciones de una intención de diseño normal.

El estudio de HAZOP se enfoca en puntos específicos del proceso u operación llamados “nodos de estudio”, secciones del proceso ó pasos operativos. El equipo examina, una a la vez, cada sección ó paso con respecto a los riesgos o desviaciones del proceso. Un propósito de las palabras guía es asegurar que todas las posibles desviaciones de los parámetros de proceso sean evaluadas.

Los estudios de HAZOP pueden ser realizados en proyectos nuevos o en instalaciones existentes. El concepto de HAZOP involucra una investigación sistemática y documentada de cómo un proceso, continuo ó por lotes, de una planta puede desviarse de los objetivos de su diseño y provocar una situación de riesgo para la planta. Este estudio de riesgo y operabilidad HAZOP lo lleva a cabo un equipo multidisciplinario formado por personal de ingeniería, mantenimiento, instrumentación, proceso y seguridad mediante la técnica de tormenta de ideas, en donde se analiza línea por línea ó paso por paso, en los procesos continuos, o en las actividades de un proceso por lotes, las posibles desviaciones, tomando en cuenta:

- La intención del diseño de la línea ó equipo seleccionado.
- El empleo de “*palabras guía*” que ayuda a descubrir cuales desviaciones, del diseño, pueden constituir un riesgo importante.
- El grupo se enfoca a analizar puntos específicos del diseño llamados “*nodos de estudio*”.

2.3.2. Propósito.

El propósito de un análisis HAZOP es el de revisar cuidadosamente un proceso u operación, en forma sistemática, para determinar si las desviaciones en el proceso pueden conducir a consecuencias indeseables. Esta técnica puede usarse para procesos continuos o por lotes, y puede adaptarse para evaluar procedimientos escritos. Los miembros del equipo HAZOP lista las causas y consecuencias potenciales de la desviación y así como también las salvaguardas existentes para la desviación en cuestión. Cuando el equipo determina que existe una protección inadecuada, para una desviación creíble, usualmente se recomienda la acción que debe tomarse para reducir el riesgo.

2.3.3. Procedimiento de Análisis.

1. Preparación para la Revisión:

Etapas conformadas por las siguientes actividades:

- Definición del propósito, los objetivos y el alcance del estudio (consecuencias específicas que se considerarán, dirección apropiada).
- Selección del equipo de trabajo (5 a 7 miembros: líder, apuntador, y personal con conocimientos en el diseño y operación del proceso en estudio).
- Obtención de la información necesaria (diagramas de flujo, planos de localización, diagramas de tubería e instrumentación, diagramas lógicos, procedimientos operativos, etc.).
- Conversión de la información, en una forma adecuada, y planeación de la secuencia del estudio (establecimiento de nodos de estudio, copias de documentación, preparación de listas preliminares de desviaciones de proceso, etc.).
- Preparación de las reuniones de trabajo (estimación del tiempo requerido).

2. Ejecución de la Revisión:

La técnica de análisis HAZOP requiere que un procedimiento o dibujo de proceso sea dividido en nodos de estudio, secciones de proceso ó pasos operativos, y que los riesgos del proceso sean diseccionados empleando las palabras guía (**FIGURA 3**). Como el equipo aplica todas las palabras guía relevantes para cada sección ó paso del proceso,

entonces se registran (1) la desviación con sus causas, consecuencias, salvaguardas y acciones, ó (2) el requerimiento de información más completa para evaluar la desviación.

FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO PARA ANÁLISIS HAZOP

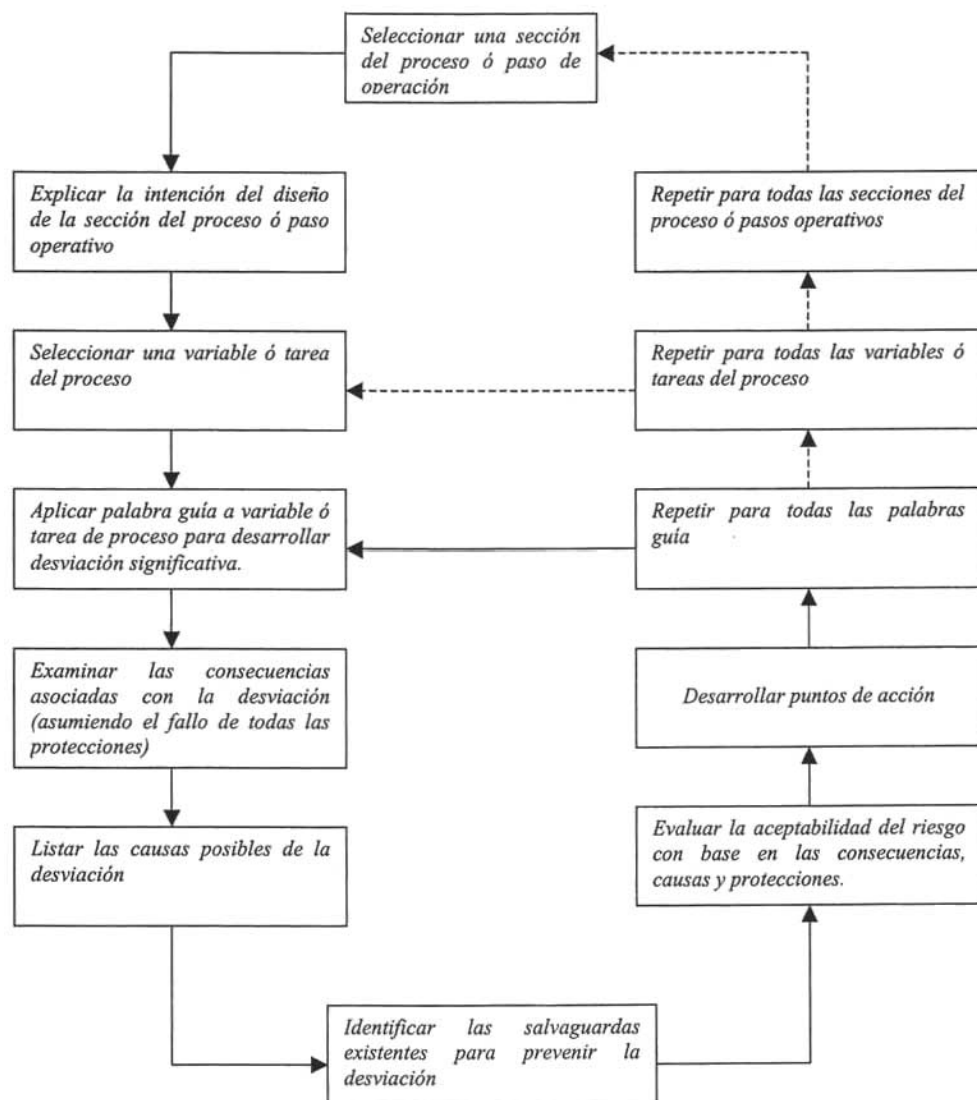


TABLA 3. PARÁMETROS COMUNES DE ANÁLISIS EN HAZOP

<i>Flujo</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Mezclar</i>
<i>Presión</i>	<i>Composición</i>	<i>Viscosidad</i>	<i>Adicionar</i>
<i>Temperatura</i>	<i>pH</i>	<i>Voltaje</i>	<i>Separar</i>
<i>Nivel</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Información</i>	<i>Reaccionar</i>
<i>Concentración</i>	<i>Fugas</i>	<i>Rupturas</i>	

TABLA 4. PALABRAS GUÍA QUE SE PUEDEN UTILIZAR EN EL ANÁLISIS HAZOP

PALABRA GUÍA	DESCRIPCIÓN
NO	No se logra la intención del diseño, por ejemplo: No hay flujo.
MAS / MENOS	Mayor ó menor cantidad, por ejemplo : Más temperatura, menos flujo, etc.
ADEMÁS DE	Aumento cuantitativo. Se logra la intención del diseño pero ocurre algo más no deseable, por ejemplo: el vapor calienta la pila pero provoca el calentamiento de otros equipos.
PARTE DE	Disminución cualitativa. Se cumple parcialmente la intención del diseño.
INVERSIÓN	Se obtiene el efecto contrario del diseño, por ejemplo: Se obtiene el flujo en sentido inverso.
EN VEZ DE	No se obtiene el efecto deseado, sino algo completamente distinto, por ejemplo: En vez de calentar se enfría.
ANTES QUE	Aplica a paso del proceso ó acciones (proceso por lotes).
MAS TARDE QUE	Aplica a cada paso del proceso ó acciones (proceso por lotes).
DONDE MAS	Aplica a la ubicación del proceso en los procedimientos de operación.

3. *Documentación de los Resultados:*

Resulta imposible el registrar manualmente todas las ideas ó conceptos que surgen en las reuniones de trabajo, por lo que resulta muy importante que todas las ideas sean preservadas. Normalmente, los resultados de reuniones HAZOP se registran en un formato tubular.

2.3.4. Tipos de Resultados.

Los resultados de un análisis HAZOP son aquéllos encontrados y establecidos por los miembros del equipo, e incluyen:

- Identificación de riesgos y problemas de operación.
- Recomendaciones para cambios en el diseño, procedimientos, etc., tendientes a mejorar el sistema.
- Recomendaciones para llevar a cabo estudios en áreas en donde no sea posible establecer una conclusión por falta de información.

Los resultados de las discusiones del equipo, concernientes a causas, efectos y salvaguardas para desviaciones por cada nodo o ó sección del proceso, se registran en una tabla con las columnas respectivas.

2.3.5. Requerimientos de Recursos humanos y documentales.

El análisis HAZOP requiere DTI's precisos y actualizados ó planos equivalentes y así como también otra información detallada del proceso (procedimientos operativos). Un análisis HAZOP también requiere un conocimiento considerable del proceso, de la instrumentación y de la operación. Esta información es usualmente proporcionada por los miembros del equipo de expertos en estas áreas. Líderes entrenados y experimentados son una parte esencial de un análisis HAZOP eficiente y de alta calidad.

El equipo HAZOP, para un proceso grande y complejo, puede consistir de cinco a siete personas con una variedad de experiencia: diseño, ingeniería, mantenimiento, operación, seguridad, etc. Un miembro del equipo guía el análisis y otro (escribano)

generalmente registra los resultados de las deliberaciones del equipo de trabajo. Asimismo, para un proceso simple, el equipo puede estar integrado por tres o cuatro personas, dependiendo de la experiencia y de los conocimientos técnicos requeridos.

En la **TABLA 5** se muestra un estimado del tiempo que se requiere para efectuar una ER empleando la técnica de análisis HAZOP:

TABLA 5. ESTIMADOS DE TIEMPO PARA EMPLEAR LA TÉCNICA HAZOP

<i>Alcance</i>	<i>Preparación</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Documentación</i>
Sistema simple/pequeño	8 a 12 horas	1 a 3 días	2 a 6 días
Proceso complejo/grande	2 a 4 días	1 a 3 semanas	2 a 6 semanas

2.3.6. Aplicación de la Metodología (Ejemplo).

Para este caso, se empleará de igual forma el ejercicio presentado para ejemplificar la metodología de Lista de Verificación (págs. 26-28, FIGURA 2).

RESUMEN: Proceso continuo en donde una solución de ácido fosfórico y una solución de amoníaco reaccionan para formar fosfato de amonio (DAP), un producto no peligroso. El DAP fluye del reactor a un tanque de almacenamiento abierto. Si se alimenta demasiado ácido fosfórico al reactor (comparado con la velocidad de alimentación del amoníaco), se crea un producto fuera de especificación, pero la reacción es segura. Si las velocidades de flujo del amoníaco y del ácido fosfórico se incrementan, la velocidad de la energía liberada se puede acelerar, y el reactor, tal como ha sido diseñado, puede ser incapaz de manejar el aumento de presión o de temperatura resultantes. Si se alimenta demasiado amoníaco al reactor (comparado con la velocidad de alimentación normal del ácido fosfórico), el amoníaco sin reaccionar puede ser llevado al tanque de almacenamiento del DAP. Cualquier residuo de amoníaco en el tanque DAP será liberado, en el área de trabajo cerrada, causando la exposición del personal. Los detectores de amonio y las alarmas previenen cualquier riesgo en el área de trabajo.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

1.0 Recipiente. Tanque de almacenamiento de solución amoniacal

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
1.1	Alto Nivel	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga de amoníaco de la estación de descarga sin un adecuado espacio en el tanque de almacenamiento de amoníaco. • Falla del indicador de nivel del tanque de almacenamiento de amoníaco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación potencial de amoníaco a la atmósfera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador de nivel en el tanque de almacenamiento. • Indicador de presión en el tanque de almacenamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar los procedimientos de descarga de amoníaco para asegurar un espacio adecuado en el tanque de almacenamiento antes de la descarga. • Considerar que la descarga de la válvula de relevo sea enviada a un Depurador (scrubber). • Considerar la instalación de una alarma por alto nivel independiente para el tanque de almacenamiento de amoníaco.

2.0 Línea. Tubería de alimentación de amoníaco al Reactor DAP.

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
2.1	Alto Flujo	<ul style="list-style-type: none"> • Falla de la válvula de control "A" en la línea de alimentación de amoníaco. • Falla del indicador de flujo. • Error humano, dado que el operador establece demasiado alta la tasa de flujo de amoníaco. 	<ul style="list-style-type: none"> • El amoníaco sin reaccionar (excedente) es conducido hacia el tanque de almacenamiento de DAP, por lo que se presentaría una liberación potencial de amoníaco en el área de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento periódico de la válvula "A". • Detector de amoníaco y alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar la instalación de una alarma para paro del sistema por alto flujo de amoníaco hacia el reactor. • Asegurar que el mantenimiento e inspección periódica de la válvula "A" son adecuados. • Asegurarse de que existe una ventilación adecuada para el área de trabajo cerrada, y/o considerar el uso de un tanque de almacenamiento de DAP cerrado.
2.2	Fuga	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión. • Erosión. • Impactos externos. • Fallas de empaques. • Errores de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuga pequeña y continua de amoníaco en el área de trabajo cerrada 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento periódico de la línea. • Recorridos periódicos de inspección por parte del operador en el área de proceso DAP. 	<ul style="list-style-type: none"> • Asegurarse de que existe una ventilación adecuada para el área de trabajo cerrada.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

3.0 Recipiente. Tanque de almacenamiento de solución de ácido fosfórico.

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
3.1	Baja concentración de ácido fosfórico	<ul style="list-style-type: none"> Baja concentración de ácido fosfórico suministrado por el proveedor. Error en la carga de ácido fosfórico al tanque de suministro. 	<ul style="list-style-type: none"> El amoníaco sin reaccionar en el reactor, es conducido por encima del tanque de almacenamiento de DAP y liberado en el área de trabajo cerrada. 	<ul style="list-style-type: none"> Procedimiento de carga y transferencia de ácido. Detector de amoníaco y alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> Asegurar la existencia de procedimientos (manejo, recibo y etiquetado) que garanticen un material adecuado. Verificar la concentración del ácido fosfórico en el tanque de almacenamiento antes de su operación. Asegurarse de que existe una ventilación adecuada para el área de trabajo cerrada, y/o considerar el uso de un tanque de almacenamiento de DAP cerrado.

4.0 Línea. Tubería de alimentación de ácido fosfórico al Reactor DAP.

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
4.1	Bajo Flujo/No Flujo	<ul style="list-style-type: none"> No hay alimentación de material en el tanque de almacenamiento de ácido fosfórico. Falla del indicador de flujo. Error humano, dado que el operador establece demasiado baja la tasa de flujo de amoníaco. Falla de la válvula de control "B" en la línea de alimentación de ácido fosfórico. Taponamiento de la línea. Fuga ó ruptura de la línea. 	<ul style="list-style-type: none"> El amoníaco sin reaccionar en el reactor, es conducido por encima del tanque de almacenamiento de DAP y liberado en el área de trabajo cerrada. 	<ul style="list-style-type: none"> Mantenimiento periódico de la válvula "B". Detector de amoníaco y alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> Considerar la instalación de una alarma para paro del sistema por bajo flujo de ácido fosfórico hacia el reactor. Asegurar que el mantenimiento o inspección periódica de la válvula "B" son adecuados. Asegurarse de que existe una ventilación adecuada para el área de trabajo cerrada, y/o considerar el uso de un tanque de almacenamiento de DAP cerrado.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

5.0 Recipiente. Reactor DAP.

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
5.1	Pérdida de agitación	<ul style="list-style-type: none"> Falla del motor del agitador. Falla de la unión mecánica del agitador. Falla del operador para activar el agitador. 	<ul style="list-style-type: none"> El amoníaco sin reaccionar en el reactor, es conducido por encima del tanque de almacenamiento de DAP y liberado en el área de trabajo cerrada. 	<ul style="list-style-type: none"> Detector de amoníaco y alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> Considerar la instalación de una alarma para paro del sistema por pérdida de agitación en el reactor. Asegurarse de que existe una ventilación adecuada para el área de trabajo cerrada, y/o considerar el uso de un tanque de almacenamiento de DAP cerrado.

6.0 Línea. Tubería de toma del Reactor DAP al tanque de almacenamiento DAP.

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
6.1	Flujo Inverso ó dirigido erradamente	<ul style="list-style-type: none"> No existen causas creíbles. 	<ul style="list-style-type: none"> Sin efectos significantes. 		

7.0 Recipiente. Tanque de Almacenamiento de DAP.

No.	DESVIACIÓN	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	ACCIONES
7.1	Alto Nivel	<ul style="list-style-type: none"> Exceso de flujo desde el reactor. No hay flujo hacia las estaciones de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> Problemas de operabilidad causados por el sobrellenado del tanque de almacenamiento de DAP (sin riesgos para el personal). 	<ul style="list-style-type: none"> Observación del nivel del tanque de almacenamiento de DAP por parte del operador. 	<ul style="list-style-type: none"> Considerar la instalación de una alarma por alto nivel en el tanque de almacenamiento de DAP. Considerar la implementación de un dique de contención alrededor del tanque de almacenamiento.

Este proceso se repite con otras combinaciones de palabras guía y parámetros de proceso para cada sección de la Unidad DAP en estudio.

3

MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

3.1 FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO.

Un estudio de Análisis de Consecuencias, debe formar parte de un Programa de Administración de Riesgos para aquéllos establecimientos industriales, comerciales o de servicios en donde se desarrollen Actividades Altamente Riesgosas (AAR), asociadas estas con el manejo de sustancias peligrosas en función de sus características inflamables, explosivas y/o tóxicas. Lo anterior con la finalidad primordial de preparar e implementar programas tendientes a la prevención, detección y mitigación de liberaciones accidentales (fugas) de sustancias peligrosas.

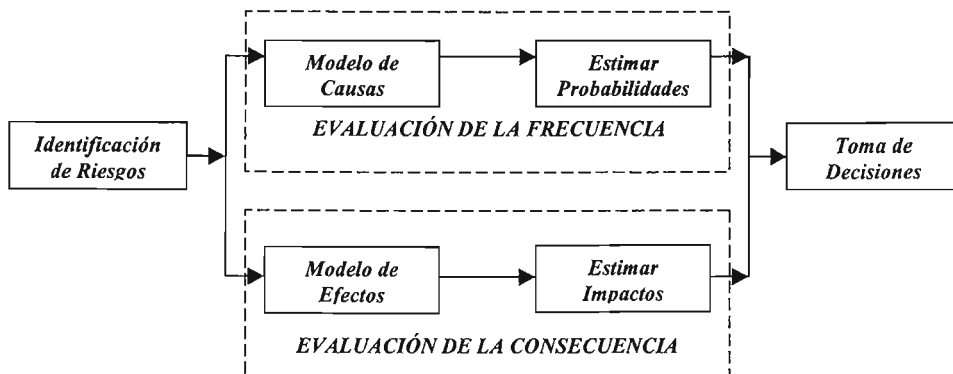
Así mismo, una evaluación de riesgo ayuda a garantizar, con un costo efectivo, el uso de instalaciones y productos bajo una operación segura y así como también a destinar recursos limitados entre necesidades específicas.

Por otra parte, se define al riesgo como una función de la frecuencia esperada de ocurrencia (F) y de la consecuencia anticipada (C) para un accidente ó actividad ($\text{Riesgo}_i = [F_i, C_i]$); a menudo, el riesgo se representa como el producto de F_i y C_i ($\text{Riesgo}_i = F_i \times C_i$).

Los tipos de riesgo que generalmente se manejan en un Análisis de Consecuencias son:

- Seguridad de empleados y de la población.
- Daño a propiedades.
- Pérdidas económicas.
- Efectos ambientales.

FIGURA 4. MÉTODO INTEGRADO DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO



En términos generales, el proceso para llevar a cabo un Análisis de Consecuencias involucra:

- Cálculo de las tasas de descarga (fugas).
- Estimación del transporte del material liberado y de la liberación de energía por: fuegos, explosiones y dispersión.
- Estimación de los efectos sobre objetivos de interés: tóxicos (exposición y dosis), por radiación térmica, por sobrepresión y así como también en la seguridad en general y en los impactos económicos.

Finalmente, se establece que los principales motivos que llevan a efectuar un Análisis de Consecuencias son los siguientes:

- Cumplimiento de la normatividad ambiental.
- Reducir el riesgo en la operación de la instalación.
- Evaluar aspectos relacionados con la localización de la instalación y/o del equipo de proceso.
- Desarrollar planes de respuesta a emergencias, tanto para la instalación como para la población aledaña.
- Evaluar diseños de sistemas de mitigación existentes o propuestos.

3.2 MODELACIONES PARA EL CÁLCULO DE TASAS DE DESCARGA.

3.2.1. Modelos para Liberaciones (fugas) en Recipientes.

3.2.1.1. Gases.

La liberación (descarga) de un gas a partir de un recipiente, puede presentarse en forma sónica ó subsónica.

Si $P_a/P_s \leq (P/P_s)_{CR}$, entonces el flujo de gas es sónico e independiente de la presión ambiental P_a :

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

en donde:

- Pa = presión ambiental absoluta (lbf/ft²)
- Ps = presión de almacenamiento absoluta (lbf/ft²)
- (P/Ps)_{CR} = índice de presión de flujo crítico
- γ = relación de calores específicos (Cp/Cv)

La tasa de descarga inicial para un flujo de gas del tipo sónico a partir de un recipiente (Crowl y Louvar, 1990), puede calcularse a partir de la siguiente ecuación ($P_{sat} \geq P_s \geq P_a$):

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c MW}{R_g T_s} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Aplicable para $\frac{P_a}{P_s} \leq \left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR}$

En donde:

- \dot{Q} = tasa de descarga (lbm/seg)
- C_D = coeficiente de descarga (adimensional)
- A = área de sección transversal de la ruptura (ft²)
- g_c = constante gravitacional (32.2 lbm-ft/lbf-seg²)
- MW = peso molecular del gas (lbm/lbmol)
- R_g = constante universal de los gases (1545 ft-lbf/lbmol-°R)
- T_s = temperatura de almacenamiento absoluta (°R)

A la vez, la tasa de descarga inicial para un flujo de gas del tipo subsónico a partir de un recipiente (Crowl y Louvar, 1990), puede calcularse a partir de la siguiente ecuación ($P_{sat} \geq P_s \geq P_a$):

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{2g_c MW}{R_g T_s} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Aplicable para $\frac{P_a}{P_s} > \left(\frac{P}{P_s} \right)_{CR}$

Para flujo totalmente turbulento (flujo no laminar), el coeficiente de descarga C_D es constante de acuerdo a la forma en que se presente la liberación (Green y Perry, 1984):

TABLA 6

TIPO DE LIBERACION	VALOR PARA C_D
Venturi/Boquilla/Válvula de Relevo	De 0.95 a 0.99 (sónico y subsónico)
Orificio	De 0.61 a 0.67 (subsónico) 0.75 para $P_a/P_s \sim (P/P_s)_{CR}$ (sónico)** 0.84 para $P_s \gg P_a$ (sónico)**

** Para estos flujos y para situaciones en donde C_D es incierto, se recomienda emplear un valor conservador para $C_D = 1.0$.

3.2.1.2. Líquidos.

La tasa de descarga inicial para un flujo de líquido a partir de un recipiente (Crowl y Louvar, 1990), puede calcularse a partir de la siguiente ecuación ($P_s \geq P_a > P_{sat}$):

$$\dot{Q} = C_D \rho_l A \sqrt{\frac{2g_c(P_s - P_a)}{\rho_l} + 2gh} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En donde:

- ρ_l = densidad del líquido almacenado (lbm/ft³)
- g_c = aceleración debida a la gravedad (32.2 ft/seg²)
- h = altura vertical del líquido por arriba del punto de ruptura (ft)

3.2.1.3. Flujo a Dos Fases: Líquidos Saturados en Equilibrio y en No Equilibrio.

Para una liberación a dos fases, la fracción de líquido que flashea a gas se identifica como la fracción flash “f” (Crowl y Louvar, 1990), y puede calcularse mediante la siguiente ecuación ($P_s \geq P_{sat} > P_a$):

$$f = 1 - \exp\left[-\frac{\bar{C}_{pl}(T_s - T_b)}{\Delta\bar{H}_v}\right] \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde:

- T_b = punto de ebullición del líquido a presión atmosférica (°R)
- \bar{C}_{pl} = calor específico del líquido a presión constante (promedio de valores obtenidos a T_s y T_b , BTU/lbm-°R)
- $\Delta\bar{H}_v$ = calor latente de vaporización (promedio de valores obtenidos a T_s y T_b , BTU/lbm)

La tasa de descarga inicial para un flujo de líquido saturado con flasheo a partir de un recipiente (Crowl y Louvar, 1990), puede calcularse a partir de la siguiente ecuación ($P_s = P_{sat} > P_a$):

$$\dot{Q} = C_D \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778 g_c}{T_s C_{pl}}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde:

- ΔH_v = calor latente de vaporización a condiciones de almacenamiento (BTU/lbm)
 ρ_v = densidad del vapor a presión de almacenamiento (lbm/ft³)
 C_{pl} = calor específico del líquido a condiciones de almacenamiento (BTU/lbm-°R)
 778 = factor de conversión para convertir BTU a ft-lbf

Por otra parte, la tasa de descarga inicial para un flujo a dos fases en no equilibrio a partir de un recipiente (derivado empíricamente por Fauske, 1985), puede calcularse a partir de la siguiente ecuación ($P_s = P_{sat} > P_a$):

$$\dot{Q} = \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778 g_c}{T_s C_{pl} N}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$N = \frac{778 \Delta H_v^2}{2(P_s - P_a) \rho_l C_D^2 (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1})^2 T_s C_{pl}} + \frac{L_p}{L_e} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Aplicable para $L_p < 4$ pulgadas.

En donde:

- L_p = longitud de la tubería (ft)
 L_e = constante derivada empíricamente, 0.33 (ft)

3.2.1.4. Flujo a Dos Fases: Líquidos Refrigerados.

Si el material es subenfriado, es decir, almacenado a una presión más grande que la de su presión de vapor como líquido saturado a la temperatura de almacenamiento, puede emplearse una ecuación empírica derivada por Fauske ($P_s > P_{sat} > P_a$):

$$\dot{Q} \cong C_D \rho l A \sqrt{\frac{2g_c(P_s - P_{sat})}{\rho l} + 2gh + \left(\frac{Q_s}{C_D \rho l A}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde:

P_{sat} = presión de saturación a la temperatura de almacenamiento (lb/ft^2)

\dot{Q}_s = tasa de descarga calculada a partir de la **ecuación 6** para $L_p \geq 4$ pulgadas, o a partir de la **ecuación 7** para $L_p \leq 4$ pulgadas (lbm/seg)

3.2.1.5. Consideraciones/Limitaciones de los Modelos para liberaciones (fugas) en Recipientes.

Modelo para Gases

- El gas se comporta como un gas ideal.
- El flujo es adiabático.
- El gas es un componente simple.

Modelo para Líquidos

- El fluido es incompresible.

Modelo de Fracción Flash

- El proceso de flasheo es adiabático.
- El material es un componente simple.

Modelo para Líquidos Saturados en Equilibrio

- El flujo es estrangulado.

- El equilibrio a dos fases está establecido.
- La ruptura (fuga) se presenta a ≥ 4 pulgadas del recipiente.
- Deberá emplearse el modelo para liberaciones en tuberías si la longitud de la tubería es mucho mayor a 4 pulgadas.
- El material es almacenado a su presión de vapor.
- El material es un componente simple.

Modelo para Líquidos Saturados en No Equilibrio

- El flujo es estrangulado.
- El equilibrio a dos fases no está completamente establecido.
- La ruptura (fuga) se presenta a < 4 pulgadas del recipiente.
- El material es almacenado a su presión de vapor.
- El material es un componente simple.

Modelo para Líquidos Subenfriados (Refrigerados)

- El líquido es almacenado a una presión mayor que la de su presión de vapor saturada.
- El material es un componente simple.

3.2.1.6. *Aplicaciones Prácticas de los Modelos para liberaciones (fugas) en Recipientes (Ejemplos).*

a Fuga de Gas – Flujo Sónico a partir de un Recipiente

Una válvula de relevo con un diámetro interior de 1 ½” y ubicada sobre un vagón de cloro, abre inadvertidamente. El vagón tiene una longitud aproximada de 41 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el vagón se encuentra lleno a la mitad de su capacidad cuando la válvula de relevo abre. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión en el vagón es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo de masa inicial a partir de la válvula de relevo.

- Relación de calores específicos del cloro (γ) = 1.325
- Peso Molecular del cloro (MW) = 70.9 kg/kgmol

1.- Evaluar la relación de presión de flujo crítico para determinar si el flujo es sónico ó subsónico.

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$\gamma = 1.325$$

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{1.325 + 1}\right)^{\frac{1.325}{1.325 - 1}} = 0.5413$$

$$P_x = 14.7 \text{ psia} = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_s = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lbf/ft}^2$$

$$\left(\frac{P_x}{P_s}\right) = \frac{14.7}{105} = 0.14 < 0.5413$$

Por lo tanto, el flujo es sónico.

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c MW}{R_g T_s} \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$C_D = 0.95 \quad (\text{de la Tabla 6})$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$P_s = 15,120 \text{ lbf/ft}^2$$

$$\gamma = 1.325$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$MW = 70.9 \text{ lbm/lbmole}$$

$$R_g = 1545 \text{ ft-lbf/lbmole} \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$T_s = 70^\circ\text{F} = 530 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\dot{Q} = (0.95) (0.012) (15,120) \sqrt{\frac{(1.325) (32.2) (70.9)}{(1545) (530)} \left(\frac{2}{1.325 + 1}\right)^{\frac{(1.325 + 1)}{(1.325 - 1)}}}$$

$\dot{Q} = 6.1 \text{ lbfm/sec}$

Flujo al cual se liberará el cloro por la acción (apertura) de la válvula de relevo bajo las condiciones establecidas.

b Fuga de Gas – Flujo Subsónico a partir de un Recipiente

Una válvula de relevo con un diámetro interior de 1 ½” y ubicada sobre un vagón de cloro, abre inadvertidamente. El vagón tiene una longitud aproximada de 41 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el vagón se encuentra lleno a la mitad de su capacidad cuando la válvula de relevo abre. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión en el vagón es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo subsónico de masa a partir de la válvula de relevo cuando la presión en el vagón sea de 2 psi por debajo de la presión de flujo crítica.

- Relación de calores específicos del cloro (γ) = 1.325
- Peso Molecular del cloro (MW) = 70.9 kg/kgmol

1.- Determinar la relación de presión de flujo crítico.

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$\gamma = 1.325$$

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = \left(\frac{2}{1.325 + 1}\right)^{\frac{1.325}{1.325 - 1}} = 0.5413$$

2.- Determinar la presión crítica de almacenamiento.

$$P_s = P_a \left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR}^{-1}$$

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_s = (14.7) (0.5413)^{-1} = 27.2 \text{ psia}$$

3.- Estimar la tasa de flujo másico empleando la ecuación para flujo subsónico.

$$\dot{Q} = C_D A P_s \sqrt{\frac{2g_c MW}{R_s T_s} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{(\gamma + 1)}{\gamma}} \right]} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$C_D = 0.95 \quad \text{(de la Tabla 6)}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \left(\frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2}\right) = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$P_a = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_s = 27.2 - 2 = 25.2 \text{ psia} = 3629 \text{ lbf/ft}^2$$

$$\gamma = 1.325$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbf-ft/lbf-sec}^2$$

$$MW = 70.9 \text{ lbm/lbmole}$$

$$R_s = 1545 \text{ ft-lbf/lbmole-R}$$

$$T_s = 70^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$\dot{Q} = (0.95) (0.012) (3629) \sqrt{\frac{(2) (32.2) (70.9)}{(1545) (530)} \frac{(1.325)}{(1.325 - 1)} \left[\left(\frac{2117}{3629}\right)^{\frac{2}{1.325}} - \left(\frac{2117}{3629}\right)^{\frac{(1.325 + 1)}{1.325}} \right]}$$

$$\dot{Q} = 1.5 \text{ lbf/sec}$$

Flujo al cual se liberará el cloro por la acción (apertura) de la válvula de relevo bajo las condiciones establecidas.

c Fuga de Líquido – Flujo a partir de un Recipiente

Una ruptura de 1 ½” ocurre en la parte inferior de un vagón de cloro. El vagón tiene aproximadamente una longitud de 41 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el vagón se encuentra lleno a la mitad de su capacidad cuando la ruptura ocurre. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión inicial en el vagón es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Densidad del líquido a 70 °F y 105 psia (ρ_l) = 87.7 lbm/ft³ (1,405 kg/m³)

El material "flashear" a partir de la fuga, pero dado que la ruptura se presenta en la pared del tanque, se aplica la ecuación para tasa de descarga de líquido.

$$\dot{Q} = C_D \rho_l A \left[\frac{2g_c (P_s - P_a)}{\rho_l} + 2gh \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

$$C_D = 0.61 \quad \text{(asumido)}$$

$$\rho_l = 87.7 \text{ lbm/ft}^3$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$P_s = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_a = 14.7 \text{ lbf/in}^2 = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$g = 32.2 \text{ ft/sec}^2$$

$$h = 4.25 \text{ ft}$$

$$\dot{Q} = (0.61)(87.7)(0.012) \left[\frac{(2)(32.2)(15,120 - 2117)}{(87.7)} + (2)(32.2)(4.25) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\dot{Q} = (0.642) [9548 + 274]^{\frac{1}{2}}$$

$$\dot{Q} = 64 \text{ lbm/sec}$$

Flujo al cual se liberará el cloro por la ruptura en el vagón bajo las condiciones establecidas.

d Fuga a Dos Fases – Flujo en Equilibrio a partir de un Recipiente

Una línea de líquido con un diámetro interior de 1 ½” y unida a la parte inferior de un tanque de almacenamiento de cloro, se rompe aproximadamente a 6 pulgadas de la pared exterior del tanque de almacenamiento. El tanque tiene aproximadamente una altura de 12 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el tanque se encuentra lleno a la mitad de su capacidad cuando ocurre la ruptura. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión inicial en el tanque de almacenamiento es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Densidad del líquido a 70 °F y 105 psia (ρ_l) = 87.7 lbm/ft³ (1,405 kg/m³)
- Densidad del vapor a 70 °F y 105 psia (ρ_v) = 1.35 lbm/ft³ (21.6 kg/m³)
- Calor latente de vaporización a 70 °F y 105 psia (ΔH_v) = 109 Btu/lbm (253 kJ/kg)
- Calor específico del líquido a 70 °F y 105 psia (C_{pl}) = 0.24 Btu/lbm-°R (1,004 J/kg-°K)

En este caso, se aplica la ecuación para flujo en equilibrio a dos fases a partir de un recipiente.

$$\dot{Q} = C_D \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \left[\frac{778 g_c}{T_s C_{p_l}} \right]^{1/4} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1/2 \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$C_D = 0.61 \quad (\text{líquido en mayor parte})$$

$$\Delta H_v = 109 \text{ Btu/lbm}$$

$$\rho_v = 1.35 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\rho_l = 87.7 \text{ lbm/ft}^3$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{p_l} = 0.24 \text{ Btu/lbm-R}$$

$$\dot{Q} = (0.61) \left[\frac{(0.012) (109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[\frac{(778) (32.2)}{(530) (0.24)} \right]^{1/4}$$

$\dot{Q} = 15 \text{ lbm/sec}$

Flujo al cual se liberará el cloro por la ruptura de la línea unida al tanque bajo las condiciones establecidas.

e Fuga a Dos Fases – Flujo en No Equilibrio a partir de un Recipiente

Una línea de líquido con un diámetro interior de 1 ½” y unida a la parte inferior de un tanque de almacenamiento de cloro, se rompe aproximadamente a 2 pulgadas de la pared exterior del tanque de almacenamiento. El tanque tiene aproximadamente una altura de 12 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el tanque se encuentra lleno a la mitad de su capacidad, cuando ocurre la ruptura. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión inicial en el tanque de almacenamiento es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Densidad del líquido a 70 °F y 105 psia (ρ_l) = 87.7 lbm/ft³ (1,405 kg/m³)
- Densidad del vapor a 70 °F y 105 psia (ρ_v) = 1.35 lbm/ft³ (21.6 kg/m³)
- Calor latente de vaporización a 70 °F y 105 psia (ΔH_v) = 109 Btu/lbm (253 kJ/kg)
- Calor específico del líquido a 70 °F y 105 psia (C_{pl}) = 0.24 Btu/lbm-°R (1,004 J/kg-°K)

En este caso, se aplica la ecuación para flujo en no equilibrio a dos fases a partir de un recipiente.

$$\dot{Q} = \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \left[\frac{778 g_c}{T_s C_{p_l} N} \right]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

$$N = \frac{778 \Delta H_v^2}{2(P_s - P_a) \rho_l C_D^2 (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1})^2 T_s C_{p_l}} + \frac{L_p}{L_c} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_v = 109 \text{ Btu/lbm}$$

$$\rho_v = 1.35 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\rho_l = 87.7 \text{ lbm/ft}^3$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{p_l} = 0.24 \text{ Btu/lbm-R}$$

$$P_s = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$C_D = 0.61$$

$$L_p = 0.167 \text{ ft}$$

$$L_c = 0.33 \text{ ft}$$

$$\dot{Q} = \left[\frac{(0.012)(109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[\frac{(778)(32.2)}{(530)(0.24)N} \right]^{1/2}$$

$$\dot{Q} = 1.8 \left[\frac{197}{N} \right]^{1/2}$$

N = número de moles en la mezcla.

$$N = \frac{(109)^2 (778)}{(2)(15,120 - 2117)(87.7)(0.61)^2 [(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}]^2 (530)(0.24)} + \frac{0.167}{0.33}$$

$$N = 0.161 + 0.506 = 0.667$$

$$\dot{Q} = 1.8 \left[\frac{197}{0.667} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$\dot{Q} = 31 \text{ lbm/sec}$

Flujo al cual se liberará el cloro por la ruptura de la línea unida al tanque bajo las condiciones establecidas.

f Fuga a Dos Fases – Flujo Subenfriado a partir de un Recipiente

Una línea de líquido con un diámetro interior de 1 ½” y unida a la parte inferior de un tanque de almacenamiento de cloro, se rompe aproximadamente a 6 pulgadas de la pared exterior del tanque de almacenamiento. El tanque tiene aproximadamente una altura de 12 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el tanque se encuentra lleno a la mitad de su capacidad cuando ocurre la ruptura. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión inicial en el tanque de almacenamiento es de 120 psia (condiciones de subenfriamiento – 15 psi por arriba de la presión de vapor saturada de 105 psia). Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Densidad del líquido a 70 °F y 105 psia (ρ_l) = 87.7 lbm/ft³ (1,405 kg/m³)
- Densidad del vapor a 70 °F y 105 psia (ρ_v) = 1.35 lbm/ft³ (21.6 kg/m³)
- Calor latente de vaporización a 70 °F y 105 psia (ΔH_v) = 109 Btu/lbm (253 kJ/kg)
- Calor específico del líquido a 70 °F y 105 psia (C_{pl}) = 0.24 Btu/lbm-°R (1,004 J/kg-°K)

En este caso, se aplica la ecuación para flujo en equilibrio subenfriado a dos fases a partir de un recipiente.

$$\dot{Q} = C_D \rho_1 A \left[\frac{2g_c (P_s - P_{sat})}{\rho_1} + 2gh + \left(\frac{\dot{Q}_s}{C_D \rho_1 A} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$\dot{Q}_s = C_D \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \left[\frac{778 g_c}{T_s C_{p_l}} \right]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1/2 \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_v = 109 \text{ Btu/lbm}$$

$$\rho_v = 1.35 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\rho_l = 87.7 \text{ lbm/ft}^3$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{p_l} = 0.24 \text{ Btu/lbm-R}$$

$$P_s = 120 \text{ psia} = 17,280 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_{sat} = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lbf/ft}^2$$

$$C_D = 0.61$$

$$g = 32.2 \text{ ft/sec}^2$$

$$h = 6 \text{ ft}$$

$$\dot{Q} = (0.61)(87.7)(0.012) \left[\frac{(2)(32.2)(17,280 - 15,120)}{(87.7)} + (2)(32.2)(6) + \left(\frac{\dot{Q}_s}{(0.61)(87.7)(0.012)} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\dot{Q} = (0.642) [1586.1 + 386.4 + 2.43 \dot{Q}_s^2]^{1/2}$$

$$\dot{Q}_s = (0.61) \left[\frac{(0.012)(109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[\frac{(778)(32.2)}{(530)(0.24)} \right]^{1/2}$$

$$\dot{Q}_s = 15 \text{ lbm/sec}$$

$$\dot{Q} = (0.642) [1586.1 + 386.4 + 2.43 (15)^2]^{1/2}$$

$\dot{Q} = 32 \text{ lbm/sec}$

Flujo al cual se liberará el cloro por la ruptura de la línea unida al tanque bajo las condiciones establecidas.

3.2.2. Modelos para Liberaciones (fugas) en Tuberías.

3.2.2.1. Gases.

Para llegar a los modelos de cálculo, correspondientes, para la estimación de la tasa de descarga, primeramente deberán efectuarse los siguientes cálculos:

- Determinar el factor de rugosidad de la tubería “ ϵ ” con ayuda de la siguiente tabla (Crowl y Louvar, 1990) para estimar ϵ/d :

TABLA 7

TIPO DE TUBERÍA	ϵ (ft)
Acero Riveteado	de 3×10^{-3} a 3×10^{-2}
Concreto	de 10^{-3} a 10^{-2}
Hierro Fundido	8.5×10^{-4}
Hierro Galvanizado	4.9×10^{-4}
Acero Comercial	1.5×10^{-4}
Hierro Forjado	1.5×10^{-4}
Vidrio	0.00
Plástico	0.00

En donde d = diámetro interior de la tubería (ft).

- Determinar el factor de fricción Fanning “ f_p ” a partir de las siguientes ecuaciones (Crowl y Louvar, 1990):

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{d} \right) \right] \quad \text{Para } \epsilon > 0 \quad \text{(Ecuación 10)}$$

$$f_p = 0, \text{ para } \epsilon = 0 \quad \text{(Ecuación 11)}$$

- Verificar flujo sónico (Crowl y Louvar, 1990):
 - a) Determinar iterativamente (aproximaciones sucesivas) el número Mach “Ma” aguas arriba empleando la siguiente ecuación:

$$\frac{\gamma + 1}{2} \log_e \left[\frac{2 + (\gamma - 1)Ma^2}{(\gamma + 1)Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + \gamma \left(\frac{4f_p L_p}{d} \right) = 0 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Al respecto, el número Mach se define como el índice de la velocidad del gas a la velocidad del sonido en el gas.

- b) Determinar el índice de presión de flujo crítico $(P/P_s)_{CR}$ a partir de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{P}{P_s} \right)_{CR} = Ma \sqrt{\frac{2 + (\gamma - 1)Ma^2}{\gamma + 1}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Si $P_a/P_s \leq (P/P_s)_{CR}$, entonces el flujo de gas saliente es sónico, y la tasa de descarga inicial de la tubería podrá calcularse a partir de la siguiente ecuación ($P_{sat} \geq P_s \geq P_a$):

$$\dot{Q} = AMaP_s \sqrt{\frac{\gamma g_c MW}{R_g T_s}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Si $P_a/P_s > (P/P_s)_{CR}$, entonces tendrá que determinarse el flujo de gas subsónico saliente de la tubería (Crowl y Louvar, 1990):

- a) Determinar iterativamente la temperatura del gas liberado “T” (°R) a partir de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) \log_e \left(\frac{P_s T}{P_a T_s}\right) - \left(\frac{\gamma-1}{2\gamma}\right) \left(\frac{P_s^2 T^2 - P_a^2 T_s^2}{T - T_s}\right) \left(\frac{1}{P_s^2 T} - \frac{1}{P_a^2 T_s}\right) + \left(\frac{4f_p L_p}{d}\right) = 0$$

(Ecuación 15)

- b) Determinar la tasa de descarga del gas (subsónico) a partir de la siguiente ecuación ($P_{sat} \geq P_s \geq P_a$):

$$\dot{Q} = A \sqrt{\left(\frac{2g_c MW}{Rg}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \left[\frac{T - T_s}{\left(\frac{T_s}{P_s}\right)^2 \left(\frac{T}{P_a}\right)^2}\right]} \quad \text{(Ecuación 16)}$$

3.2.2.2. **Líquidos.**

Para llegar a los modelos de cálculo correspondientes, para la estimación de la tasa de descarga, primeramente deberán efectuarse los siguientes cálculos:

- Determinar ϵ/d de la **TABLA 7 (página 69)**.
- Determinar $Re_{\sqrt{f_p}}$ a partir de la siguiente ecuación (derivada de Crowl y Louvar, 1990):

$$Re_{\sqrt{f_p}} = \frac{d\rho l}{\mu l} \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[\frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho l} + gh \right]} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

En donde μ_1 = viscosidad del líquido (lbm/ft-s)

- Finalmente, determinar la tasa de descarga a partir de una de las siguientes ecuaciones (derivadas de Crowl y Louvar, 1990) ($P_s \geq P_a > P_{sat}$):

$$\dot{Q} = \frac{A\rho l \left(Re_{\sqrt{f_p}}\right) \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[\frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho l} + gh \right]}}{16} \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Aplicable para $(\text{Re}\sqrt{f_p}) \leq 180$ (flujo laminar)

$$\dot{Q} = -4A\rho l \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right) + \frac{1.255}{\text{Re}\sqrt{f_p}} \right] \sqrt{\frac{d}{2Lp} \left[\frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho l} + gh \right]} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Aplicable para $(\text{Re}\sqrt{f_p}) \geq 525$ (flujo turbulento)

3.2.2.3. *Flujo a Dos Fases.*

La tasa de descarga inicial, para un líquido saturado que flashea a partir de una fuga en una tubería, puede calcularse a partir de la siguiente ecuación (derivada por Fauske y Epstein, 1989) ($P_s = P_{\text{sat}} > P_a$):

$$\dot{Q} = \text{Fred} \left[\frac{A\Delta H v}{\rho v^{-1} - \rho l^{-1}} \right] \sqrt{\frac{778g_c}{TsC_{pl}}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

En donde, Fred = factor de reducción de flujo (adimensional). Este factor se toma en cuenta para la pérdida friccional y varía con L_p/d :

$$\text{Fred} = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.006 \left(\frac{L_p}{d} \right)}} \quad (\text{Ecuación 20a})$$

En donde:

$d =$ diámetro interior de la tubería (ft)

$L_p =$ longitud de la tubería del recipiente al punto de liberación (ft)

3.2.2.4. Consideraciones/Limitaciones de los Modelos para liberaciones (fugas) en Tuberías.

Modelo para Gases

- El gas se comporta como un gas ideal.
- El flujo es adiabático.
- El gas es un componente simple.
- El flujo es completamente turbulento, es decir, f_p es constante e independiente del número de Reynolds.
- La tubería es recta sin restricciones (válvulas, accesorios).

Modelo para Líquidos

- El fluido es incompresible.
- El líquido es un componente simple.
- La tubería es recta sin restricciones (válvulas, accesorios).
- El flujo es adiabático.

Modelo para Líquidos Saturados

- El flujo es estrangulado.
- El equilibrio a dos fases está establecido.
- La longitud de la tubería es ≥ 4 pulgadas.
- El material es almacenado a su presión de vapor.
- El material es un componente simple.
- El flasheo de la porción líquida de la liberación a dos fases, no es significativo:

3.2.2.5. *Aplicaciones Prácticas de los Modelos para liberaciones (fugas) en Tuberías (Ejemplos).*

a Fuga de Gas – Flujo a partir de una Tubería

Una línea de vapor de acero comercial, con un diámetro interior de 1 ½” y unida a un tanque de almacenamiento de cloro, se rompe aproximadamente a 40 ft del tanque de almacenamiento. El tanque tiene aproximadamente una altura de 12 ft y un diámetro de 8 ½ ft. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión inicial en el tanque de almacenamiento es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Relación de calores específicos (γ) = 1.325
- Peso molecular (MW) = 70.9 lbm/lbmol (70.9 kg/kgmol)

1.- Estimar el factor de fricción de Fanning " f_p ". El factor de rugosidad ϵ para tubería de acero comercial es de 1.5×10^{-4} (TABLA 7, página 69):

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{d} \right) \right] \quad \text{(Ecuación 10)}$$

$$d = 1\frac{1}{2} \text{ in} = 0.125 \text{ ft}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{1.5 \times 10^{-4}}{0.125} \right) \right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_p}} = 13.96$$

$$f_p = 5.13 \times 10^{-3}$$

2.- Determinar el número Mach (Ma) aguas arriba empleando la siguiente ecuación:

$$\frac{\gamma + 1}{2} \log_e \left[\frac{2 + (\gamma - 1) Ma^2}{(\gamma + 1) Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + \gamma \left(\frac{4 f_p L_p}{d} \right) = 0 \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$\gamma = 1.325$$

$$L_p = 40 \text{ ft}$$

$$\frac{1.325 + 1}{2} \log_e \left[\frac{2 + (1.325 - 1) Ma^2}{(1.325 + 1) Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + (1.325) \left(\frac{4 (5.13 \times 10^{-3}) (40)}{(0.125)} \right) = 0$$

$$1.163 \log_e \left[\frac{2 + 0.325 Ma^2}{2.325 Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + 8.7 = 0$$

Solucionando iterativamente:

$$Ma = 0.283$$

3.- Determinar la relación de presión de flujo crítico a partir de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{P}{P_1} \right)_{CR} = Ma \sqrt{\frac{2 + (\gamma - 1) Ma^2}{\gamma + 1}} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = (0.283) \sqrt{\frac{2 + (1.325 - 1) (0.283)^2}{(1.325 + 1)}}$$

$$\left(\frac{P}{P_s}\right)_{CR} = 0.264$$

4.- *Determinar si el flujo es sónico ó subsónico:*

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_s = 105 \text{ psia} = 15,120 \text{ lbf/ft}^2$$

$$\frac{P_a}{P_s} = \frac{2117}{15,120} = 0.14 < 0.264 \quad \text{Por lo tanto, el flujo es sónico}$$

5.- *Estimar la tasa de flujo másico empleando la ecuación para flujo sónico:*

$$\dot{Q} = A \text{ Ma } P_s \sqrt{\frac{\gamma g_c \text{ MW}}{R_g T_s}} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbf-ft/lbf-sec}^2$$

$$\text{MW} = 70.9 \text{ lbm/lbmole}$$

$$R_g = 1545 \text{ ft-lbf/lbmole-R}$$

$$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$\dot{Q} = (0.012) (0.283) (15,120) \sqrt{\frac{(1.325) (32.2) (70.9)}{(1545) (530)}}$$

$\dot{Q} = 3.1 \text{ lbf/sec}$

Flujo al cual se liberará el cloro por la ruptura de la línea unida al tanque bajo las condiciones establecidas.

b Fuga de Líquido – Flujo a partir de una Tubería

Una línea de líquido de acero comercial con un diámetro interior de 1 ½” y unida a la parte inferior de un tanque de almacenamiento de benceno, se rompe aproximadamente a 40 ft del tanque de almacenamiento. El tanque tiene aproximadamente una altura de 12 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el tanque se encuentra lleno de benceno líquido a la mitad de su capacidad cuando ocurre la ruptura. Las condiciones del tanque de almacenamiento son temperatura ambiente (70 °F) y 30 psia de presión. Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Densidad del líquido a 70 °F y 30 psia (ρ_l) = 54.8 lbm/ft³ (878 kg/m³)
- Viscosidad del líquido a 70 °F y 30 psia (μ_l) = 4.3 x 10⁻⁴ lbm/ft-seg (6.4 x 10⁻⁴ kg/m-seg)

1.- Estimar $Re\sqrt{f_p}$ a partir de la siguiente ecuación:

$$Re\sqrt{f_p} = \frac{d\rho_1}{\mu_1} \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[\frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho_1} + gh \right]} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

$$d = 1\frac{1}{2} \text{ in} = 0.125 \text{ ft}$$

$$\rho_1 = 54.8 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\mu_1 = 4.3 \times 10^{-4} \text{ lbm/ft-sec}$$

$$L_p = 40 \text{ ft}$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$P_s = 30 \text{ psia} = 4320 \text{ lbf/ft}^2$$

$$P_a = 14.7 \text{ psia} = 2117 \text{ lbf/ft}^2$$

$$g = 32.2 \text{ ft/sec}^2$$

$$h = 6 \text{ ft}$$

$$Re\sqrt{f_p} = \frac{(0.125)(54.8)}{(4.3 \times 10^{-4})} \sqrt{\frac{(0.125)}{(2)(40)} \left[\frac{(32.2)(4320 - 2117)}{(54.8)} + (32.2)(6) \right]}$$

$$Re\sqrt{f_p} = 24,288 > 525 \quad \text{Por lo tanto, el flujo es turbulento.}$$

2.- Estimar la tasa de flujo másico empleando la ecuación para flujo turbulento:

$$\dot{Q} = -4A\rho_1 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{d} \right) + \frac{1.255}{Re\sqrt{f_p}} \right] \sqrt{\frac{d}{2L_p} \left[\frac{g_c(P_s - P_a)}{\rho_1} + gh \right]} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \frac{(1 \text{ ft}^2)}{(144 \text{ in}^2)} = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\epsilon = 1.5 \times 10^{-4} \text{ ft} \quad (\text{para tubería de acero comercial})$$

$$\dot{Q} = -4 (0.012) (54.8) \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{1.5 \times 10^{-4}}{0.125} \right) + \frac{1.255}{24288} \right] \sqrt{\frac{(0.125)}{(2)(40)} \left[\frac{(32.2)(4320 - 2117)}{(54.8)} + (32.2)(6) \right]}$$

$$Q = 8.51 \text{ lbm/seg}$$

Flujo al cual se liberará el benceno por la ruptura de la línea unida al tanque bajo las condiciones establecidas.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

c Fuga a Dos Fases – Flujo a partir de una Tubería

Una línea de líquido con un diámetro interior de 1 ½” y unida a la parte inferior de un tanque de almacenamiento de cloro, se rompe aproximadamente a 40 ft de la pared exterior del tanque de almacenamiento. El tanque tiene aproximadamente una altura de 12 ft y un diámetro de 8 ½ ft. A la vez, el tanque se encuentra lleno a la mitad de su capacidad cuando ocurre la ruptura. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la presión inicial en el tanque de almacenamiento es de 105 psia (condiciones saturadas). Estimar la tasa de flujo másico inicial a partir de la ruptura.

- Densidad del líquido a 70 F y 105 psia (ρ_l) = 87.7 lbm/ft³ (1,405 kg/m³)
- Densidad del vapor a 70 °F y 105 psia (ρ_v) = 1.35 lbm/ft³ (21.6 kg/m³)
- Calor latente de vaporización a 70 °F y 105 psia (ΔH_v) = 109 Btu/lbm (253 kJ/kg)
- Calor específico del líquido a 70 °F y 105 psia (C_{pl}) = 0.24 Btu/lbm-°R (1,004 J/kg-°K)

En este caso, aplica la ecuación para flujo en equilibrio a dos fases a partir de una tubería:

$$\dot{Q} = F_{red} \left[\frac{A \Delta H_v}{\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}} \right] \left[\frac{778 g_c}{T_s C_{pl}} \right]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 20)}$$

El factor de reducción de flujo "Fred", es función tanto de la longitud de la tubería "Lp" como del diámetro de la misma "d":

$$L_p = 40 \text{ ft}$$

$$d = 1\frac{1}{2} \text{ in} = 0.125 \text{ ft}$$

$$\frac{L_p}{d} = \frac{40}{0.125} = 320$$

$$F_{red} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.006 \left(\frac{L_p}{d} \right)}} \quad \text{(Ecuación 20a)}$$

$$F_{red} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.006 (320)}}$$

$$F_{red} = 0.59$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (1\frac{1}{2} \text{ in})^2}{4} \left(\frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} \right) = 0.012 \text{ ft}^2$$

$$\Delta H_v = 109 \text{ Btu/lbm}$$

$$\rho_v = 1.35 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\rho_l = 87.7 \text{ lbm/ft}^3$$

$$g_c = 32.2 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

$$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 530 \text{ R}$$

$$C_{pl} = 0.24 \text{ Btu/lbm-R}$$

$$\dot{Q} = (0.59) \left[\frac{(0.012) (109)}{(1.35)^{-1} - (87.7)^{-1}} \right] \left[\frac{(778) (32.2)}{(530) (0.24)} \right]^{1/2}$$

$\dot{Q} = 15 \text{ lbm/sec}$

Flujo al cual se liberará el cloro por la ruptura de la línea unida al tanque bajo las condiciones establecidas.

3.2.3. *Secuencia a seguir para la aplicación de los Modelos para el Cálculo de Tasas de Descarga.*

1. Decidir si la liberación es instantánea o continua.
2. Para una liberación continua:
 - 2.1 Seleccionar un tamaño de orificio para la fuga, con base en el diámetro de la tubería y dimensiones de los accesorios.
 - 2.2 Determinar la duración de la liberación con base en el tiempo requerido para aislar la fuga ó ruptura.
3. Determinar el tipo de liberación (gas, líquido ó dos fases), con base en las condiciones de almacenamiento (presión y temperatura) del material.
4. Seleccionar un modelo apropiado (recipiente ó tubería) para calcular la tasa de descarga inicial de la fuga, tomando en consideración la geometría del contenedor de almacenamiento, así como la localización de la fuga/ruptura.

**3.3 MODELACIONES PARA EL CÁLCULO DE DERRAMES
(FORMACIÓN DE CHARCOS DE LÍQUIDO) Y DE LA TASA DE
EVAPORACIÓN.**

3.3.1. Generalidades.

Los derrames de líquidos generalmente se categorizan como *en ebullición* ó *en no ebullición* y así como también en *confinados* ó *no confinados*.

Los *líquidos en ebullición* tienen puntos de evaporación por debajo de la temperatura ambiente a presión atmosférica (cloro, propano), mientras que los *líquidos en no ebullición* los tienen por arriba de la temperatura ambiente a presión atmosférica (benceno, gasolina).

Los materiales modelados como *líquidos en ebullición*, se encuentran normalmente en fase vapor a temperatura y presión ambiente. Dichos materiales se almacenan normalmente como líquidos en una de las siguientes formas:

1. Como *gas licuado* almacenado a temperatura ambiente pero a una presión lo suficientemente alta para mantener al material en estado líquido.
2. Como un *líquido criogénico* almacenado a presión ambiente y a una temperatura lo suficientemente baja para mantener al material en estado líquido; es decir, a una temperatura igual o por debajo de su punto de ebullición

Un *gas licuado* liberado se expande adiabáticamente, y algo de este mismo flashea a vapor. Después de la expansión adiabática, el gas licuado remanente forma un charco de líquido a su punto de ebullición. Bajo este esquema, puede entonces emplearse un modelo para líquidos criogénicos.

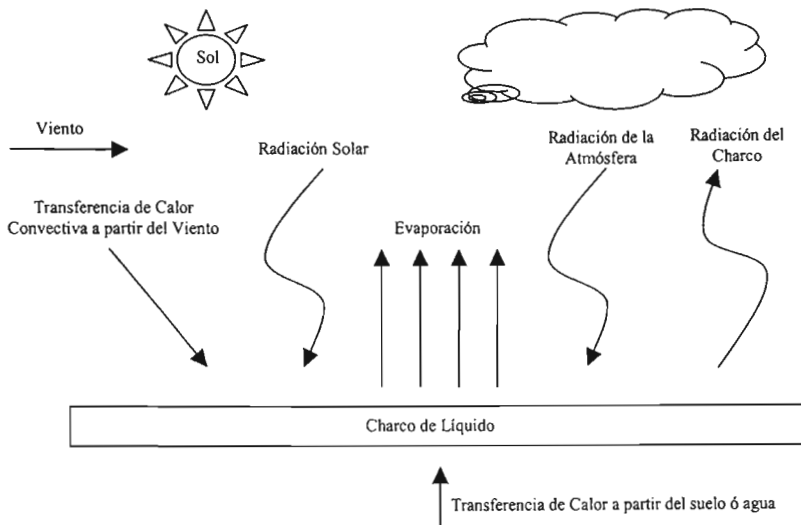
A la vez, una liberación de *líquido criogénico* forma un charco de líquido a su punto de ebullición, y evapora por el efecto del calor de sus alrededores. Durante el periodo inicial de la evaporación, tanto los gases licuados como los líquidos criogénicos en

charcos, absorben la mayoría del calor requerido para el proceso de evaporación, por conducción de calor, a partir de la superficie en donde se presente el derrame (piso ó agua).

Fuentes de Calor para Evaporación

- El piso ó el agua (transferencia de calor conductiva).
- La atmósfera (transferencia de calor convectiva y/o por radiación).
- El sol (transferencia de calor por radiación).

FIGURA 5



Propagación del Charco

En adición, a la transferencia de calor, la propagación del charco (incremento en el área superficial del charco) formado por el líquido derramado, afecta también a la tasa de evaporación total de un charco de líquido, por lo que un área superficial más grande del charco resultará en una mayor transferencia de calor y, por lo tanto, en una tasa de evaporación mayor.

Un derrame no confinado se propagará hasta que la tasa de propagación sea igual a la tasa de evaporación, ó cuando la superficie en donde se presente el derrame se lo impida.

Espesor Mínimo para un Charco en Propagación no Confinado

TNO (1978), sugiere que un líquido dejará de propagarse cuando éste alcance un espesor mínimo que es característico de la superficie sobre la cual se presente el derrame. Al respecto, TNO sugiere un espesor mínimo de 5 mm para superficies suaves y varios centímetros para superficies menos suaves.

Cremer y Warner (1982) proporcionan valores más específicos para espesores mínimos:

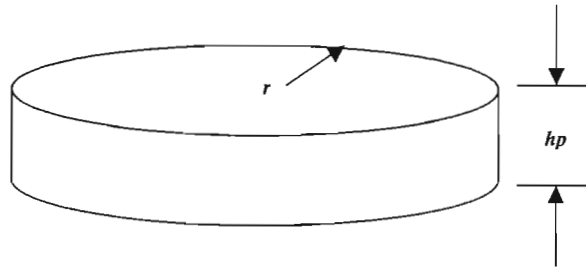
TABLA 8

<i>SUPERFICIE</i>	<i>ESPESOR MÍNIMO (h_{min}, mm)</i>
Tierra Dura Arenosa	25
Tierra de Cultivo, Pastura	20
Arena Suave, Grava	10
Arena Suave, Piedra, Concreto	5
Agua en Calma	1.8

3.3.2. *Modelo Shaw & Briscoe (SB) para un derrame en agua de líquidos en ebullición.*

Un charco de líquido al tiempo “t”, puede representarse como un disco de radio “r” y altura uniforme “ h_p ”:

FIGURA 6



Un charco de líquido que simultáneamente se propaga y evapora, puede representarse por medio de las siguientes ecuaciones:

$$V_p = V_{p0} + V_{pt} - \frac{m_p}{\rho_l} \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$h_p = \frac{V_p}{\pi r^2} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2g(\rho_w - \rho_l)h_p}{\rho_w}} \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$\dot{m}_p = \pi r^2 \rho_l \Phi \quad (\text{Ecuación 24})$$

En donde:

- $V_p =$ volumen de líquido en el charco (m^3).
- $V_{p0} =$ volumen de líquido liberado instantáneamente (m^3).
- $V_{pt} =$ tasa de descarga volumétrica del líquido en el charco (m^3/s).
- $t =$ tiempo como medida a partir del instante en que ocurre la liberación (s).
- $m_p =$ masa total de líquido evaporado del charco al tiempo t (kg).
- $\rho_l =$ densidad del líquido derramado (kg/m^3).

- $\rho_w =$ densidad del agua, en la cual el líquido es derramado (kg/m^3).
- $g =$ aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s^2).
- $\dot{m}_p =$ tasa de evaporación del charco de líquido (kg/s).
- $r =$ radio del charco de líquido (m).
- $\Phi =$ tasa de regresión de la superficie de líquido (m/s).
- $h_p =$ espesor o profundidad del charco (m).

La solución simultánea de las ecuaciones 21, 22, 23 y 24, requiere la aplicación de métodos numéricos. Una solución analítica aproximada puede obtenerse si la variable m_p es ignorada en la ecuación 21; es decir, que r y m_p sean consideradas como variables independientes.

Para derrames instantáneos en agua, las variables “ r ”, “ \dot{m}_p ”, y “ m_p ” pueden calcularse empleando las siguientes ecuaciones:

$$r = \sqrt{\left(\frac{8g(\rho_w - \rho_l)Vp_0}{\pi\rho_w}\right)^{0.5} t + r_0^2} \quad (\text{Ecuación 25})$$

En donde $r_0 =$ radio inicial del charco (m).

$$\dot{m}_p = \pi\rho_l\Phi \left[\left(\frac{8g(\rho_w - \rho_l)Vp_0}{\pi\rho_w}\right)^{0.5} t + r_0^2 \right] \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$m_p = \pi\rho_l\Phi \left[\left(\frac{2g(\rho_w - \rho_l)Vp_0}{\pi\rho_w}\right)^{0.5} t^2 + r_0^2 t \right] \quad (\text{Ecuación 27})$$

Para derrames en agua con una tasa de descarga infinita, las variables “ r ”, “ \dot{m}_p ”, y “ m_p ” pueden calcularse empleando las siguientes ecuaciones:

$$r = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{8g(\rho_w - \rho_l) \dot{V}_p}{\pi \rho_w} \right)^{0.25} t^{0.75} \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$\dot{m}_p = \frac{2}{3} \pi \rho_l \Phi \left(\frac{8g(\rho_w - \rho_l) \dot{V}_p}{\pi \rho_w} \right)^{0.5} t^{1.5} \quad (\text{Ecuación 29})$$

$$m_p = \frac{4}{15} \rho_l \Phi \left(\frac{8\pi g(\rho_w - \rho_l) \dot{V}_p}{\rho_w} \right)^{0.5} t^{2.5} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Tasa de Regresión de la Superficie de Líquido (Φ)

Shaw & Briscoe (1978) proporcionan los siguientes datos experimentales para Φ :

TABLA 9

<i>MATERIAL DERRAMADO</i>	<i>SUPERFICIE</i>	Φ (m/s)
Gas Natural Licuado	Agua	4.34×10^{-4}
		3.72×10^{-4}
Nitrógeno Líquido	Agua	1.57×10^{-4}
		2.04×10^{-4}

Así mismo, Shaw & Briscoe (1978) sugieren usar un valor de $\Phi = 4.7 \times 10^{-4}$ m/s (dato obtenido a partir de experimentos de Esso con derrames de Gas Natural Licuado) para resultados conservadores.

3.3.3. Modelo Shaw & Briscoe (SB) para un derrame, en tierra, de líquidos en ebullición.

Shaw & Briscoe (1978) presentan las siguientes ecuaciones adaptadas para el cálculo de derrames de líquidos en ebullición sobre tierra:

$$V_p = V_{p0} + \dot{V}_p t - \frac{m_p}{\rho l} \quad (\text{Ecuación 31})$$

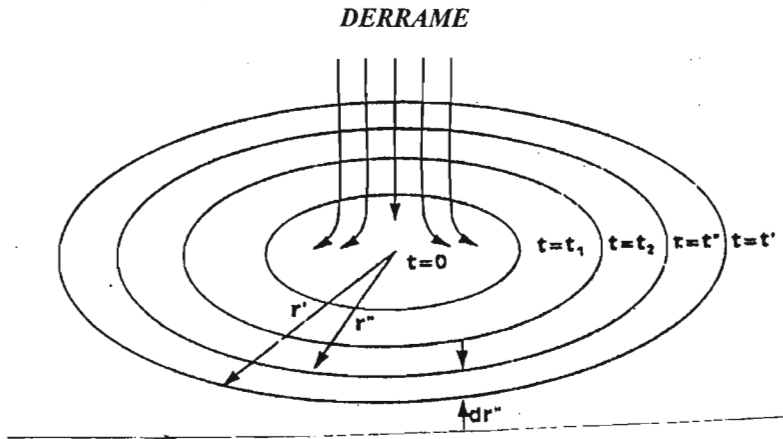
$$h_p = \frac{V_p}{\pi r^2} \quad (\text{Ecuación 32})$$

$$\frac{dr}{dt} = \sqrt{2gh_p} \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$\dot{m}_p = \frac{2\pi X k_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s}} \int_0^{r'(t)} \frac{r'' dr''}{\sqrt{t' - t''}} \quad (\text{Ecuación 34})$$

- X = factor de corrección de rugosidad superficial (adimensional).
 k_s = conductividad térmica de la superficie (W/m-°K).
 T_g = temperatura de la superficie (°K).
 T_b = punto de ebullición del líquido a presión atmosférica (°K).
 ΔH_v = calor latente de vaporización a la temperatura del punto de ebullición (J/kg).
 α_s = difusividad térmica de la superficie (m²/s).
 r' = radio del charco de líquido al tiempo t' (m).
 r'' = radio del charco de líquido al tiempo t'' (m).
 t' = tiempo al cual el charco se propaga a un radio de r' (s).
 t'' = tiempo al cual el charco se propaga a un radio de r'' (s).

FIGURA 7



La solución simultánea de las ecuaciones 31, 32, 33 y 34, requiere la aplicación de métodos numéricos. La aproximación más simple es asumir que el líquido derramado se propaga instantáneamente, a su máximo tamaño; asumiendo propagación instantánea del líquido a un área de derrame dada A_p (m^2), la tasa de evaporación de la masa “ m_p ” puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$m_p = \frac{A_p X k_s (T_g - T_b)}{\Delta H v \sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Esta ecuación sobrestima la tasa de evaporación, dado que ésta desconoce el efecto de la propagación del charco. Una solución analítica aproximada puede obtenerse si la variable m_p es ignorada en la ecuación 31; es decir, que r y m_p sean consideradas como variables independientes.

Para una descarga instantánea en tierra, las variables “ r ”, “ m_p ”, y “ m_p ” pueden calcularse empleando las siguientes ecuaciones:

$$r = \sqrt{\left(\frac{8gVp_0}{\pi}\right)^{0.5} t + r_0^2} \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$\dot{m}_p = \frac{4Xk_s(Tg - Tb)}{\Delta H\nu\sqrt{\pi\alpha_s}} \sqrt{2\pi gV_{p_0}t} \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$m_p = \frac{8}{3} \left(\frac{Xk_s(Tg - Tb)}{\Delta H\nu\sqrt{\pi\alpha_s}} \right) (2\pi gV_{p_0})^{0.5} t^{1.5} \quad (\text{Ecuación 38})$$

Para derrames en tierra con una tasa de descarga infinita, las variables “r”, “ \dot{m}_p ”, y “ m_p ” pueden calcularse empleando las siguientes ecuaciones:

$$r = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{8gVp}{\pi} \right)^{0.25} t^{0.75}} \quad (\text{Ecuación 39})$$

$$\dot{m}_p = \pi^{1.5} \left[\frac{Xk_s(Tg - Tb)}{\Delta H\nu\sqrt{\pi\alpha_s}} \right] (2gVp)^{0.5} t \quad (\text{Ecuación 40})$$

$$m_p = \pi^{1.5} \left[\frac{Xk_s(Tg - Tb)}{\Delta H\nu\sqrt{\pi\alpha_s}} \right] \left(\frac{gVp}{2} \right)^{0.5} t^2 \quad (\text{Ecuación 41})$$

Factores de la Superficie

Se consideran 3 variables (X, k_s y α_s) para la interacción del líquido con la superficie sobre la cual se forma el charco.

El factor de corrección de rugosidad superficial "X", se considera para el área superficial incrementada disponible como resultado de la textura áspera de una superficie. Cremer y Warner (1982), compararon el resultado teórico del modelo SB con datos experimentales de derrames de líquidos, recomendando $X = 1$ para superficies impenetrables (por ejemplo concreto), así como $X = 3$ para otras superficies (por ejemplo tierras).

Por otra parte, Cremer y Warner (1982) proporcionan valores específicos para k_s y α_s :

TABLA 10

SUPERFICIE	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (K_s, W/m-°K)	DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α_s, m²/s)
Concreto	0.92	4.16×10^{-7}
Tierra (promedio)	0.96	4.59×10^{-7}
Tierra (seca, arenosa)	0.26	1.98×10^{-7}
Tierra (húmeda, 8 % de agua, arenosa)	0.59	3.36×10^{-7}

TNO (1979) también proporciona valores adicionales para k_s y α_s :

TABLA 11

SUPERFICIE	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (K_s, W/m-°K)	DIFUSIVIDAD TÉRMICA (α_s, m²/s)
Suelo común (8 % de agua)	0.9	4.3×10^{-7}
Arena (seca)	0.3	2.3×10^{-7}
Suelo Arenoso (seco)	0.3	2.0×10^{-7}
Suelo Arenoso (8 % de agua)	0.6	3.3×10^{-7}
Madera	0.2	4.5×10^{-7}
Grava	2.5	1.1×10^{-6}
Acero al Carbón	45	1.3×10^{-5}

3.3.4. Consideraciones/Limitaciones de los Modelos SB.

Modelo para Derrames en Agua

- La densidad del agua es mayor que la del material derramado.
- Aplica a materiales con puntos de ebullición muy bajos (Gas Natural Licuado, Gas L. P.).
- Asume que tanto el radio del charco “r” como la masa evaporada “m_p”, son variables independientes.
- No reconoce las contribuciones a la evaporación, por el efecto de la transferencia de calor, por convección y radiación.
- El líquido en el derrame es un componente simple.
- El charco se forma sobre una superficie no confinada.
- La tasa de derrame volumétrica infinita es constante.
- Las ecuaciones que se presentan para el modelo SB, corresponden a soluciones analíticas.
- Una solución numérica más precisa contará para propagación y evaporación simultáneas, considerando al radio del charco y a la masa evaporada como variables dependientes.

Modelo para Derrames en Tierra

- El derrame ocurre sobre una superficie plana y suave.
- El modelo SB no toma en cuenta la contribución a la evaporación, por el efecto de la transferencia de calor, por convección y radiación.
- El charco formado es muy profundo.
- La tasa del derrame para una liberación infinita es constante.
- El líquido en el derrame es un componente simple.
- Las ecuaciones que se presentan para el modelo SB, corresponden a soluciones analíticas.
- Una solución numérica más precisa contará para propagación y evaporación simultáneas, considerando al radio del charco y a la masa evaporada como variables dependientes.

3.3.5. Modelo Sutton para un Derrame, en Tierra, de Líquidos en No Ebullición.

Las tasas de evaporación para derrames de líquidos, en no ebullición, no son dependientes sobre la transferencia de calor por conducción. Más bien, las tasas de evaporación son más dependientes sobre la transferencia de masa.

Cremer y Warner (1982), presentan el modelo de Sutton con la modificación de Pasquill para tasas de evaporación, en una atmósfera turbulenta:

$$m p(r) = K' u^{(2-n_s)/(2+n_s)} r^{(4+n_s)/(2+n_s)} \quad (\text{Ecuación 42})$$

Aplica para un área circular de radio r.

$$m p(x_0, y_0) = K u^{(2-n_s)/(2+n_s)} x_0^{2/(2+n_s)} y_0 \quad (\text{Ecuación 43})$$

Aplica para una longitud x_0 y ancho y_0 .

$$K' = a' \kappa_0 D_v^{2n_s/(2+n_s)} z_1^{(-n_s)(2+n_s)} \quad (\text{Ecuación 44})$$

$$K = a \kappa_0 D_v^{2n_s/(2+n_s)} z_1^{(-n_s)(2+n_s)} \quad (\text{Ecuación 45})$$

$$\kappa_0 = \frac{P_v M W_s}{R g T p} \quad (\text{Ecuación 46})$$

- m_p = tasa de evaporación de la masa del charco de líquido (kg/s).
- x_0 = longitud, vientos abajo, del charco rectangular (m).
- y_0 = ancho del charco rectangular (m).
- u = velocidad del viento (m/s).
- r = radio del charco de líquido (m).

- Dv = difusividad del vapor (m²/s).
 Pv = presión de vapor en la superficie líquida (N/m²).
 MWs = peso molecular (kg/kgmol).
 Rg = constante universal de los gases (8314 J/kgmol-°K).
 Tp = temperatura del charco de líquido (°K).
 z₁ = altura de la medición de la velocidad del viento, normalmente 10 m.
 n_s = parámetro de estabilidad atmosférica de Sutton (adimensional).
 a = constante derivada empíricamente (función de la estabilidad atmosférica).
 a' = constante derivada empíricamente (función de la estabilidad atmosférica).

De acuerdo con Cremer y Warner (1982), Pasquill afirma que la difusividad del vapor Dv es una característica de cada material, pero para la mayoría de los hidrocarburos, ésta no varía mucho. Al respecto, Pasquill recomienda un valor promedio de Dv = 7.95 x 10⁻⁶ m²/s.

Usando el valor promedio para Dv citado anteriormente, y asumiendo que la velocidad del viento se mide a una altura estándar de 10 m, Cremer y Warner (1982) presentan los siguientes datos:

TABLA 12

ESTABILIDAD	n _s (adimensional)	a (constante dimensional)	a' (constante dimensional)	K/k _o (constante dimensional)	K'/k _o (constante dimensional)
Inestable	0.2	1.332 x 10 ⁻²	4.010 x 10 ⁻²	1.278 x 10 ⁻³	3.846 x 10 ⁻³
Neutral	0.25	2.756 x 10 ⁻²	8.223 x 10 ⁻²	1.579 x 10 ⁻³	4.685 x 10 ⁻³
Estable	0.3	5.161 x 10 ⁻²	1.527 x 10 ⁻¹	1.786 x 10 ⁻³	5.285 x 10 ⁻³

Reacomodando las ecuaciones 42 y 43 para permitir el uso de los valores para K'/k_o y K/k_o, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$m p(r) = (K'/k_0) \frac{P_v M W_s}{R_g T_p} u^{(2-n_s)/(2+n_s)} r^{(4+n_s)/(2+n_s)} \quad (\text{Ecuación 47})$$

$$\dot{m}_p(x_0, y_0) = (K / \kappa_0) \frac{P_v MW_s}{R_g T_p} u^{(2-n_s)/(2+n_s)} x_0^{2/(2+n_s)} y_0 \quad (\text{Ecuación 48})$$

3.3.6. *Consideraciones/Limitaciones del Modelo Sutton.*

- La atmósfera es turbulenta, es decir, no está en calma.
- La tasa de transferencia de masa es baja.
- La temperatura del líquido permanece constante a temperatura ambiente durante el proceso de evaporación.
- El líquido es un componente simple.
- El charco no se propaga o extiende, es decir, el área del charco es constante.

3.3.7. *Modelo Clewell para un Derrame en Tierra, de Líquidos en No Ebullición.*

Clewell (1983) desarrolló las siguientes relaciones para estimar la tasa de evaporación de masa a partir de derrames de líquidos volátiles y en no ebullición, basados en derrames de hidrazina:

$$\dot{m}_p = 0.08u^{0.75} A_p(1 + 0.0043T_p^2) Z_{cl} \quad (\text{Ecuación 49})$$

$$Z_{cl} = \frac{P_{vB} MW_B}{P_{vHy} MW_{Hy}} \quad (\text{Ecuación 50})$$

En donde:

- \dot{m}_p = tasa de evaporación de la masa del charco de líquido (kg/h).
- u = velocidad del viento (m/s).
- A_p = área superficial del charco de líquido (m²).
- T_p = temperatura del charco de líquido (°C).
- Z_{cl} = factor de volatilidad (adimensional).
- P_{vB} = presión de vapor del químico de interés a la temperatura del charco.
- MW_B = peso molecular del químico de interés (kg/kgmol).

P_{vHy} = presión de vapor de la hidrazina a la temperatura del charco (N/m^2).

MW_{Hy} = peso molecular de la hidrazina (32 kg/kgmol).

La presión de vapor de la hidrazina, como una función de la temperatura, puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$\log_{10} P_{vHy} = -4.38123 - \frac{653.88}{T} + 0.047914T - 4.9886 \times 10^{-5} T^2 \quad (\text{Ecuación 51})$$

TABLA 13

DATOS DE FACTOR DE VOLATILIDAD PARA QUÍMICOS TÓXICOS SELECCIONADOS

<i>Químico</i>	<i>Presión de Vapor a 27 °C (N/m^2)</i>	<i>Peso Molecular (kg/kgmol)</i>	<i>Factor de Volatilidad (Zcl)</i>
Anilina	1.87×10^{-3}	93	2.6
Benceno	1.41×10^{-4}	78	16
Pentafluoruro de Bromo	5.85×10^{-4}	175	149
Trifluoruro de Cloro	1.83×10^{-5}	92	247
Oxido de Etileno	1.86×10^{-3}	44	120
Hidrazina	2.13×10^{-3}	32	1
Fluoruro de Hidrógeno	1.29×10^{-3}	20	38
Cloruro de Metileno	6.20×10^{-4}	85	77
Pentaborano	2.76×10^{-4}	63	25
Tricloroetileno	1.13×10^{-4}	131	22
Triclorotrifluoroetano	4.47×10^{-4}	187	122

3.3.8. Consideraciones/Limitaciones del Modelo Clewell.

- El área del charco es constante.
- La temperatura del charco es constante en el rango de 0 a 50 °C.
- Si la temperatura del charco es menor de 0 °C, entonces la variable T_p deberá establecerse igual a 0 °C en el modelo.
- Para materiales muy volátiles, la temperatura del charco que deberá usarse en el modelo deberá ser de 10 a 20 °C menor que la temperatura del aire ambiente.
- Para condiciones muy soleadas, la temperatura del charco que deberá usarse en el modelo deberá ser de 10 a 20 °C mayor que la temperatura del aire ambiente.

3.3.9. *Secuencia a seguir para la aplicación de los Modelos para el Cálculo de Derrames (formación de charcos de líquido) y de la Tasa de Evaporación.*

1. Determinar si el derrame involucra a un líquido en ebullición o a un líquido en no ebullición.
2. Determinar si el derrame es confinado o no confinado.
3. Si el derrame involucra a un líquido en ebullición, emplear el modelo SB y los modelos Sutton ó Clewell; asimismo, emplear la tasa de evaporación más grande que se obtenga con la aplicación de dichos modelos.
4. Si el derrame involucra a un líquido en no ebullición, emplear los modelos Sutton ó Clewell.
5. Emplear datos experimentales.

3.3.10. *Aplicaciones prácticas de los Modelos para el Cálculo de Derrames (formación de charcos de líquido) y de la Tasa de Evaporación (Ejemplos).*

a Derrame en Tierra de Líquido en Ebullición

Un tanque de almacenamiento de cloro refrigerado se rompe catastróficamente liberando 30,000 lbm de cloro líquido por un periodo de más de 10 minutos. La temperatura de almacenamiento es igual al punto normal de ebullición del cloro (-29 °F), y la presión inicial en el tanque es de 14.7 psia (condiciones saturadas). La temperatura ambiente es de 70 °F. Estimar la tasa de evaporación a partir del charco de líquido, 60 segundos después de que el material es liberado, considerando que el líquido se derrama instantáneamente sobre terreno plano y arenoso.

- Punto de ebullición del líquido a 14.7 psia (T_b) = -29 °F (-34 °C)
- Calor latente de vaporización a -29 °F y 14.7 psia (ΔH_v) = 124 Btu/lbm (288 kJ/kg)
- Densidad del líquido a -29 °F y 14.7 psia (ρ_l) = 97 lbm/ft³ (1,562 kg/m³)

1.- La tasa de evaporación másica m_p , asumiendo propagación instantánea del charco sobre el terreno circundante, está dada por la siguiente ecuación:

$$m_p = \frac{A_p X k_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s t}} \quad \text{(Ecuación 35)}$$

El área máxima del charco A_p puede estimarse asumiendo que éste se propaga a un espesor mínimo de 2.5 cm (0.082 ft), característico para tierras ásperas y arenosas:

$$A_p = \frac{30,000 \text{ lbm}}{(97 \text{ lbm} / \text{ft}^3)(0.082 \text{ ft})}$$

$$A_p = 3,772 \text{ ft}^2 = 350 \text{ m}^2$$

- $X =$ 3 para superficies terrosas
 $K_s =$ 0.8 W/m-°K para arena seca
 $T_g =$ 70 °F = 294 °K (valor asumido)
 $T_b =$ -29 °F = 239 °K
 $\Delta H_v =$ Btu/lbm = 2.88×10^5 J/kg
 $\alpha_s =$ 8.43×10^{-7} m²/s para arena seca
 $t =$ 60 s

$$m_p = \frac{(350)(3)(0.8)(294 - 239)}{(2.88 \times 10^5) \sqrt{\pi (8.43 \times 10^{-7})(60)}}^{0.5}$$

$m_p = 12.7 \text{ kg/s}$ velocidad a la cual se evaporará el cloro líquido derramado después de 60 segundos de haberse producido la liberación.

Generalmente, la tasa de evaporación promedio sobre algún período de tiempo es de mayor interés que el valor a un punto específico en función del tiempo. Por ejemplo, la tasa de evaporación promedio a los 10 minutos, puede estimarse integrando la ecuación 35 de 0 a 600 segundos y dividiendo el resultado por 600 segundos, dando lo siguiente:

$$\bar{m}_p = \frac{2 A_p X k_s (T_g - T_b)}{\Delta H_v \sqrt{\pi \alpha_s 600}}$$

Esto indica que la tasa de evaporación promedio a los 10 minutos, es dos veces la tasa de evaporación evaluada a los 10 minutos:

$$\overline{m}_p = \frac{(2)(350)(3)(0.8)(294 - 239)}{(2.88 \times 10^5) \left[\pi (8.43 \times 10^{-7}) (600) \right]^{0.5}}$$

$$\overline{m}_p = \underline{8.0 \text{ kg/s}}$$

b Derrame en Tierra de Líquido en No Ebullición

Un tanque de almacenamiento de benceno se rompe catastróficamente liberando 10,000 lbm de benceno líquido. La temperatura de almacenamiento es igual a la temperatura ambiente (70 °F), y la velocidad del viento es de 9 mph a una altura de 33 ft. La estabilidad atmosférica se considera como neutral. A la vez, el benceno líquido es confinado dentro de un dique de concreto ubicado entorno al tanque. El dique tiene un área superficial de 200 ft². Estimar la tasa de evaporación a partir del charco de líquido.

- Peso Molecular (MW) = 78 lbm/lbmol (78 kg/kgmol)
- Presión de vapor a 70 °F y 14.7 psia (P_v) = 1.57 psia (1.08×10^{-4} N/m²)

1.- Emplear el modelo de Sutton para estimar la tasa de evaporación:

$$\dot{m}_p(x_o, y_o) = \left(K/\kappa_o \right) \frac{P_v MW_s}{R_g T_p} u^{(2-n_s)/(2+n_s)} x_o^{2/(2+n_s)} y_o \quad \text{(Ecuación 48)}$$

$$K/\kappa_o = 1.579 \times 10^{-3} \quad \text{(para estabilidad neutral)}$$

$$P_v = 1.08 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$MW_s = 78 \text{ kg/kgmole}$$

$$R_g = 8314 \text{ J/kgmole-K}$$

$$T_p = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 294 \text{ K}$$

$$u = 9 \text{ mph} = 4 \text{ m/sec}$$

$$n_s = 0.25 \quad \text{(para estabilidad neutral)}$$

$$x_o = 14.14 \text{ ft} = 4.31 \text{ m}$$

(asumiendo un charco cuadrado)

$$y_o = 14.14 \text{ ft} = 4.31 \text{ m}$$

$$\dot{m}_p = (1.579 \times 10^{-3}) \frac{(1.08 \times 10^4)(78)}{(8314)(294)} (4)^{\frac{(2-0.25)}{(2+0.25)}} (4.31)^{\frac{2}{(2+0.25)}} (4.31)$$

$$\dot{m}_p = 0.025 \text{ kg/sec}$$

2.- Emplear el modelo de Clewell para estimar la tasa de evaporación:

$$\dot{m}_p = 0.08 u^{0.75} A_p (1 + 0.0043 T_p^2) Z_{Cl} \quad \text{(Ecuación 49)}$$

$$Z_{Cl} = \frac{P_{vB} MW_B}{P_{vHy} MW_{Hy}} \quad \text{(Ecuación 50)}$$

La presión de vapor de la hidracina, como una función de la temperatura, está dada por la siguiente ecuación:

$$\log_{10} P_{vHy} = -4.38123 - \frac{653.88}{T} + 0.047914T - 4.9886 \times 10^{-5} T^2 \quad \text{(Ecuación 51)}$$

$$\log_{10} P_{vHy} = -4.38123 - \frac{653.88}{294} + 0.047914(294) - 4.9886 \times 10^{-5} (294)^2$$

$$\underline{P_{vHy} = 1.477 \times 10^3 \text{ N/m}^2}$$

$$P_{vB} = 1.08 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$MW_{Hy} = 32 \text{ kg/kgmol}$$

$$MW_B = 78 \text{ kg/kgmol}$$

$$Z_{cl} = \frac{(1.08 \times 10^4)(78)}{(1.477 \times 10^3)(32)} = 17.8$$

$$T_p = 294 \text{ °K} = 21 \text{ °C}$$

$$A_p = 200 \text{ ft}^2 = 18.6 \text{ m}^2$$

$$u = 4 \text{ m/s}$$

$$\dot{m}_p = 0.08(4)^{0.75} (18.6) [1 + 0.0043(21)^2] (17.8) = 217 \text{ kg/h} = 0.060 \text{ kg/s} = \text{velocidad a la}$$

cual se evaporará el benceno, una vez formado el charco de líquido a partir de la ruptura del tanque de almacenamiento.

3.4 **MODELACIONES PARA FUEGOS.**

3.4.1. **Fundamentos.**

Definición de Combustión

Combustión es el quemado de un gas, líquido ó sólido durante el cual el combustible es oxidizado, generando calor y a menudo luz. La reacción que generalmente toma lugar durante la combustión de un hidrocarburo es la siguiente:



Carbono (C) e Hidrógeno (H) son suministrados por el combustible (gas natural, gas L. P., gasolina, etc.), mientras que el Oxígeno (O₂) es suministrado por el aire, aunque, en algunos casos, el combustible suministra su propio oxígeno (ejemplo: óxido de etileno).

Proceso de Combustión

Tres ingredientes son necesarios para que se presente el proceso de combustión:

1. Un material inflamable.
2. Oxígeno.
3. Una fuente de ignición.

Cuando un material combustible se quema, la conversión química toma lugar en la fase vapor en una región luminosa llamada “zona de flama”.

El proceso de combustión para vapores inflamables, puede representarse como una reacción química (ejemplo: propano quemándose en aire seco):



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Esta ecuación define la mezcla estequiométrica del propano (C_3H_8) y el oxígeno (O_2) para una combustión completa.

La composición del aire seco es la siguiente:

TABLA 14

<i>Componente</i>	<i>Fórmula Química</i>	<i>% Mol</i>	<i>Peso Molecular</i>
Nitrógeno	N_2	78.09	28
Oxígeno	O_2	20.95	32
Argón	Ar	0.93	39.9
Bióxido de Carbono	CO_2	0.03	44
Aire Seco		100	29

La concentración estequiométrica (Cst) del propano, en aire seco, puede evaluarse como sigue:

$$(5 \text{ moles de } O_2) (100 \text{ mol } \% \text{ aire seco} / 20.95 \text{ mol } \% O_2) = 23.9 \text{ moles de aire seco}$$

$$Cst = 1 \text{ mol de } C_3H_8 \times 100 / 1 \text{ mol de } C_3H_8 + 23.9 \text{ moles de aire seco} = 4 \text{ mol } \% C_3H_8$$

El calor neto de combustión $H_{c_{mez}}$, asociado con una mezcla estequiométrica de propano y aire seco, puede evaluarse como sigue:

$$H_{c_{mez}} = \frac{M_{combustible} H_{c_{combustible}}}{V_{reactivos}} \quad (\text{Ecuación 52})$$

$M_{combustible}$ = masa de combustible (propano), 1 mol ó 44.1 lbm

$H_{c_{combustible}}$ = calor neto de combustión del combustible, 19,801 Btu/lbm

$V_{reactivos}$ = volumen de reactivos: 1 mol de propano (387 ft^3) + 23.9 moles de aire seco ($9,241 \text{ ft}^3$) = $9,628 \text{ ft}^3$

Por lo tanto:

$$H_{c_{mez}} = (44.1 \text{ lbm}) (19,801 \text{ Btu/lbm}) / (9,628 \text{ ft}^3) = 91 \text{ Btu/ft}^3$$

Clasificación de Flamas

Las flamas son clasificadas como de *difusión ó pre-mezcladas*. Las *flamas de difusión* son flamas en las cuales la reacción química toma lugar en la interfase entre el componente combustible y el componente oxidante. El proceso de combustión asociado con una *flama de difusión*, es controlado por la velocidad en que los componentes se mezclan o difunden. Charcos de fuego (pool fires) y fuegos “jet” (jet fires), son ejemplos de *flamas de difusión*.

Las flamas *pre-mezcladas* son aquéllas en las cuales la combustión toma lugar mientras la flama se propaga a través del pre-mezclado de la mezcla combustible-aire. El proceso de combustión asociado con una *flama pre-mezclada*, no se encuentra limitado por el mezclado pero sí por el proceso químico, dado que los químicos por lo general son consumidos rápidamente por la reacción de combustión. Las *flamas pre-mezcladas* tienden a producir explosiones.

Definición de Velocidad de Quemado y de Velocidad de Flama

El movimiento de la flama, relativo al movimiento del gas no quemado, se conoce como “velocidad de quemado”. El movimiento de la flama, relativo a un punto de referencia estacionario, se conoce como “velocidad de flama”.

Definición de Punto de Flasheo (“flash point”)

El punto de flasheo es la temperatura mínima a la cual un líquido genera suficiente vapor para formar una mezcla inflamable, por arriba de una superficie líquida. Con base en procedimientos de prueba y aparatos usados, los puntos de flasheo se presentan como valores de “copa abierta” ó de “copa cerrada”.

Los puntos de flasheo de “copa abierta” son aplicables a líquidos con superficies que son expuestas directamente a la atmósfera ambiental, es decir, un charco abierto. Por otra parte, los puntos de flasheo de “copa cerrada” son más aplicables a líquidos almacenados en tanques atmosféricos, es decir, recipientes cerrados. Para un líquido dado, el punto de flasheo de copa abierta es generalmente mayor que el punto de flasheo de copa cerrada.

Clasificación de Líquidos Inflamables y Combustibles

NFPA 321 presenta las siguientes clasificaciones para líquidos inflamables y combustibles:

TABLA 15

<i>Designación</i>	<i>Punto de Flasheo (F)</i>	<i>Punto de Ebullición (F)</i>
Líquido Inflamable	< 100	-
Clase I	< 100	-
Clase IA	< 73	< 100
Clase IB	< 73	≥100
Clase IC	≥73 y < 100	> 100
Líquido Combustible	≥100	-
Clase II	100 ≤ punto de flasheo < 140	-
Clase IIIA	140 ≤ punto de flasheo < 200	-
Clase IIIB	≥200	-

Límites de Inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad representan los rangos de concentración de una mezcla de aire y combustible que soportarán un proceso de combustión. Los rangos de concentración de inflamabilidad varían mucho dependiendo del combustible.

El Límite Inferior de Inflamabilidad (LII), también referido como el Límite Inferior Explosivo (LIE), define la concentración debajo de la cual no hay suficiente combustible presente en una mezcla de aire para soportar combustión. Por otra parte, el Límite Superior de Inflamabilidad (LSI), también referido como el Límite Superior Explosivo (LSE), define la concentración por arriba de la cual existe demasiado combustible presente en una mezcla de aire para soportar combustión.

Los Límites de Inflamabilidad de una mezcla de gas pueden estimarse empleando la ley de Le Chatelier:

$$LII_{mez} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{MF_i}{LII_i}} \quad (\text{Ecuación 53})$$

$$LSI_{mez} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{MFi}{LSi}} \quad (\text{Ecuación 54})$$

En donde:

- MFi = volumen o fracción molar del componente i (adimensional).
LII = límite inferior de inflamabilidad del componente i (adimensional).
LSI = límite superior de inflamabilidad del componente i (adimensional).
N = número de componentes en la mezcla de gas (adimensional).

Temperatura de Autoignición

La “temperatura de autoignición” es la temperatura mínima requerida para iniciar combustión en un material, independiente de cualquier otra fuente de ignición.

Mínima Energía de Ignición

Es la energía mínima necesaria para encender un material inflamable. Para gases y vapores, la energía de ignición alcanza un valor mínimo cercano a la concentración estequiométrica y, por definición, infinitamente cercanos tanto al LII como al LSI.

Fuentes de Ignición

Lees (1991) presenta el siguiente listado de fuentes de ignición potenciales:

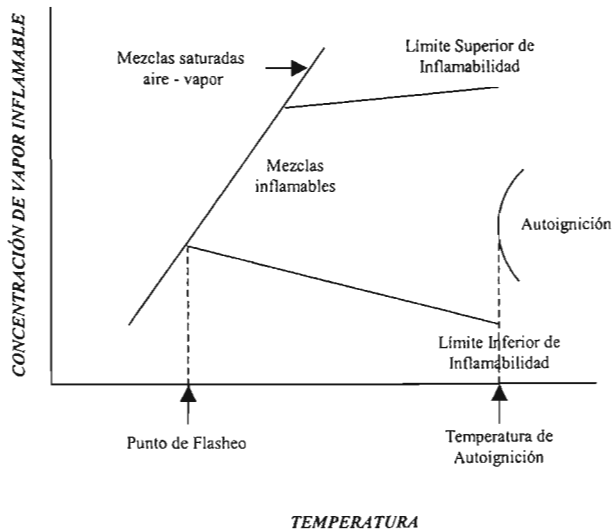
- Flamas, calor directo y superficies calientes.
- Operaciones de soldadura y/o de corte.
- Chispas mecánicas.
- Energía química.
- Vehículos.
- Incendios.
- Electricidad estática.
- Equipo eléctrico.

Energías de Ignición

Crowl y Louvar (1990) establecen que cualquier acumulación de carga que exceda los 350 volts y 0.1 mJ, se considera como peligrosa.

En la **Figura 8**, se muestra la relación existente entre Presión de Vapor, LII, LSI, Punto de Flasheo y Temperatura de Autoignición:

FIGURA 8



Datos de Inflamabilidad para Materiales Seleccionados

TABLA 16

<i>Vapor</i>	<i>LII (vol %)</i>	<i>LSI (vol %)</i>	<i>Punto de Flasheo °C</i>	<i>Temp. De Autoignición °C</i>	<i>Hc (Kj/kg) *</i>	<i>MEI (Mj) **</i>
Acetaldehído	4.0	60.0	-39	175	24,640	0.37
Acetona	2.6	13.0	-20	465	28,500	1.15
Acetileno	2.5	100.0	N/A	305	48,260	0.02
Benceno	1.3	7.9	-11	560	40,600	0.2
1,3-Butadieno	2.0	12.0	N/A	420	44,210	0.13
n-Butano	1.8	8.4	N/A	405	45,390	0.25
Ciclohexano	1.3	7.8	-20	245	43,640	0.22
Dimetil éter	3.4	27.0	N/A	350	31,300	0.29
Etano	3.0	12.4	N/A	515	47,200	0.24
Etileno	2.7	36.0	N/A	490	47,190	0.07
Óxido de Etileno	3.6	100.0	-29	430	26,710	0.06
n-Hexano	1.2	7.4	-22	225	44,770	0.24
Hidrógeno	4.0	76.0	N/A	400	116,410	0.02
Metano	5.0	15.0	N/A	540	50,020	0.26
Alcohol Metílico	6.7	36.0	11	385	19,580	0.14
Metil etil cetona	1.9	10.0	-9	516	31,360	0.53
n-Pentano	1.4	7.8	-40	260	45,010	0.22
Propano	2.1	9.5	N/A	450	46,010	0.25
Alcohol n-propílico	2.2	14.0	23	440	30,550	0.65
Propileno	2.4	11.0	N/A	460	45,800	0.28

* *Hc = Calor Neto de Combustión.*

** *MEI = Mínima Energía de Ignición.*

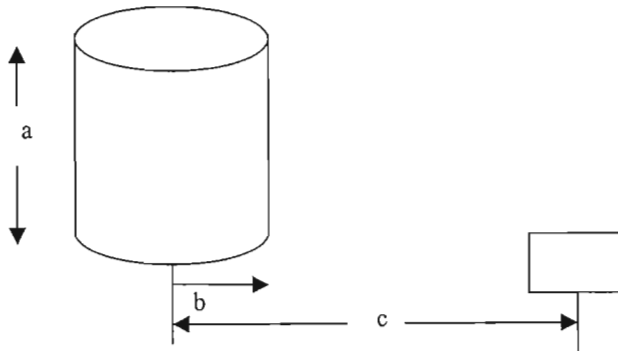
3.4.2. Modelación para charcos de fuego (Pool Fires).

Cuando un líquido inflamable es liberado, de un tanque de almacenamiento o tubería, puede formarse un charco de líquido. Una vez que el charco se forma, algo del líquido se evapora y, si el material inflamable vaporizado encuentra una fuente de ignición mientras éste se encuentre por arriba de su LII, entonces puede presentarse un “charco de fuego”.

La radiación térmica que se genera a partir de un charco de fuego, se emplea para estimar las lesiones o daños potenciales que pueden presentarse sobre el personal o los objetos que se encuentren en áreas cercanas al charco de fuego.

Un charco de fuego puede representarse como un cilindro vertical:

FIGURA 9



- a = longitud de la flama.
- b = radio de las flamas.
- c = distancia del centro de la flama al objeto.

TNO (1979) sugiere emplear la siguiente fórmula:

$$I_{th} = \tau F E_s \quad (\text{Ecuación 55})$$

- I_{th}** = radiación térmica recibida a la distancia x (W/m^2).
 τ = transmisividad atmosférica (adimensional).
 F = factor de vista geométrico, de la superficie de la flama al objetivo (adimensional).
 E_s = flux de radiación térmica emitida en la superficie (W/m^2).

SFPE/NFPA (1988) presentan las siguientes curvas para determinar la variable **E_s** asociada con charcos de fuego de gas natural licuado, gas L. P. y gasolina/querosina:

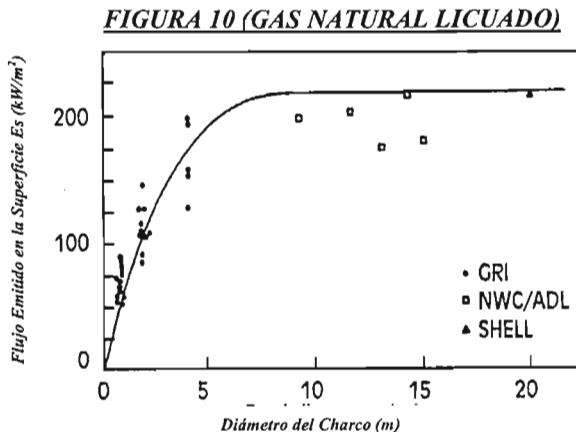


FIGURA 11 (GAS L. P.)

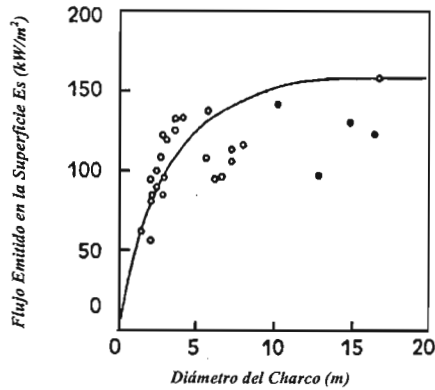
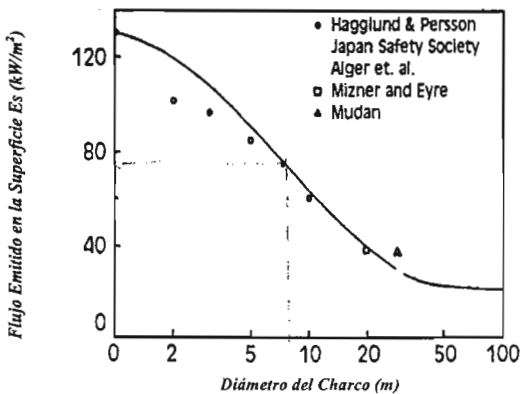


FIGURA 12 (GASOLINA/QUEROSINA)



TNO (1979) sugiere emplear la siguiente ecuación para calcular E_s :

$$E_s = \frac{\beta m_b H_c (\pi b^2)}{2\pi b a + \pi b^2} \quad \text{(Ecuación 56)}$$

- β = fracción del calor total radiado (adimensional).
- m_b = índice de quemado del charco ($\text{kg/m}^2\text{-seg}$).
- H_c = calor neto de combustión del líquido (J/kg).
- b = radio del charco (m).
- a = longitud de la flama (m).

Índice de Quemado (m_b)

Es la tasa a la cual el material, en el charco de líquido, se evapora durante un incendio del mismo. La tasa de evaporación depende de dos fuentes: evaporación a partir de la transferencia de calor conductiva o convectiva, y evaporación a partir de la transferencia de calor por radiación interna, es decir, a partir de las flamas.

La transferencia de calor por radiación, es el principal factor contribuidor para los índices de quemado y, por lo tanto, la transferencia de calor conductiva/convectiva generalmente no se considera para el cálculo de la variable, una vez que se inicia un fuego.

Para un líquido con un punto de ebullición (T_b) por arriba de la temperatura ambiente (T_a), TNO (1979) recomienda emplear la siguiente ecuación para derrames sobre tierra:

$$m_b = \frac{0.001Hc}{C_{pl}(T_b - T_a) + \Delta H_v} \quad (\text{Ecuación 57})$$

Para un líquido con un punto de ebullición (T_b) por debajo de la temperatura ambiente (T_a), TNO (1979) recomienda emplear la siguiente ecuación para derrames sobre tierra:

$$m_b = \frac{0.001Hc}{\Delta H_v} \quad (\text{Ecuación 58})$$

C_{pl} = calor específico del líquido que forma el charco (J/kg-°K).

H_c = calor neto de combustión del líquido (J/kg).

ΔH_v = calor latente de vaporización del líquido (J/kg).

T_a = temperatura del aire ambiental (°K).

T_b = punto de ebullición del líquido a la presión atmosférica (°K).

Para derrames de hidrocarburos con puntos de ebullición normalmente por arriba de la temperatura ambiente (ejemplo: gasolina), el índice de quemado para derrames en una superficie acuosa puede estimarse a partir de la **Ecuación 57**. Para el caso de derrames en una superficie acuosa, en donde se involucren materiales con puntos de ebullición normalmente por debajo de la temperatura ambiente (ejemplo: gas L. P. o gas natural licuado), la transferencia de calor considerable se presenta entre el cuerpo del agua y el charco del material.

Experimentos a gran escala, han demostrado que el índice de quemado para derrames de gas natural licuado, en agua, es generalmente tres veces el índice de quemado para derrames en tierra; a la vez, el índice de quemado para derrames de gas L. P. en agua es generalmente el doble al índice de quemado para derrames en tierra. Por otra parte, el índice de quemado, para una mezcla de materiales inflamables (ejemplo: gasolina), puede aproximarse empleando la siguiente ecuación:

$$m_b = \sum_{i=1}^N MF_i m_{bi} \quad (\text{Ecuación 59})$$

MF_i = fracción mol del componente i.

m_{b i} = índice de quemado del componente i (kg/m²-seg).

N = número total de componentes en la mezcla (adimensional).

SFPE/NFPA (1988) presentan los siguientes datos de índices de quemado para grandes charcos ardiendo sobre tierra:

TABLA 17

<i>Material</i>	<i>Índice de Quemado (kg/m²-seg)</i>	<i>Material</i>	<i>Índice de Quemado (kg/m²-seg)</i>
Hidrógeno líquido	0.017	Bencino	0.048
Gas Natural licuado (en su mayoría metano)	0.078	Gasolina	0.055
Gas L. P. (en su mayoría propano)	0.099	Kerosina	0.039
Metanol	0.017	JP-4	0.051
Etanol	0.015	JP-5	0.054
Butano	0.078	Aceite transformador, hidrocarburo	0.039
Benceno	0.085	Aceite combustible, pesado	0.035
Hexano	0.074	Aceite crudo	0.022 – 0.045
Heptano	0.101		
Xileno	0.090		
Acetona	0.041		
Dioxano	0.018		
Éter dietílico	0.085		

Longitud de la Flama (a)

CPQRA (1989) sugiere emplear una correlación de Thomas (1963) para determinar la longitud de la flama:

$$a = 84b \left[\frac{m_b}{\rho_a \sqrt{2gb}} \right]^{0.61} \quad \text{(Ecuación 60)}$$

a = longitud de la flama (m).

b = radio del charco (m).

ρ_a = densidad del aire (kg/m³).

g = aceleración debida a la gravedad (9.81 m/seg²).

SFPE/NFPA (1988) presentan las siguientes correlaciones de Thomas (1963) para determinar la longitud de la flama, en función de la inclinación de la misma:

$$a = 110b \left[\frac{\dot{m}_b}{\rho_a \sqrt{2gb}} \right]^{0.67} u^{*-0.21} \quad (\text{Ecuación 61})$$

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{2g \dot{m}_b b}{\rho v} \right)^{1/3}} \quad \text{para } u_w \geq \left(\frac{2g \dot{m}_b b}{\rho v} \right)^{1/3} \quad (\text{Ecuación 62})$$

$$u^* = 1 \quad \text{para } u_w < \left(\frac{2g \dot{m}_b b}{\rho v} \right)^{1/3} \quad (\text{Ecuación 63})$$

u^* = velocidad del viento (adimensional).

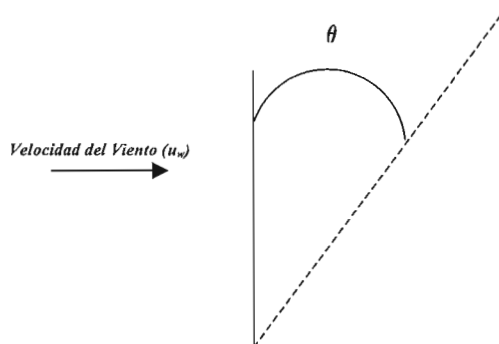
u_w = velocidad del viento a una altura de 1.6 m (m/seg).

ρv = densidad del charco de vapor a la temperatura normal del punto de ebullición (kg/m^3).

Inclinación de la Flama

La Asociación Americana del Gas (1974), presenta las siguientes correlaciones para estimar la inclinación de la flama:

FIGURA 13



$$\cos \theta = 1 \quad \text{para } u^* \leq 1 \quad (\text{Ecuación 64})$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}} \quad \text{para } u^* > 1 \quad (\text{Ecuación 65})$$

Fracción del Calor Total Radiado (β) para un Charco de Fuego

TNO (1979) proporciona los siguientes datos para la variable β , en función de diferentes charcos de líquido ardiendo:

TABLA 18

MATERIAL	DIAMETRO DEL CHARCO (cm)	β
Metanol	7.6	0.162
	15.2	0.165
	122	0.170
Metano	30.5	0.21
	76	0.23
Gas Natural	153	0.15 – 0.24
	305	0.24 – 0.34
	610	0.20 – 0.27
Butano	30.5	0.199
	45.7	0.205
	76	0.269
Gasolina	122	0.30 – 0.40
	153	0.16 – 0.27
	305	0.13 – 0.14
Benceno	7.6	0.35
	45.7	0.345
	76	0.35
	122	0.36

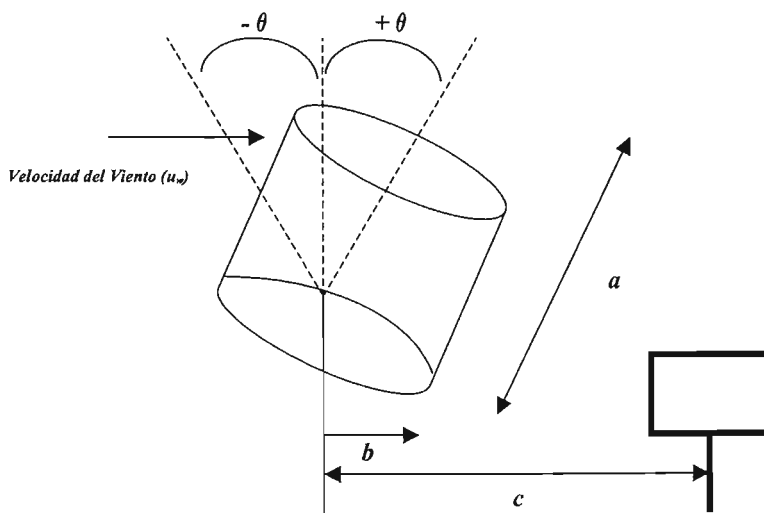
TNO (1979) sugiere emplear un valor conservador, para β , de 0.35 para charcos de fuego de hidrocarburos.

Factor de Vista Geométrico (F)

Este factor toma en cuenta los efectos de la forma de la flama y así como también la localización y orientación de un objeto expuesto a la misma.

TNO (1979) proporciona un método para estimar “F” a partir de un charco de fuego, modelado como un cilindro vertical:

FIGURA 14



a = longitud de la flama.

b = radio de las flamas.

c = distancia del centro de la flama al objeto.

Θ = ángulo que forma la inclinación de la flama a partir de la vertical (grados)

Para una superficie vertical, a nivel de piso, el factor de vista vertical (**F_v**) (no inclinación de la flama) está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{F}_v = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{Y^2 - 1}} \right) + \frac{X}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2Y)}{Y\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(Y-1)A}{(Y+1)B}} \right] - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(Y-1)}{Y+1}} \right] \right\}$$

(Ecuación 66)

X = a/b (adimensional).

Y = c/b (adimensional).

A = $(1 + Y)^2 + X^2$

B = $(1 - Y)^2 + X^2$

* Los resultados de las operaciones de \tan^{-1} se encuentran en radianes, no en grados.

Para una superficie horizontal, a nivel de piso, el factor horizontal **Fh** (no inclinación de la flama) está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{F}_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(Y+1)}{Y-1}} \right] - \frac{X^2 + (Y+1)(Y-1)}{\sqrt{BA}} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{(Y-1)A}{(Y+1)B}} \right] \right\} \quad \text{(Ecuación 67)}$$

* Los resultados de las operaciones de \tan^{-1} se encuentran en radianes, no en grados.

Mudan (1987) presenta la siguiente expresión para el factor de vista vertical (**Fv**) en función de la inclinación de la flama:

$$\begin{aligned} \dot{F}_v = & \frac{X \cos \theta}{Y - X \operatorname{sen} \theta} \left[\frac{X^2 + (Y+1)^2 - 2Y(1 + X \operatorname{sen} \theta)}{\pi \sqrt{A'B'}} \right] \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A'(Y-1)}{B'(Y+1)}} \right] \\ & + \frac{\cos \theta}{\pi \sqrt{C'}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{XY - (Y^2 - 1) \operatorname{sen} \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C'}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{\operatorname{sen} \theta \sqrt{Y^2 - 1}}{\sqrt{C'}} \right] \right\} \\ & - \frac{X \cos \theta}{\pi(Y - X \operatorname{sen} \theta)} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{Y-1}{Y+1}} \right] \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 68)}$$

$$\begin{aligned} A' &= X^2 + (Y + 1)^2 - 2X(Y + 1) \operatorname{sen} \Theta \\ B' &= X^2 + (Y - 1)^2 - 2X(Y - 1) \operatorname{sen} \Theta \\ C' &= 1 + (Y^2 - 1) \cos^2 \Theta \end{aligned}$$

* Los resultados de las operaciones de \tan^{-1} se encuentran en radianes, no en grados.

Mudan (1987) presenta la siguiente expresión para el factor de vista horizontal (**Fh**), en función de la inclinación de la flama:

$$\begin{aligned} Fh &= \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{Y+1}{Y-1}} - \frac{X^2 + (Y+1)^2 - 2(Y+1 + XY \operatorname{sen} \Theta)}{\pi \sqrt{A'B'}} \right] \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{A'(Y-1)}{B'(Y+1)}} \right] \\ &+ \frac{\operatorname{sen} \Theta}{\pi \sqrt{C'}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{XY - (Y^2 - 1) \operatorname{sen} \Theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C'}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{\operatorname{sen} \Theta \sqrt{Y^2 - 1}}{\sqrt{C'}} \right] \right\} \end{aligned}$$

(Ecuación 69)

* Los resultados de las operaciones de \tan^{-1} se encuentran en radianes, no en grados.

El factor de vista geométrico máximo está dado por:

$$F = \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \quad \text{(Ecuación 70)}$$

F = factor de vista geométrico máximo (adimensional).

Fv = factor de vista vertical (adimensional).

Fh = factor de vista horizontal (adimensional).

Transmisividad (τ)

La transmisividad es una medida de cuanto calor radiante no es absorbido/reflejado por la atmósfera, entre un fuego y un objeto expuesto. La magnitud del coeficiente de transmisividad depende, entre otras cosas, de la cantidad de vapor de agua, en el aire, entre un fuego y un objeto expuesto.

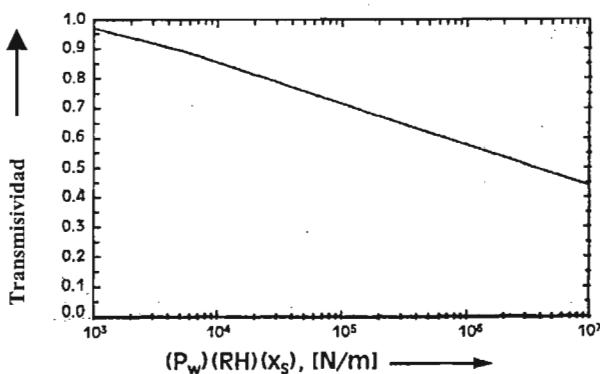
En la siguiente tabla se establecen diferentes valores para la presión de vapor saturada (P_w) del agua a varias temperaturas:

TABLA 19

Temperatura. (°C)	Presión de Vapor (N/m^2)	Temperatura. (°C)	Presión de Vapor (N/m^2)	Temperatura. (°C)	Presión de Vapor (N/m^2)
0	610	18	2060	30	4240
2	705	19	2200	31	4490
4	815	20	2340	32	4760
6	935	21	2490	33	5030
8	1070	22	2640	34	5320
10	1230	23	2810	35	5620
11	1310	24	2980	36	5940
12	1400	25	3170	37	6280
14	1600	26	3360	38	6630
15	1700	27	3570	39	6990
16	1820	28	3780	40	7380
17	1940	29	4000	41	7780

Multiplicando la presión de vapor saturada del agua (P_w) por la humedad relativa (RH) y por la distancia X_s de un objeto, a partir de la superficie de la flama, la transmisividad puede determinarse empleando el siguiente gráfico (TNO, 1979):

FIGURA 15



Por otra parte, y de acuerdo a CPQRA (1989), la transmisividad atmosférica puede estimarse empleando la siguiente ecuación:

$$\tau = 2.02 (P_w RH X_s)^{-0.09} \quad (\text{Ecuación 71})$$

τ = transmisividad atmosférica (adimensional).

X_s = distancia de la superficie de la flama al objetivo (m).

3.4.2.1. Consideraciones/Limitaciones del Modelo para charcos de fuego.

- Aplica principalmente a charcos de fuego en tierra.
- Asume que grandes paredes o mamparas no impedirán el suministro de oxígeno.
- Asume que el área superficial del charco se mantiene constante.
- Asume que el charco de fuego está bien desarrollado.
- Asume una combustión completa.
- Ignora la reducción en la transmisividad por el efecto del CO₂ y del hollín presentes en el aire.

3.4.2.2. Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo para charcos de fuego.

1. Estimar el índice de quemado.
2. Estimar el diámetro equivalente del charco.
3. Estimar la inclinación de la flama.
4. Estimar la longitud de la flama.
5. Estimar el flux de calor emitido en la superficie.
6. Estimar la transmisividad entre el objetivo y la orilla del charco de fuego.
7. Estimar el factor de vista geométrico.
8. Estimar el flujo térmico al objetivo de interés.

3.4.2.3. *Aplicación práctica del Modelo para charcos de fuego (Ejemplo).*

Como resultado de la ruptura de un tanque de almacenamiento de gasolina, ésta se libera y confina dentro de un dique con un área superficial de 500 ft². Subsecuentemente, la gasolina se prende resultando en un “charco de fuego”. La temperatura ambiente es de 70 °F y la humedad relativa es del 90 %. Estimar el flujo de calor térmico sobre el suelo a distancias de 20 y 200 ft a partir del borde del charco ardiendo y para las siguientes dos condiciones: (1) el viento ambiental está en calma (velocidad del viento = 0) y (2) la velocidad del viento ambiental es de 6.6 mph.

Datos de Propiedades de la Gasolina

- Calor neto de combustión (Hc) = 18,724 Btu/lbm (43,510 kJ/kg).
- Calor específico del líquido a 70 °F y 14.7 psia (Cpl) = 0.5 Btu/lbm-°R (2.1 kJ/kg-K).
- Punto de Ebullición a 14.7 psia (Tb) = 212 °F (100 °C).
- Densidad del vapor a 212 °F y 14.7 psia (ρ_v) = 0.218 lbm/ft³ (3.49 kg/m³).
- Calor latente de vaporización a 212 °F y 14.7 psia (ΔH_v) = 129 Btu/lbm (300 kJ/kg).

Datos de Propiedades del Aire Ambiente

- Densidad a 70 °F y 14.7 psia (ρ_a) = 0.075 lbm/ft³ (1.2 kg/m³).

1.- Estimar la tasa de quemado:

$$\dot{m}_b = \frac{0.001 H_c}{C_p (T_b - T_a) + \Delta H_v} \quad \text{(Ecuación 57)}$$

$$\begin{aligned} H_c &= 43,510 \text{ kJ/kg} \\ C_p &= 2.1 \text{ kJ/kg-K} \\ T_b &= 100 \text{ }^\circ\text{C} = 373 \text{ K} \\ T_a &= 70 \text{ }^\circ\text{F} = 21 \text{ }^\circ\text{C} = 294 \text{ K} \\ \Delta H_v &= 300 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_b = \frac{(0.001)(43,510)}{(2.1)(373 - 294) + (300)}$$

$$\dot{m}_b = 0.093 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$$

2.- Estimar el diámetro equivalente del charco:

$$2b = \left[\frac{4 A}{\pi} \right]^{1/2} = \left[\frac{(4)(500)}{\pi} \right]^{1/2} = 25.2 \text{ ft} \quad \underline{b = 12.6 \text{ ft} = 3.84 \text{ m}}$$

3.- Estimar la inclinación de la flama para $u_w = 0 \text{ mph}$.

En este caso, no se presenta inclinación de la flama, por lo tanto $\theta = 0 \text{ grados}$.

4.- Estimar la inclinación de la flama para $u_w = 6.6 \text{ mph}$:

$$\cos \theta = 1 \quad \text{para } u^* \leq 1 \quad \text{(Ecuación 64)}$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}} \quad \text{para } u^* > 1 \quad \text{(Ecuación 65)}$$

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{2 g \dot{m}_b b}{\rho_v} \right)^{1/3}} \quad u_w \geq \left(\frac{2 g \dot{m}_b b}{\rho_v} \right)^{1/3} \quad \text{(Ecuación 62)}$$

$$u^* = 1 \quad u_w \leq \left(\frac{2g \dot{m}_b b}{\rho_v} \right)^{1/3} \quad \text{(Ecuación 63)}$$

$$u_w = 6.6 \text{ mph} \approx 3 \text{ m/sec}$$

$$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$$

$$\dot{m}_b = 0.093 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$$

$$b = 12.6 \text{ ft} \approx 3.84 \text{ m}$$

$$\rho_v = 3.49 \text{ kg/m}^3$$

$$\left(\frac{2g \dot{m}_b b}{\rho_v} \right)^{1/3} = \left[\frac{(2)(9.81)(0.093)(3.84)}{(3.49)} \right]^{1/3} = 1.26 < u_w (3 \text{ m/sec})$$

Por lo tanto, aplica la Ecuación 62:

$$u^* = \left(\frac{3}{1.26} \right) = 2.4 > 1$$

Por lo tanto, aplica la Ecuación 65:

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{2.4}} = 0.645$$

5.- Estimar la longitud de la flama (a) sin inclinación de la flama ($\theta = 0$):

$$a = 84 b \left[\frac{\dot{m}_b}{\rho_s (2gb)^{0.5}} \right]^{0.61} \quad \text{(Ecuación 60)}$$

$$b = 12.6 \text{ ft} \approx 3.84 \text{ m}$$

$$\dot{m}_b = 0.093 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$$

$$\rho_s = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$$

$$a = (84)(3.84) \left[\frac{(0.093)}{(1.2)[(2)(9.81)(3.84)]^{0.5}} \right]^{0.61}$$

$a = \underline{18.1 \text{ m}}$ = longitud de la flama sin inclinación de la misma.

6.- Estimar la longitud de la flama (a) con una inclinación de la misma = 49.8 grados:

$$a = 110b \left[\frac{m_b}{\rho_a (2gb)^{0.5}} \right]^{0.67} u^{*-0.21} \quad \text{(Ecuación 61)}$$

$b = 3.84 \text{ m}$

$m_b = 0.093 \text{ kg/m}^2\text{-seg}$

$\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$

$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$

$u^* = 2.4$

$$a = (110)(3.84) \left[\frac{(0.093)}{(1.2)[(2)(9.81)(3.84)]^{0.5}} \right]^{0.67} (2.4)^{-0.21}$$

$a = \underline{14.9 \text{ m}}$ = longitud de la flama con una inclinación de la misma de 49.8 grados.

7.- Estimar el flujo de calor emitido en la superficie (Es):

De la FIGURA 12 (página 113), el flujo emitido en la superficie para un charco de fuego de gasolina con un diámetro de 7.68 m, es de aproximadamente 75 kW/m².

8.- Estimar la transmisividad (τ) entre el objetivo y el extremo del charco de fuego, sin inclinación de la flama:

A $T_a = 70 \text{ }^\circ\text{F}$ (21 $^\circ\text{C}$), la presión de vapor saturada del agua (P_w) es de 2,490 N/m² (TABLA 19, página 122). Para $x_s = 20 \text{ ft}$ (6.1 m), a partir del extremo del charco de fuego, y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RH x_s = (2490) (0.9) (6.1) = 13,670 \text{ N/m} \text{ (valor para interpolación en FIGURA 15).}$$

De la FIGURA 15 (página 122), la transmisividad (τ) = 0.83 para $x_s = 20$ ft. Para una distancia $x_s = 200$ ft (61 m), a partir del extremo del charco de fuego, y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_wRHx_s = (2490) (0.9) (61) = 136,701 \text{ N/m (valor para interpolación en FIGURA 15).}$$

De la FIGURA 15 (página 122), la transmisividad (τ) = 0.70 para $x_s = 200$ ft.

9.- Estimar la transmisividad (τ) entre el objetivo y el extremo del charco de fuego, con una inclinación de la flama = 49.8 grados:

El extremo más cercano del charco de fuego al objetivo está dado por $x_s \cos \theta$ para $a \geq x_s \sin \theta$ y $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Para $x_s = 20$ ft (6.1 m), la distancia a partir de la flama es $(6.1) \cos(49.8)$, ó 3.9 m. El extremo más cercano, del charco de fuego, al objetivo está dado por:

$$\left[x_s^2 + a^2 - 2x_s a \sin \theta \right]^{1/2} \quad \text{para } a < x_s \sin \theta \text{ y } 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

Para $x_s = 200$ ft (61 m), la distancia a partir de la flama está dada por:

$$\left[(61)^2 + (14.9)^2 - 2(61)(14.9) \sin(49.8) \right]^{1/2} = 51.6 \text{ m} = \text{distancia entre el extremo más cercano del charco de fuego al objetivo.}$$

A $T_a = 70$ °F (21 °C), la presión de vapor saturada del agua (P_w) es de 2,490 N/m² (TABLA 19, página 122). Para una distancia de 3.9 m, a partir del extremo del charco de fuego, y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_wRHx_s = (2490) (0.9) (3.9) = 8,740 \text{ N/m (valor para interpolación en FIGURA 15).}$$

De la FIGURA 15 (página 122), la transmisividad (τ) = 0.86. Para una distancia de 51.6 m, a partir del extremo del charco de fuego, y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_wRHx_s = (2490) (0.9) (51.6) = 115,636 \text{ N/m (valor para interpolación en FIGURA 15).}$$

De la FIGURA 15 (página 122), la transmisividad (τ) = 0.71.

10.- Estimar el factor de vista geométrico (F), sin inclinación de la flama:

$a = 18.1 \text{ m}$ (longitud de la flama).

$b = 3.84 \text{ m}$ (radio de las flamas).

$c = b + x_s$ (distancia del centro de la flama al objeto).

$c = 9.9 \text{ m}$, para $x_s = 6.1 \text{ m}$ (20 ft)

$c = 64.8 \text{ m}$, para $x_s = 61 \text{ m}$ (200 ft)

$a/b = 18.1/3.84 = 4.714$

$c/b = 9.9/3.84 = 2.6$, para $x_s = 6.1 \text{ m}$ (20 ft)

$c/b = 64.8/3.84 = 16.875$, para $x_s = 61 \text{ m}$ (200 ft)

Del **APÉNDICE "B"**, el factor de vista geométrico (F), para $x_s = 6.1 \text{ m}$ (20 ft) es ≈ 0.23 . Para $x_s = 61 \text{ m}$ (200 ft), se emplean las siguientes ecuaciones, para estimar F :

$$F_v = \frac{1}{\pi Y} \tan^{-1} \left(\frac{X}{(Y^2 - 1)^{1/2}} \right) + \frac{X}{\pi} \left\{ \frac{(A - 2Y)}{Y(AB)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{(Y - 1)A}{(Y + 1)B} \right)^{1/2} \right] \right. \\ \left. - \frac{1}{Y} \tan^{-1} \left[\left(\frac{(Y - 1)}{(Y + 1)} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{(Ecuación 66)}$$

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{Y + 1}{Y - 1} \right)^{1/2} \right] - \frac{X^2 + (Y + 1)(Y - 1)}{(BA)^{1/2}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{A(Y - 1)}{B(Y + 1)} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{(Ecuación 67)}$$

$$F = (F_v^2 + F_h^2)^{0.5} \quad \text{(Ecuación 70)}$$

$$X = a/b = 4.7$$

$$Y = c/b = 16.875$$

$$A = (1 + Y)^2 + X^2 = (1 + 16.875)^2 + (4.7)^2 = 342$$

$$B = (1 - Y)^2 + X^2 = (1 - 16.875)^2 + (4.7)^2 = 274$$

$$F_v = \frac{1}{\pi(16.875)} \tan^{-1} \left(\frac{4.7}{((16.875)^2 - 1)^{1/2}} \right) + \frac{4.7}{\pi} \left\{ \frac{(342 - 2)(16.875)}{(16.875)((342)(274))^{1/2}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{(16.875 - 1)(342)}{(16.875 + 1)(274)} \right)^{1/2} \right] \right. \\ \left. - \frac{1}{16.875} \tan^{-1} \left[\left(\frac{(16.875 - 1)}{(16.875 + 1)} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

$$F_v = 5.13237 \times 10^{-3} + 1.49606 \left[(5.96721 \times 10^{-2})(0.811143) - (5.92593 \times 10^{-2})(0.755751) \right]$$

$$F_v = 1.1 \times 10^{-2}$$

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{16.875 + 1}{16.875 - 1} \right)^{1/2} \right] - \frac{(4.7)^2 + (16.875 + 1)(16.875 - 1)}{((274)(342))^{1/2}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{(342)(16.875 - 1)}{(274)(16.875 + 1)} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

$$F_n = 0.318310 [0.815045 - (0.999144)(0.811143)]$$

$$F_n = 1.5 \times 10^{-3}$$

$$F = [(1.1 \times 10^{-2})^2 + (1.5 \times 10^{-3})^2]^{0.5}$$

$$F = 1.1 \times 10^{-2}, \quad x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

11.- Estimar el factor de vista geométrico (F), con una inclinación de la flama de 49.8 grados:

$$a = 14.9 \text{ m}$$

$$b = 3.84 \text{ m}$$

$$c = b + x_s$$

$$c = 9.9 \text{ m, para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

$$c = 64.8 \text{ m, para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{14.9}{3.84} = 3.88$$

$$\frac{c}{b} = \frac{9.9}{3.84} = 2.6, \text{ para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

$$\frac{c}{b} = \frac{64.8}{3.84} = 16.875, \text{ para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

Las Ecuaciones 68, 69 y 70 son aplicables para flamas con una cierta inclinación:

$$F_v = \frac{X \cos \theta}{Y - X \sin \theta} \frac{X^2 + (Y + 1)^2 - 2Y(1 + X \sin \theta)}{\pi \sqrt{A' B'}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{A'(Y - 1)}{B'(Y + 1)} \right)^{1/2} \right] \\ + \frac{\cos \theta}{\pi \sqrt{C'}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{XY - (Y^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C'}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{(Y^2 - 1)^{1/2} \sin \theta}{\sqrt{C'}} \right] \right\} \\ - \frac{X \cos \theta}{\pi (Y - X \sin \theta)} \tan^{-1} \left(\frac{Y + 1}{Y - 1} \right)^{1/2} \quad \text{(Ecuación 68)}$$

$$F_h = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{Y + 1}{Y - 1} \right)^{1/2} - \frac{X^2 + (Y + 1)^2 - 2(Y + 1 + XY \sin \theta)}{\pi \sqrt{A' B'}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{A'(Y - 1)}{B'(Y + 1)} \right)^{1/2} \right] \\ + \frac{\sin \theta}{\pi \sqrt{C'}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{XY - (Y^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{Y^2 - 1} \sqrt{C'}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{(Y^2 - 1)^{1/2} \sin \theta}{\sqrt{C'}} \right] \right\} \quad \text{(Ecuación 69)}$$

$$F = (F_v^2 + F_h^2)^{0.5} \quad \text{(Ecuación 70)}$$

$$X = a/b = 3.88$$

$$Y = c/b = 2.6, \text{ para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)} \\ = 16.875, \text{ para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

X y Y = variables requeridas en ecuaciones 68 y 69.

$$A' = X^2 + (Y + 1)^2 - 2X(Y + 1)\sin\theta$$

$$A' = (3.88)^2 + (2.6 + 1)^2 - 2(3.88)(2.6 + 1)\sin(0.87 \text{ rad})$$

$$A' = 6.66, \text{ para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

$$A' = (3.88)^2 + (16.875 + 1)^2 - 2(3.88)(16.875 + 1)\sin(0.87 \text{ rad})$$

$$A' = 229, \text{ para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

$$B' = X^2 + (Y - 1)^2 - 2X(Y - 1)\sin\theta$$

$$B' = (3.88)^2 + (2.6 - 1)^2 - 2(3.88)(2.6 - 1)\sin(0.87 \text{ rad})$$

$$B' = 8.12, \text{ para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

$$B' = (3.88)^2 + (16.875 - 1)^2 - 2(3.88)(16.875 - 1)\sin(0.87 \text{ rad})$$

$$B' = 173, \text{ para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

$$C' = 1 + (Y^2 - 1)\cos^2\theta$$

$$C' = 1 + [(2.6)^2 - 1]\cos^2(0.87 \text{ rad})$$

$$C' = 3.40, \text{ para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

$$C' = 1 + [(16.875)^2 - 1]\cos^2(0.87 \text{ rad})$$

$$C' = 119, \text{ para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

El factor de vista vertical F_v para $x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$ es:

$$F_v = \frac{(3.88) \cos(0.87)}{2.6 - 3.88 \sin(0.87)} \frac{(3.88)^2 + (2.6 + 1)^2 - 2(2.6)(1 + 3.88 \sin(0.87))}{\pi \sqrt{(6.66)(8.12)}} \tan^{-1} \left[\left(\frac{(6.66)(2.6 - 1)}{(8.12)(2.6 + 1)} \right)^{1/2} \right] \\ + \frac{\cos(0.87)}{\pi \sqrt{3.40}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{(3.88)(2.6) - [(2.6)^2 - 1] \sin(0.87)}{\sqrt{(2.6)^2 - 1} \sqrt{3.40}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{[(2.6)^2 - 1]^{1/2} \sin(0.87)}{\sqrt{3.40}} \right] \right\} \\ - \frac{3.88 \cos(0.87)}{\pi (2.6 - 3.88 \sin(0.87))} \tan^{-1} \left(\frac{2.6 - 1}{2.6 + 1} \right)^{1/2}$$

$$F_v = (-6.890) (0.320017)(0.543183) + (0.111315)(0.909386 + 0.782810) - (-2.17833)(0.588003)$$

$F_v = 0.272 =$ factor de vista vertical en función de la inclinación de la flama (6.1 m).

El factor de vista horizontal F_h para $x_s = 6.1$ m (20 ft) es:

$$F_h = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2.6+1}{2.6-1} \right)^{1/2} - \frac{(3.88)^2 + (2.6+1)^2 - 2(2.6+1) + (3.88)(2.6) \sin(0.87)}{\pi \sqrt{(6.66)(8.12)}} \\
\times \tan^{-1} \left[\left(\frac{(6.66)(2.6-1)}{(8.12)(2.6+1)} \right)^{1/2} \right] \\
+ \frac{\sin(0.87)}{\pi \sqrt{3.40}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{(3.88)(2.6) - [(2.6)^2 - 1] \sin(0.87)}{\sqrt{(2.6)^2 - 1} \sqrt{3.40}} \right] \right. \\
\left. + \tan^{-1} \left[\frac{[(2.6)^2 - 1]^{1/2} \sin(0.87)}{\sqrt{3.40}} \right] \right\}$$

$$F_h = 0.312833 - (0.233448)(0.543183) + (0.131944)(0.909386 + 0.782810)$$

$$F_h = 0.409 = \text{factor de vista horizontal en función de la inclinación de la flama (6.1 m).}$$

El factor de vista máximo (F) para $x_s = 6.1$ m (20 ft) es:

$$F = \left[(0.272)^2 + (0.409)^2 \right]^{0.5}$$

$$F = 0.5, \text{ para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

El factor de vista vertical F_v para $x_s = 61$ m (200 ft) es:

$$F_v = \frac{(3.88) \cos(0.87)}{16.875 - 3.88 \sin(0.87)} - \frac{(3.88)^2 + (16.875 + 1)^2 - 2(16.875)(1 + 3.88 \sin(0.87))}{\pi \sqrt{(229)(173)}} \\
\times \tan^{-1} \left[\left(\frac{(229)(16.875 - 1)}{(173)(16.875 + 1)} \right)^{1/2} \right] \\
+ \frac{\cos(0.87)}{\pi \sqrt{119}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{(3.88)(16.875) - [(16.875)^2 - 1] \sin(0.87)}{\sqrt{(16.875)^2 - 1} \sqrt{119}} \right] \right. \\
\left. + \tan^{-1} \left[\frac{[(16.875)^2 - 1]^{1/2} \sin(0.87)}{\sqrt{119}} \right] \right\} \\
- \frac{3.88 \cos(0.87)}{\pi (16.875 - 3.88 \sin(0.87))} \tan^{-1} \left(\frac{16.875 - 1}{16.875 + 1} \right)^{1/2}$$

$$F_v = (0.179873)(0.321014)(0.825797) + (0.0188157)(-0.689192 + 0.867899) - (0.0572554)(0.755751)$$

$$F_v = 7.8 \times 10^{-3} = \text{factor de vista vertical en función de la inclinación de la flama (61 m).}$$

El factor de vista horizontal F_h para $x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$ es:

$$F_h = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{16.875 + 1}{16.875 - 1} \right)^{1/2} - \frac{(3.88)^2 + (16.875 + 1)^2 - 2(16.875 + 1) + (3.88)(16.875)\sin(0.87)}{\pi \sqrt{(229)(173)}} \\
\times \tan^{-1} \left[\left(\frac{(229)(16.875 - 1)}{(173)(16.875 + 1)} \right)^{1/2} \right] \\
+ \frac{\sin(0.87)}{\pi \sqrt{119}} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{(3.88)(16.875) - [(16.875)^2 - 1]\sin(0.87)}{\sqrt{(16.875)^2 - 1} \sqrt{119}} \right] \right. \\
\left. + \tan^{-1} \left[\frac{[(16.875)^2 - 1]^{1/2} \sin(0.87)}{\sqrt{119}} \right] \right\}$$

$$F_h = 0.259437 - (0.317816)(0.825797) + (0.0223027)(-0.689192 + 0.867899)$$

$$F_h = 9.7 \times 10^{-4} = \text{factor de vista horizontal en función de la inclinación de la flama (61 m).}$$

El factor de vista máximo (F) para $x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$ es:

$$F = \left[(7.8 \times 10^{-3})^2 + (9.7 \times 10^{-4})^2 \right]^{0.5}$$

$$F = 7.9 \times 10^{-3}, \quad \text{para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

12.- Estimar el flujo térmico (I_{th}) al objetivo de interés sin inclinación de la flama:

$$I_{th} = \tau F E_s \quad (\text{Ecuación 55})$$

$$\text{Para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}, \tau = 0.83, \text{ y } F = 0.23$$

$$I_{th} = (0.83)(0.23)(75)$$

$$I_{th} = 14.3 \text{ kW/m}^2 = 4515 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr, para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

$$\text{Para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}, \tau = 0.70, \text{ y } F = 1.1 \times 10^{-2}$$

$$I_{th} = (0.70) (1.1 \times 10^{-2}) (75)$$

$$I_{th} = 0.58 \text{ kW/m}^2 = 182 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr, para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

Estimar el flujo térmico (I_{th}) al objetivo de interés con una inclinación de la flama de 48.9 grados:

$$I_{th} = \tau F E_s$$

Para $x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$, $\tau = 0.86$, y $F = 0.5$

$$I_{th} = (0.86) (0.5) (75)$$

$$I_{th} = 32.3 \text{ kW/m}^2 = 10,198 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr, para } x_s = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

Para $x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$, $\tau = 0.71$, y $F = 7.9 \times 10^{-3}$

$$I_{th} = (0.71) (7.9 \times 10^{-3}) (75)$$

$$I_{th} = 0.42 \text{ kW/m}^2 = 133 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr, para } x_s = 61 \text{ m (200 ft)}$$

3.4.3. Modelaciones para fuegos “jet” (Jet Fires).

Cuando gases licuados, o comprimidos, se fugan de tanques de almacenamiento o de tuberías, entonces los materiales que se descargan a través del orificio de la fuga formarán un flujo de gas tipo “jet”, el cual se mezcla con el aire ambiental. Si el material es inflamable y encuentra una fuente de ignición, entonces puede presentarse un “fuego jet”.

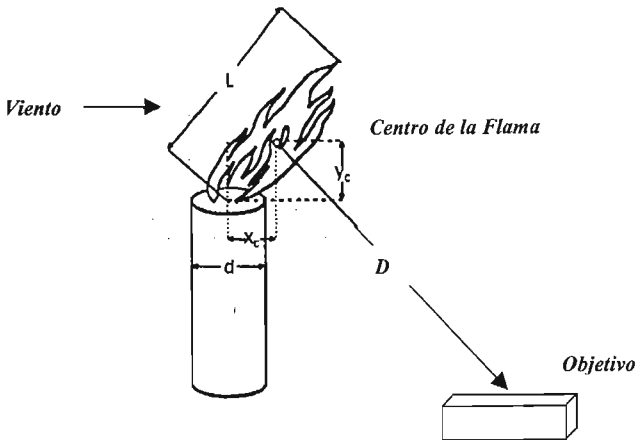
3.4.3.1. Modelo API.

API RP-521 emplea una aproximación de Brzustowski y Sommers (1973) para calcular la radiación térmica a partir de fuegos jet dirigidos verticalmente (llamaradas):

$$I_{th} = \tau \beta Q_{th} / 4 \pi D^2 \quad (\text{Ecuación 72})$$

- I_{th}** = radiación térmica (kW/m²).
- τ** = transmisividad (adimensional).
- β** = fracción del calor total radiado (adimensional).
- Q_{th}** = calor total liberado (kW).
- D** = distancia del centro de la flama al objeto de interés (m).

FIGURA 16



- x_c = distancia horizontal del punto de liberación al centro de la flama (m).
 y_c = distancia vertical del punto de liberación al centro de la flama (m).
 D = distancia del centro de la flama al objeto de interés (m).
 d = diámetro del punto de liberación (m).
 L = longitud de la flama (m).

Estimación del Calor Total Liberado (Q_{th})

El calor total liberado por el fuego jet está dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{th} = Q H_c \quad (\text{Ecuación 73})$$

- Q = tasa de descarga del material jet (kg/seg).
 H_c = calor neto de combustión del material liberado (kJ/kg).

Transmisividad (τ) y Fracción de Calor Radiado (β)

La transmisividad se determina de la misma manera como se planteó para charcos de fuego. CPQRA (1989) sugiere, a partir de experimentos en laboratorio, los siguientes valores para β , para fuegos jet:

- Para hidrógeno, $\beta = 0.15$.
- Para metano, $\beta = 0.20$.
- Para otros hidrocarburos, $\beta = 0.30$.

Así mismo, CPQRA (1989) también sugiere multiplicar por un factor adicional de 0.67, considerando una combustión incompleta.

Cook et al (1987) presenta la siguiente correlación, para la fracción de calor radiado por una llamarada, con base en la velocidad (v , m/seg) del gas jet:

$$\beta = 0.321 - 0.000418 v \quad (\text{Ecuación 74})$$

Para gas natural, bajo condiciones de flujo sónico, $v \approx 350$ m/seg y $\beta \approx 0.17$.

Estimación del Centro de la Flama (x_c, y_c)

1.- Calcular la velocidad sónica de la liberación:

$$V_{sónica} = 91.2 \sqrt{\frac{\gamma T_s}{MW_s}} \quad (\text{Ecuación 75})$$

- γ = radio de calores específicos del material liberado (adimensional).
 T_s = temperatura del material liberado ($^{\circ}\text{K}$).
 MW_s = peso molecular del material liberado (kg/kgmol).
 $V_{sónica}$ = velocidad del sonido en el gas liberado (m/seg).

2.- Calcular el número Mach jet (Ma) para la liberación:

$$Ma = (11.61 \times 10^{-2}) \frac{Q}{P_s d^2} \sqrt{\frac{T_s}{\gamma MW_s}} \quad (\text{Ecuación 76})$$

- Q = tasa de descarga de la masa (kg/seg).
 P_s = presión absoluta de almacenamiento (kN/m^2).
 d = diámetro del punto de liberación (m).

3.- Empleando tanto el número Mach como la velocidad sónica de la liberación, calcular la velocidad de salida de la liberación (m/seg):

$$v = Ma \ v_{sónica} \quad (\text{Ecuación 77})$$

4.- Empleando la velocidad de salida de la liberación jet, calcular el parámetro de concentración del Límite Inferior Explosivo (C_{LP}):

$$C_{LP} = C_L \left(\frac{V}{u_a} \right) \left(\frac{MW_s}{MW_a} \right) \quad (\text{Ecuación 78})$$

C_{LP} = parámetro de concentración, del límite inferior explosivo (adimensional).

C_L = límite inferior explosivo, como una fracción de volumen (adimensional).

U_a = velocidad del viento, a la altura de la liberación (m/seg).

MW_a = peso molecular del aire (29 kg/kgmol).

5.- Empleando la velocidad de salida de la liberación jet, calcular el parámetro d_jR que se toma en cuenta para el empuje jet y para el empuje del viento:

$$d_jR = d \left(\frac{v}{u_a} \right) \sqrt{\frac{T_a MW_s}{T_s}} \quad (\text{Ecuación 79})$$

d_jR = parámetro de empuje del viento y de empuje jet.

v = velocidad de salida de la liberación (m/seg).

T_a = temperatura del aire ambiental ($^{\circ}K$).

6.- Empleando el parámetro de concentración, del límite inferior explosivo (C_{LP}), y el parámetro de empuje del viento y de empuje jet (d_jR), la localización del centro de la flama puede determinarse por medio de las siguientes **Figuras 17 y 18** dadas por API RP-521:

FIGURA 17

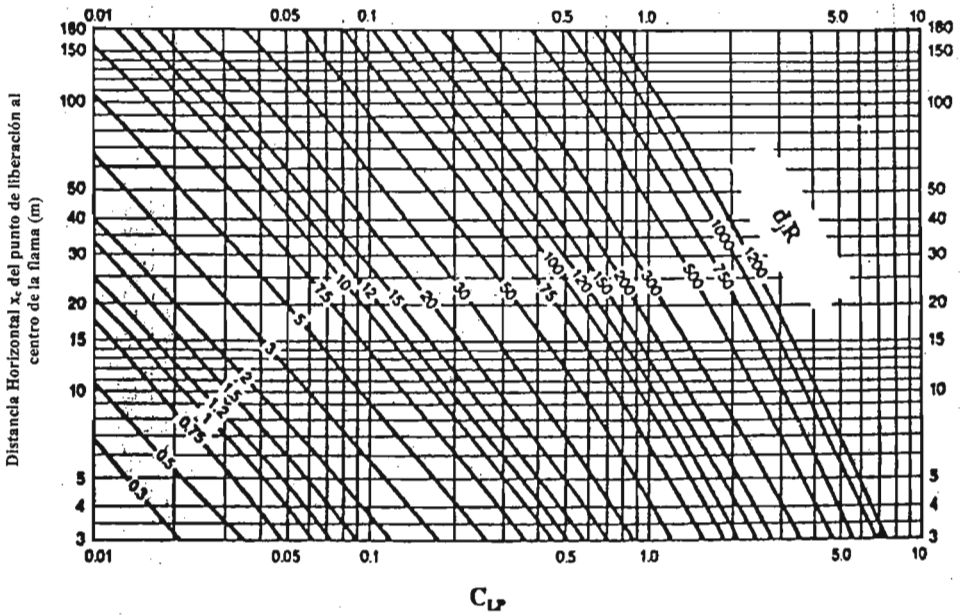
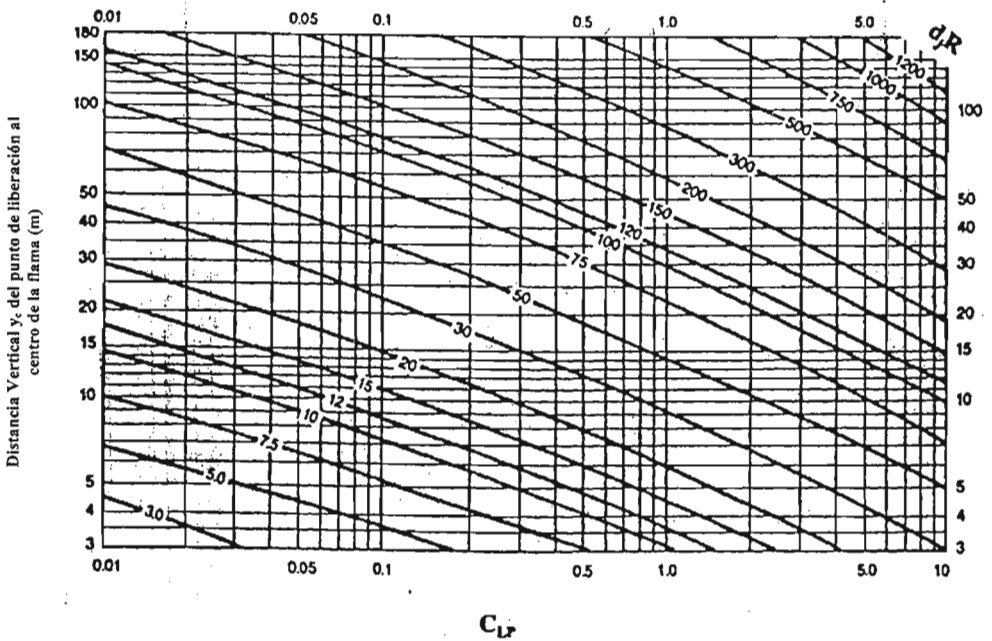


FIGURA 18



SFPE/NFPA (1988) presentan el siguiente procedimiento, dado por Brzustowski (1976), para el cálculo directo respecto a la localización de la punta de la flama:

1.- Empleando C_{LP} , calcular St a partir de las siguientes ecuaciones:

$$St = 2.04 C_{LP}^{-1.03} \quad \text{para } C_{LP} \leq 0.5 \quad (\text{Ecuación 80})$$

$$St = 2.71 C_{LP}^{-0.625} \quad \text{para } C_{LP} > 0.5 \quad (\text{Ecuación 81})$$

2.- Empleando St , calcular Xt a partir de las siguientes ecuaciones:

$$St = 1.04 Xt^2 + 2.05 Xt^{0.28} \quad \text{para } St \leq 2.35 \quad (\text{Ecuación 82})$$

$$Xt = St - 1.65 \quad \text{para } St > 2.35 \quad (\text{Ecuación 83})$$

3.- Empleando Xt , calcular la localización de la punta de la flama (x_t , y_t), a partir de las siguientes ecuaciones:

$$x_t = Xt d \left(\frac{v}{u} \right) \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \quad (\text{Ecuación 84})$$

$$y_t = 2.04 Xt^{0.28} d \left(\frac{v}{u} \right) \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \quad (\text{Ecuación 85})$$

4.- Una vez determinada la localización de la punta de la flama (x_t , y_t), el centro de la flama puede estimarse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$x_c = x_t/2 \quad (\text{Ecuación 86})$$

$$y_c = y_t/2 \quad (\text{Ecuación 87})$$

Longitud de la Flama (L)

Para estimar la longitud de la flama (L), puede emplearse la siguiente ecuación:

$$L = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (\text{Ecuación 88})$$

3.4.3.1.1. Consideraciones/Limitaciones del Modelo API.

- La tasa de descarga es constante.
- El modelo fue desarrollado para descargas verticales.
- El modelo es una correlación empírica.
- Se asume combustión completa.
- Se ignora la reducción en la transmisividad por el efecto del CO₂ y del hollín en el aire.

3.4.3.1.2. Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo API.

1. Calcular la tasa de descarga.
2. Calcular el calor total liberado por el fuego jet.
3. Calcular el número Mach y la velocidad sónica del efecto jet.
4. Calcular la velocidad de descarga del efecto jet.
5. Calcular el parámetro del límite inferior explosivo y el parámetro de empuje jet y de empuje del viento.
6. Determinar las distancias horizontales y verticales del centro de la flama, a partir del punto de descarga.
7. Calcular la transmisividad, entre el objetivo y el centro de la flama.
8. Calcular el flujo térmico al punto de interés.

3.4.3.1.3. Aplicación práctica del Modelo API (Ejemplo).

Una ruptura de 1 1/2" de diámetro ocurre en el espacio de vapor, de un carro de ferrocarril que contiene propano, liberando 10 lbm/seg de gas en una forma vertical y hacia arriba. El propano subsecuentemente se prende, resultando en un fuego jet. El propano se encuentra almacenado a una temperatura ambiente de 70 °F y una presión de 124 psia (condiciones saturadas). La humedad relativa es del 90%. La ruptura se localiza aproximadamente a 10 ft por arriba del nivel del piso. La velocidad del viento ambiental es de 10 mph, a la altura de la ruptura. Estimar el flujo térmico, a nivel de piso, para distancias de 20 y 200 ft de los vientos debajo de la ruptura.

Datos de Propiedades del Propano

- Peso Molecular (MW) = 44.1 lbm/lbmol (44.1 kg/kgmol).
- Relación de calores específicos (γ) = 1.13.
- Límite Superior de Inflamabilidad (LSI) = 9.5 %vol.
- Límite Inferior de Inflamabilidad (LII) = 2.1 %vol.
- Calor neto de combustión (Hc) = 19,801 Btu/lbm (46,013 kJ/kg).

Datos de Propiedades del Aire Ambiental

- Densidad a 70 °F y 14.7 psia (ρ_a) = 0.075 lbm/ft³ (1.2 kg/m³).
- Peso Molecular (MW_a) = 29 lbm/lbmol (29 kg/kgmol).

1.- Estimar el calor total liberado por el fuego jet:

$$Q_{\dot{a}} = \dot{Q} H_c \quad (\text{Ecuación 73})$$

$$\dot{Q} = 10 \text{ lbm/sec} = 4.5 \text{ kg/sec.}$$

$$H_c = 46,013 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\dot{a}} = (4.5)(46,013) = 2.07 \times 10^5 \text{ kW} = \text{calor total liberado por el fuego jet.}$$

2.- Estimar la velocidad sónica y el número Mach del jet:

$$v_{\text{sonic}} = 91.2 \left(\frac{\gamma T_s}{MW_s} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 75})$$

$$\gamma = 1.13$$

$$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{F} = 294 \text{ K}$$

$$MW_s = 44.1 \text{ kg/kgmole}$$

$$v_{\text{sonic}} = (91.2) \left[\frac{(1.13)(294)}{(44.1)} \right]^{0.5} = 250.3 \text{ m/sec} = \text{velocidad sónica de la liberación.}$$

$$Ma = (11.61 \times 10^{-2}) \frac{\dot{Q}}{P_s d^2} \left(\frac{T_s}{\gamma MW_s} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 76})$$

$$P_s = 124 \text{ psia} = 8.55 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 855 \text{ kN/m}^2$$

$$d = 1\frac{1}{2} \text{ in} = 0.038 \text{ m}$$

$$Ma = (11.61 \times 10^{-2}) \frac{(4.5)}{(855)(0.038)^2} \left[\frac{(294)}{(1.13)(44.1)} \right]^{0.5}$$

$$Ma = 1.0 = \text{Número Mach para la liberación.}$$

3.- Estimar la velocidad de descarga jet:

$$v = Ma v_{\text{sonic}} \quad (\text{Ecuación 77})$$

$$v = (1.0) (250.3)$$

$$v = 250.3 \text{ m/sec}$$

4.- Estimar los parámetros C_{LP} y d_{jR} :

$$C_{LP} = C_L \left(\frac{v}{u_a} \right) \left(\frac{MW_i}{MW_a} \right) \quad \text{(Ecuación 78)}$$

$$C_L = 0.021$$

$$u_a = 10 \text{ mph} = 4.5 \text{ m/sec}$$

$$MW_a = 29 \text{ kg/kgmole}$$

$$C_{LP} = (0.021) \left(\frac{250.3}{4.5} \right) \left(\frac{44.1}{29} \right)$$

$$C_{LP} = 1.78 = \text{Parámetro de concentración del límite inferior explosivo.}$$

$$d_{jR} = d \left(\frac{v}{u_a} \right) \left(\frac{T_a MW_i}{T_i} \right)^{0.5} \quad \text{(Ecuación 79)}$$

$$d_{jR} = (0.038) \left(\frac{250.3}{4.5} \right) \left[\frac{(294)(44.1)}{(294)} \right]^{0.5}$$

$$d_{jR} = 14.0 = \text{Parámetro de empuje del viento y de empuje del jet.}$$

5.- Determinar las distancias horizontal y vertical del centro de la flama a partir del punto de descarga. De la FIGURA 17 (página 141), el valor de x_c asociado con $C_{LP} = 1.78$ y $d_{jR} = 14.0$ se encuentra por debajo de la escala de la Figura. Por lo tanto, el método propuesto por Brzustowski (1976) será empleado para determinar la localización del centro de la flama.

Para $C_{LP} = 1.78$:

$$\bar{S}_i = 2.71 C_{LP}^{-0.625} \quad C_{LP} > 0.5 \quad \text{(Ecuación 81)}$$

$$\bar{S}_i = 2.71 (1.78)^{-0.625} = 1.89$$

para $\bar{S}_t \leq 2.35$,

$$\bar{S}_t = 1.04 \bar{x}_t^2 + 2.05 \bar{x}_t^{0.28} \quad \text{(Ecuación 82)}$$

$$1.89 = 1.04 \bar{x}_t^2 + 2.05 \bar{x}_t^{0.28}$$

$$\bar{x}_t = 0.47$$

La localización de la punta de la flama está dada por las siguientes ecuaciones:

$$x_t = \bar{x}_t d \left(\frac{\rho_f}{\rho_a} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{u} \right) \quad \text{(Ecuación 84)}$$

$$y_t = 2.04 \bar{x}_t^{0.28} d \left(\frac{\rho_f}{\rho_a} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{u} \right) \quad \text{(Ecuación 85)}$$

$$d = 0.038 \text{ m}$$

$$\rho_f = 18.8 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 250.3 \text{ m/sec}$$

$$u = 4.5 \text{ m/sec}$$

$$x_t = (0.47)(0.038) \left(\frac{18.8}{1.2} \right)^{1/2} \left(\frac{250.3}{4.5} \right) = 3.9 \text{ m}$$

$$y_t = 2.04(0.47)^{0.28}(0.038) \left(\frac{18.8}{1.2} \right)^{1/2} \left(\frac{250.3}{4.5} \right) = 13.8 \text{ m}$$

$$x_c = \frac{x_t}{2} \quad \text{(Ecuación 86)}$$

$$y_c = \frac{y_t}{2} \quad \text{(Ecuación 87)}$$

$$x_c = \frac{3.9}{2} = 1.95 \text{ m}$$

$$y_a = \frac{13.8}{2} = 6.9 \text{ m}$$

6.- Estimar la distancia (D) del punto de origen al objetivo de interés:

$$D = \sqrt{x^2 + y^2}$$

x = distancia horizontal del punto de origen al objetivo de interés (m).

y = distancia vertical del punto de origen al objetivo de interés (m).

$$x = 6.1 \text{ m} - 1.95 \text{ m} = 4.2 \text{ m}$$

$$61 \text{ m} - 1.95 \text{ m} = 59.1 \text{ m}$$

$$y = 3.05 \text{ m} + 6.9 \text{ m} = 10.0 \text{ m}$$

$$D = \sqrt{(4.2)^2 + (10.0)^2}$$

$$D = 10.8 \text{ m} = \text{distancia entre el centro de la flama y el objetivo de interés ubicado a 20 ft.}$$

$$D = \sqrt{(59.1)^2 + (10.0)^2}$$

$$D = 59.9 \text{ m} = \text{distancia entre el centro de la flama y el objetivo de interés ubicado a 200 ft.}$$

7.- Estimar la fracción del calor radiado:

$$\beta = 0.321 - 0.000418 v \quad (\text{Ecuación 74})$$

$$v = 250.3 \text{ m/sec}$$

$$\beta = 0.321 - (0.000418)(250.3)$$

$$\beta = 0.22 = \text{fracción de calor total radiado por el fuego jet.}$$

8.- **Estimar la transmisividad (τ):**

A $T_a = 70$ °F (21 °C), la presión de vapor saturada del agua (P_w) es de 2,490 N/m² (TABLA 19, página 122). Para $D = 10.8$ m, a partir del punto de origen, y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RHD = (2490) (0.9) (10.8) = 24,203 \text{ N/m}$$

De la FIGURA 15 (página 122), $\tau = 0.8$ para $D = 10.8$ m. Para una distancia $D = 59.9$ m a partir del punto de origen y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RHD = (2490) (0.9) (59.9) = 134,236 \text{ N/m}$$

De la FIGURA 15 (página 122), $\tau = 0.70$ para $D = 59.9$ m.

9.- **Estimar el flujo térmico al objetivo de interés:**

$$I_{th} = \frac{\tau \beta Q_{th}}{4\pi D^2} \quad (\text{Ecuación 72})$$

$$I_{th} = \frac{(0.8)(0.22)(2.07 \times 10^5)}{(4)(\pi)(10.8)^2}$$

$$I_{th} = 24.9 \text{ kW/m}^2 = 7848 \text{ Btu/ft}^2\text{-h para } x_g = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

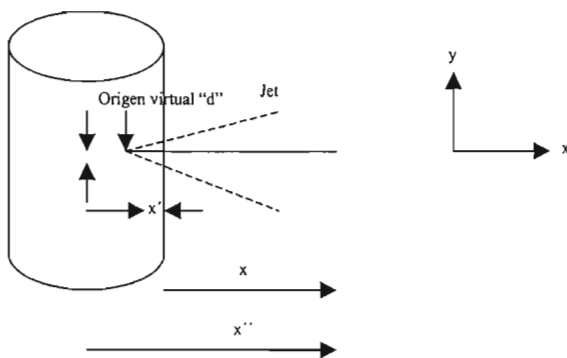
$$I_{th} = \frac{(0.7)(0.22)(2.07 \times 10^5)}{(4)(\pi)(59.9)^2}$$

$$I_{th} = 0.71 \text{ kW/m}^2 = 224 \text{ Btu/ft}^2\text{-h para } x_g = 61 \text{ m (200 ft)}$$

3.4.3.2. Modelo TNO.

TNO (1992) presenta un modelo para fuegos jet basado en un modelo simple de dispersión jet:

FIGURA 19



- d** = diámetro del punto de liberación (m).
- x** = distancia a lo largo del eje del jet, medida a partir del punto de liberación (m).
- y** = distancia perpendicular, medida a partir del eje del jet (m).
- x'** = localización del origen virtual, medida a partir del punto de liberación (m).
- x'''** = $x' + x \approx x$ (m).

TNO (1992) presenta las siguientes ecuaciones para estimar la concentración jet $C(x, y)$:

$$C(x, y) = C_m(x) e^{-b_2 y^2 / 3} \quad \text{(Ecuación 89)}$$

$$C_m(x) = \frac{\left(\frac{b1 + b2}{b1} \right) C_{rp}}{0.32 \frac{X''}{d \sqrt{C_d}} \frac{\rho'_{g,a}}{\sqrt{\rho'_{g,0}}} + 1 - \rho'_{g,a}} \quad \text{(Ecuación 90)}$$

$$b_1 = 50.5 + 48.2\rho'_{g,a} - 9.95(\rho'_{g,a})^2 \quad (\text{Ecuación 91})$$

$$b_2 = 23 + 41\rho'_{g,a} \quad (\text{Ecuación 92})$$

$$b_3 = y/x'' \quad (\text{Ecuación 93})$$

C (x, y) = fracción volumen del gas a la localización x, y (volumen o fracción molar).

Cm(x) = fracción volumen del gas en el eje jet (y = 0) (volumen o fracción molar).

Crp = fracción volumen del gas en el punto de liberación (volumen o fracción molar).

b₁ = constante de distribución de la velocidad (adimensional).

b₂ = constante de distribución de la concentración (adimensional).

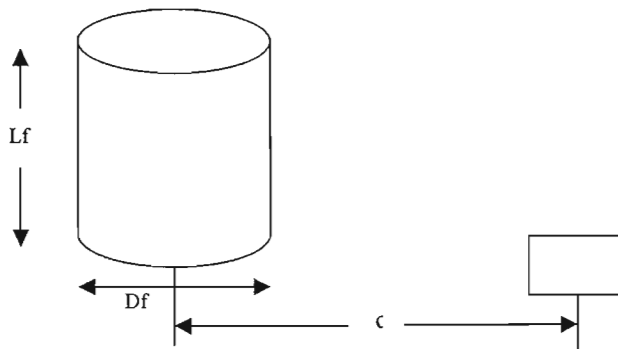
b₃ = constante de origen virtual (adimensional).

C_D = coeficiente de descarga (adimensional).

ρ' _{g, a} = relación de la densidad del gas a condiciones ambientales a la densidad del aire ambiental (adimensional).

ρ' _{g, 0} = relación de la densidad del gas al punto de liberación a la densidad del aire ambiental (adimensional).

FIGURA 20



- Lf** = longitud de la flama.
Df = diámetro de la flama.
c = distancia del centro de la flama al objeto.

Tanto la longitud **Lf** como el diámetro **Df**, equivalentes de la flama, pueden estimarse mediante el empleo de las siguientes fórmulas:

$$\mathbf{Lf} = \mathbf{d} / \mathbf{K}_1 \quad (\text{Ecuación 94})$$

$$\mathbf{Df} = \frac{\mathbf{d}}{2\mathbf{K}_1\sqrt{\mathbf{b}_2}} \quad (\text{Ecuación 95})$$

$$\mathbf{K}_1 = \frac{0.32\rho'_{g,a}}{\sqrt{\rho'_{g,0}}} \frac{\mathbf{b}_1}{\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2} \mathbf{Cst} \quad (\text{Ecuación 96})$$

- Lf** = longitud equivalente de la flama (m).
Df = diámetro equivalente de la flama (m).
K₁ = parámetro de concentración de la flama (volumen o fracción molar).
Cst = concentración estequiométrica de la mezcla aire/combustible (volumen o fracción molar).

El flujo térmico, a partir de un fuego jet cilíndrico, puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Ith} = \tau \mathbf{F} \mathbf{Es} \quad (\text{Ecuación 97})$$

- Ith** = radiación térmica que se recibe a la distancia **c**, (W/m²).
τ = transmisividad atmosférica (adimensional).
F = factor de vista geométrico, de la superficie de la flama al objetivo (adimensional).
Es = flujo de radiación térmica emitida en la superficie (W/m²).

Flujo Emitido en la Superficie (Es)

SFPE/NFPA (1988) presentan los siguientes datos de Yuen y Tien (1976), relativos a las temperaturas de radiación de la flama y del flujo emitido en la superficie, para varios hidrocarburos involucrados en un fuego jet:

TABLA 20

HIDROCARBURO	TEMPERATURA (°K)	FLUJO EMITIDO EN LA SUPERFICIE (Kw/m²)
Metano *	1289	157
Etano	1590	362
Etileno	1722	498
Propano	1561	336
Isobutano	1554	330
Butano normal	1612	383
Propileno	1490	279
Isobutileno	1409	223

* *Datos más recientes para el Gas Natural, sugieren una temperatura de la flama de 1500 °K y un correspondiente flujo emitido en la superficie de 287 kW/m².*

Por otra parte, se establece que el factor de vista geométrico (F) y la transisividad (τ) para un fuego jet cilíndrico, se determinan de la misma manera como se estableció en el modelo para charcos de fuego.

3.4.3.2.1. Consideraciones/Limitaciones del Modelo TNO.

1. La tasa de descarga es constante.
2. El efecto jet no afecta a obstáculos o superficies planas.
3. El régimen del flujo jet es turbulento ($Re > 25,000$).
4. La velocidad del viento es muy baja (condiciones en calma).
5. Es una correlación empírica.
6. Asume una mezcla estequiométrica de aire y combustible.
7. Ignora la reducción en la transmisividad por el efecto del CO₂ y del hollín en el aire.

3.4.3.2.2. Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo TNO.

1. Calcular el número de Reynolds (Re), con base en la velocidad jet y el diámetro del orificio o agujero.
2. Una vez que se determina que el modelo es aplicable ($Re > 25,000$), determinar la concentración estequiométrica de la mezcla aire/combustible.
3. Calcular el diámetro equivalente del fuego jet, así como la longitud de la flama.
4. Calcular la transmisividad entre el objetivo y el borde del fuego jet cilíndrico.
5. Calcular el factor de vista geométrico.
6. Calcular el flujo térmico al punto de interés.

3.4.3.2.3. Aplicación práctica del Modelo TNO (Ejemplo).

Una ruptura de 1 1/2" de diámetro ocurre en el espacio de vapor de un carro de ferrocarril, que contiene propano, liberando 10 lbm/seg de gas en una forma vertical y hacia arriba. El propano subsecuentemente se prende resultando en un fuego jet. El propano se encuentra almacenado a una temperatura ambiente de 70 °F y una presión de 124 psia (condiciones saturadas). La humedad relativa es del 90%. La ruptura se localiza aproximadamente a 10 ft por arriba del nivel del piso. La velocidad del viento ambiental es de 10 mph a la altura de la ruptura. Estimar el flujo térmico a nivel de piso para distancias de 20 y 200 ft (vientos debajo de la ruptura).

Datos de Propiedades del Propano

- Peso Molecular (MW) = 44.1 lbm/lbmol (44.1 kg/kgmol).
- Densidad del vapor a 70 °F y 124 psia (ρ_v) = 1.17 lbm/ft³ (18.8 kg/m³).
- Densidad del vapor a 70 °F y 14.7 psia (ρ_v) = 0.114 lbm/ft³ (1.83 kg/m³).
- Viscosidad del vapor de propano a 70 °F y 124 psia (μ_v) = 5.4 x 10⁻⁶ lbm/ft-seg (8.0 x 10⁻⁶ kg/m-seg).
- Concentración estequiométrica (Cst) = 4.0 %vol.

Datos de Propiedades del Aire Ambiental

- Densidad a 70 °F y 14.7 psia (ρ_a) = 0.075 lbm/ft³ (1.2 kg/m³).

- 1.- Estimar el número de Reynolds, con base en la velocidad jet y el diámetro del orificio. Considerando el problema anterior, la velocidad jet = 250.3 m/seg:

$$Re = \frac{\rho_v v d}{\mu_v}$$

$$\rho_v = 18.8 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_v = 8 \times 10^{-4} \text{ kg/m-sec}$$

$$d = 1\frac{1}{2} \text{ in.} = 0.038 \text{ m}$$

$$Re = \frac{(18.8)(250.3)(0.038)}{(8 \times 10^{-4})} = 2.2 \times 10^7 \gg 25,000$$

Por lo tanto, el modelo TNO es aplicable (apartado 3.4.3.2.1., consideración 3, página 153).

- 2.- Estimar el diámetro equivalente y la longitud de la flama:

$$L_f = \frac{d}{K_1} \quad (\text{Ecuación 94})$$

$$D_f = \frac{d}{2 K_1 b_2^{1/2}} \quad (\text{Ecuación 95})$$

$$\therefore K_1 = \frac{0.32 \rho'_{g,a}}{\sqrt{\rho'_{g,o}}} \frac{b_1}{b_1 + b_2} C_{st} \quad (\text{Ecuación 96})$$

$$b_1 = 50.5 + 48.2 \rho'_{g,a} - 9.95 (\rho'_{g,a})^2 \quad (\text{Ecuación 91})$$

$$b_2 = 23 + 41 \rho'_{g,a} \quad (\text{Ecuación 92})$$

$$d = 0.038 \text{ m}$$

$$\rho'_{g,a} = \left(\frac{1.83}{1.20} \right) = 1.525$$

$$\mu'_{z,0} = \left(\frac{18.8}{1.20} \right) = 15.67$$

$$C_{sp} \approx 0.04$$

$$b_1 = 50.5 + 48.2(1.525) - 9.95(1.525)^2 = 100.9$$

$$b_2 = 23 \cdot 41(1.525) = 85.5$$

$$K_1 = \frac{0.32(1.525)}{\sqrt{15.67}} \cdot \frac{(100.9)}{(100.9 + 85.5)} (0.04) = 2.67 \times 10^{-3}$$

$$L_r = \left(\frac{0.038}{2.67 \times 10^{-3}} \right) \cdot 14 \text{ m} = 46 \text{ ft}$$

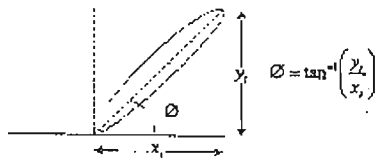
$$D_r = \frac{(0.038)}{2(2.67 \times 10^{-3})(85.5)^{1/2}} = 0.77 \text{ m} = 2.53 \text{ ft}$$

3.- Estimar el flujo emitido en la superficie:

De la TABLA 20 (página 153), el flujo emitido en la superficie, para un fuego jet de propano, es de aproximadamente 336 kW/m².

4.- Estimar la inclinación de la flama relativa a los objetivos:

Del problema anterior, la inclinación de la flama, relativa al plano horizontal, puede estimarse por medio de lo siguiente:

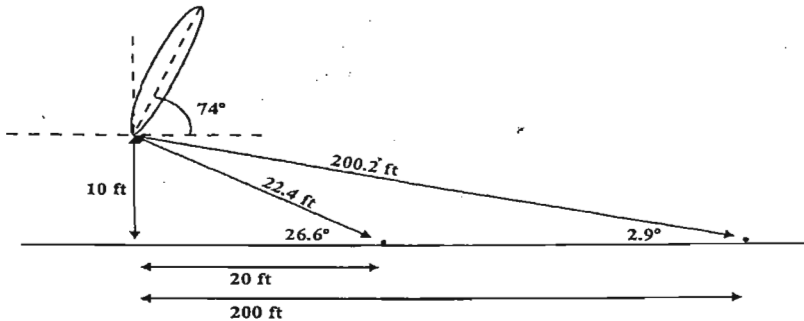


$$x_1 = 3.9 \text{ m}$$

$$y_1 = 13.8 \text{ m}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{13.8}{3.9} \right) = 74^\circ$$

La siguiente figura puede emplearse para determinar la inclinación de la flama, relativa a los objetivos:



De la figura anterior, puede deducirse que la inclinación de la flama relativa al objetivo localizado a 20 ft, es de -10.6° , y para el objetivo localizado a 200 ft, es de 13.1° .

5.- Estimar la transmisividad (τ):

A $T_a = 70^\circ\text{F}$ (21°C), la presión de vapor saturada del agua (P_w) es de $2,490\text{ N/m}^2$ (TABLA 19, página 122). Para $x_s = 22.4 - 1.26 = 21.1\text{ ft} = 6.4\text{ m}$ a partir del extremo del fuego jet y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RH x_s = (2490) (0.9) (6.4) = 14,342\text{ N/m}$$

De la FIGURA 15 (página 122), $\tau = 0.84$ para $x_s = 21.1\text{ ft}$. Para una distancia $x_s = 200.2 - 1.26 = 199\text{ ft} = 61\text{ m}$ a partir del extremo del fuego jet y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RH x_s = (2490) (0.9) (61) = 136,701\text{ N/m}$$

De la FIGURA 15 (página 122), $\tau = 0.70$ para $x_s = 199\text{ ft}$.

6.- Estimar el factor de vista geométrico (F).

$$a = 14\text{ m}$$

$$b = 0.385\text{ m}$$

$$c = b + x_s$$

$$c = 22.4\text{ ft} = 6.83\text{ m} \text{ y } \theta = -10.6^\circ, \text{ para } x_g = 20\text{ ft}$$

$$c = 200.2\text{ ft} = 61\text{ m} \text{ y } \theta = 13.1^\circ, \text{ para } x_g = 200\text{ ft}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{14}{0.385} = 36.4$$

$$\frac{c}{b} = \frac{6.83}{0.385} = 17.7, \text{ para } x_g = 20 \text{ ft}$$

$$\frac{c}{b} = \frac{61}{0.385} = 158.4, \text{ para } x_g = 200 \text{ ft}$$

Empleando las Tablas del APÉNDICE "B" e interpolando:

$$F = 0.026, \text{ para } x_g = 20 \text{ ft}$$

$$F = 9.5 \times 10^{-4}, \text{ para } x_g = 200 \text{ ft}$$

7.- Estimar el flujo térmico al objetivo de interés:

$$I_{th} = \tau F E_s \quad (\text{Ecuación 97})$$

Para $x_g = 6.1 \text{ m}$ (20 ft), $\tau = 0.84$, y $F = 0.026$

$$I_{th} = (0.84)(0.026)(336)$$

$$I_{th} = 7.3 \text{ kW/m}^2 = 2311 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr, para } x_g = 6.1 \text{ m (20 ft)}$$

Para $x_g = 61 \text{ m}$ (200 ft), $\tau = 0.7$, y $F = 9.5 \times 10^{-4}$

$$I_{th} = (0.7)(9.5 \times 10^{-4})(336)$$

$$I_{th} = 0.22 \text{ kW/m}^2 = 68 \text{ Btu/ft}^2\text{-hr, para } x_g = 61 \text{ m (200 ft)}$$

3.4.4. *Modelaciones para Bolas de Fuego (Fireballs).*

Una bola de fuego se presenta por la ignición de una mezcla líquido/vapor, supercalentada, inflamable y liberada en el aire. Una bola de fuego a menudo ocurre subsecuente a una explosión de vapor, en expansión de líquidos en ebullición (BLEVE, Boiling, Liquid Expanding Vapor Explosion).

3.4.4.1. *Modelo.*

CPQRA (1989) establece que la radiación recibida por un objetivo, dada la duración de un incidente de bola de fuego, está dada por la siguiente fórmula:

$$I_{th} = \tau F E_s \quad (\text{Ecuación 98})$$

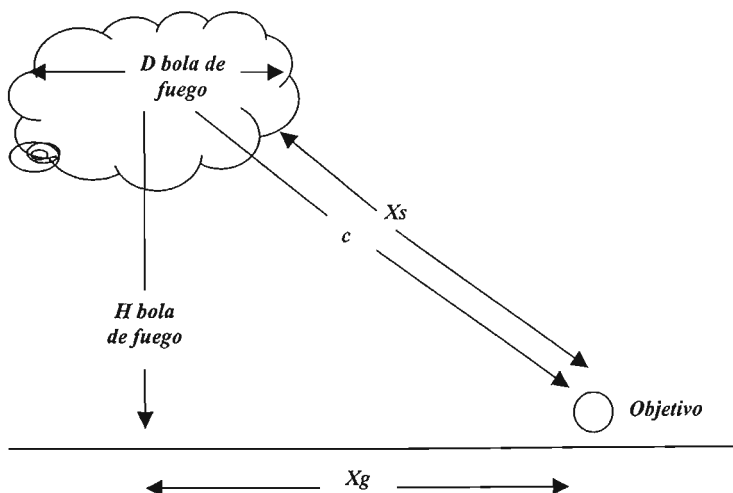
I_{th} = radiación térmica recibida por el objetivo (kW/m^2).

τ = transmisividad atmosférica (adimensional).

F = factor de vista geométrico (adimensional).

E_s = flujo de radiación térmica emitida en la superficie (kW/m^2).

FIGURA 21



El flujo emitido en la superficie está dado por la siguiente fórmula:

$$E_s = \frac{\beta M_{boladefuego} H_c}{\pi D_{boladefuego}^2 t_{boladefuego}} \quad (\text{Ecuación 99})$$

β = fracción del calor total radiado (generalmente 0.25 – 0.4, adimensional).

H_c = calor neto de combustión (kJ/kg).

La transmisividad (τ) para una bola de fuego, se determina de la misma manera como se estableció en el modelo para charcos de fuego. Por otra parte, el factor de vista geométrico (F), para una bola de fuego esférica, puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$F = D_{bola\ de\ fuego}^2 / 4c^2 \quad (\text{Ecuación 100})$$

$D_{bola\ de\ fuego}$ = máximo diámetro de la bola de fuego (m).

c = distancia del centro de la bola de fuego al objetivo (m).

Parámetros involucrados en la Bola de Fuego

CCPS (1994) presenta las siguientes relaciones empíricas para Bolas de Fuego:

$$D_{bola\ de\ fuego} = 5.8 M_{boladefuego}^{1/3} \quad (\text{Ecuación 101})$$

$$t_{bola\ de\ fuego} = 0.45 M_{boladefuego}^{1/3}, \quad \text{para } M_{bola\ de\ fuego} < 30,000 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 102a})$$

$$t_{bola\ de\ fuego} = 2.6 M_{boladefuego}^{1/6}, \quad \text{para } M_{bola\ de\ fuego} \geq 30,000 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 102b})$$

$$H_{bola\ de\ fuego} = 0.5 D_{bola\ de\ fuego} \quad (\text{Ecuación 103})$$

- M** bola de fuego = masa inicial del líquido inflamable (kg).
D bola de fuego = máximo diámetro de la bola de fuego (m).
t bola de fuego = duración de la bola de fuego (seg).
H bola de fuego = altura máxima del centro de la bola de fuego (m).

3.4.4.2. Consideraciones/Limitaciones del Modelo para Bolas de Fuego.

- Las ecuaciones consideradas dentro de este modelo son correlaciones empíricas.
- Se ignora la reducción en la transmisividad por el efecto del CO₂ y del hollín en el aire.

3.4.4.3. Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo para Bolas de Fuego.

1. Calcular las propiedades (parámetros) de la bola de fuego con base en la masa total liberada.
2. Calcular el factor de vista geométrico.
3. Calcular la transmisividad de la atmósfera.
4. Calcular el flujo emitido en la superficie.
5. Calcular la radiación térmica recibida por un objeto u objetivo.

3.4.4.4. Aplicación práctica del Modelo para Bolas de Fuego (Ejemplo).

Un tanque de almacenamiento, envuelto en llamas, y que contiene 50,000 lbm de propano licuado, falla catastróficamente, resultando en un BLEVE y en una Bola de Fuego. La temperatura ambiental es de 70 °F, y la humedad relativa es del 90%. Estimar el flujo térmico sobre el piso a distancias horizontales de 500 y 1000 ft:

Datos de Propiedades del Propano

- Calor neto de combustión (Hc) = 19,801 Btu/lbm (46,013 kJ/kg).

1.- Estimar los parámetros principales para la Bola de Fuego:

$$D_{\text{bola de fuego}} = 5.8M_{\text{boladefuego}}^{1/3} \quad (\text{Ecuación 101})$$

$$t_{\text{bola de fuego}} = 0.45M_{\text{boladefuego}}^{1/3}, \quad \text{para } M_{\text{bola de fuego}} < 30,000 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 102a})$$

$$t_{\text{bola de fuego}} = 2.6M_{\text{boladefuego}}^{1/6}, \quad \text{para } M_{\text{bola de fuego}} \geq 30,000 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 102b})$$

$$H_{\text{bola de fuego}} = 0.5 D_{\text{bola de fuego}} \quad (\text{Ecuación 103})$$

$M_{\text{bola de fuego}} = 50,000 \text{ lbm} = 22,700 \text{ kg}$ (masa inicial de líquido inflamable).

$D_{\text{bola de fuego}} = (5.8)(22,700) = 164 \text{ m}$ (máximo diámetro de la bola de fuego).

$t_{\text{bola de fuego}} = (0.45)(22,700) = 13 \text{ seg}$ (duración de la bola de fuego).

$H_{\text{bola de fuego}} = (0.5)(164) = 82 \text{ m}$ (altura máxima del centro de la bola de fuego).

2.- Estimar el flujo emitido en la superficie (Es):

$$Es = \frac{\beta M_{\text{boladefuego}} Hc}{\pi D_{\text{boladefuego}}^2 t_{\text{boladefuego}}} \quad (\text{Ecuación 99})$$

$\beta = 0.3$ (asumido)

$Hc = 46,013 \text{ kJ/kg}$

$$Es = \frac{(0.3)(22,700)(46,013)}{\pi(164)^2(13)} = \underline{285 \text{ kW/m}^2}$$

3.- Estimar el factor de vista geométrico (F):

$$F = D_{\text{bola de fuego}}^2 / 4c^2 \quad (\text{Ecuación 100})$$

$$c = \left(x_g^2 + H_{\text{boladefuego}}^2 \right)^{1/2}$$

$x_g =$ distancia horizontal del centro de la bola de fuego al objetivo de interés (m).

$x_g = 500 \text{ ft} = 152 \text{ m}$

$= 1000 \text{ ft} = 305 \text{ m}.$

$$c = \left[(152)^2 + (82)^2 \right]^{1/2} = 173m \quad \text{para } x_g = 500 \text{ ft}$$

$$c = \left[(305)^2 + (82)^2 \right]^{1/2} = 316m \quad \text{para } x_g = 1000 \text{ ft}$$

$$F = \frac{(164)^2}{(4)(173)^2} = 0.225 \quad \text{para } x_g = 500 \text{ ft}$$

$$F = \frac{(164)^2}{(4)(316)^2} = 0.067 \quad \text{para } x_g = 1000 \text{ ft}$$

4.- Estimar la transmisividad (τ) entre el objetivo y la superficie de la bola de fuego:

A $T_a = 70 \text{ }^\circ\text{F}$ ($21 \text{ }^\circ\text{C}$), la presión de vapor saturada del agua (P_w) es de $2,490 \text{ N/m}^2$ (TABLA 19, página 122). Para $x_g = 500 \text{ ft}$, la distancia de la superficie x_s de la bola de fuego, al objetivo es igual a la distancia del centro de la bola de fuego menos el radio de la bola de fuego: $173 - 164/2$ ó 91 m . Empleando esta distancia y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RH x_s = (2490) (0.9) (91) = 203,931 \text{ N/m}$$

De la FIGURA 15 (página 122), $\tau = 0.67$ para $x_g = 500 \text{ ft}$. Para $x_g = 1000 \text{ ft}$, la distancia de la superficie (x_s) de la bola de fuego es: $316 - 164/2$ ó 234 m . Empleando esta distancia y una humedad relativa (RH) del 90%:

$$P_w RH x_s = (2490) (0.9) (234) = 524,394 \text{ N/m}$$

De la FIGURA 15 (página 122), $\tau = 0.62$ para $x_g = 1000 \text{ ft}$.

5.- Estimar el flujo térmico al objetivo de interés:

$$I_{th} = \tau F E_s \quad \text{(Ecuación 98)}$$

$$I_{th} = (0.67) (0.225) (285)$$

$$I_{th} = 42.9 \text{ kW/m}^2 = 13,640 \text{ Btu/ft}^2\text{-h} \quad \text{para } x_g = 500 \text{ ft}$$

$$I_{th} = (0.62) (0.067) (285)$$

$$I_{th} = 11.9 \text{ kW/m}^2 = 3738 \text{ Btu/ft}^2\text{-h} \quad \text{para } x_g = 1000 \text{ ft}$$

3.4.5. Modelación para Fuegos “Flash” (Flash Fires).

3.4.5.1. Consideraciones.

Cuando un material, volátil e inflamable, es liberado a la atmósfera, se forma y dispersa una nube de vapor. Si la nube de vapor resultante se prende antes de que la nube se diluya, por debajo de su límite inferior de inflamabilidad, entonces puede ocurrir un “fuego flash”. La principal consecuencia de un “fuego flash” es la radiación térmica generada, durante el proceso de combustión.

3.4.5.2. Secuencia a seguir para la aplicación del Modelo para Flash Fires.

1. Emplear un modelo de dispersión atmosférica para estimar el tamaño de la nube de vapor inflamable, asumiendo que el límite de la nube se extiende hacia la mitad del límite inferior de inflamabilidad.
2. Asumir que, dado que la nube de vapor se prende, cualquier persona que se encuentre dentro de los límites de la nube será quemada severamente; aquella(s) persona(s) que se encuentre(n) fuera de los límites de la nube, se considera(n) que sobrevive(n) dada la corta duración del fuego flash.

3.4.5.3. Consideraciones/Limitaciones del Modelo para Flash Fires.

- El proceso de combustión es de corta duración y de una intensidad relativamente baja.
- La expansión térmica, de la nube, ocurre verticalmente, dada la flotabilidad del vapor que está ardiendo.
- No se presentan daños ó lesiones severas fuera de la nube de vapor inflamable.

3.4.6. Medidas para la Prevención y Mitigación de Fuegos.

La *prevención del fuego* se encuentra relacionada con los métodos, procedimientos y/o equipos que ayudan a prevenir la ocurrencia de un fuego. Por otra parte, la *mitigación del fuego* se encuentra relacionada con los métodos, procedimientos y/o equipos que ayudan a reducir los efectos de un fuego.

Medidas de Prevención del Fuego

- Control de Fuentes de Ignición.
- Clasificación Eléctrica apropiada y mantenimiento para Equipo de Proceso.
- Procedimientos para trabajos en caliente, con personal entrenado.
- Control apropiado de concentraciones de vapor inflamable, como por ejemplo, manteniendo inertes los espacios de vapor en tanques de almacenamiento.

Medidas de Mitigación del Fuego

- Arrestadores de Flama.
- Personal contra-incendio, debidamente entrenado.
- Dispositivos de extinción, tales como aspersores, extinguidotes, hidrantes y monitores, entre otros.

3.5 *MODELACIONES PARA EXPLOSIONES.*

3.5.1. *Fundamentos.*

Una explosión es una liberación de energía que causa un cambio transitorio en la densidad, presión y velocidad del aire, alrededor del punto de la liberación de la energía.

Clasificación de las Explosiones

- *Explosiones Físicas.* Son aquéllas que se originan a partir de un fenómeno estrictamente físico, tales como la ruptura de un cilindro de gas presurizado, un BLEVE, etc.
- *Explosiones Químicas.* Son aquéllas que se originan a partir de una reacción química, como por ejemplo, la combustión de un gas inflamable en el aire.

Explosiones Físicas: BLEVE

Un BLEVE ocurre cuando hay una pérdida súbita de contenido en un recipiente que contiene un líquido supercalentado ó un gas licuado. La principal causa de un BLEVE, es usualmente un fuego externo incidiendo sobre las paredes del recipiente por arriba del nivel de líquido, debilitando al recipiente para subsecuentemente provocar la súbita ruptura del mismo.

Así mismo, un BLEVE puede ocurrir como resultado de cualquier mecanismo que cause la falla repentina de un recipiente, permitiendo el flasheo de un líquido supercalentado. Si el vapor/líquido liberado es inflamable, entonces la ignición de la mezcla puede resultar en una Bola de Fuego.

Explosiones Químicas: Tipos de Reacciones

Las reacciones químicas pueden clasificarse como “*uniformes*” ó “*de propagación*”.

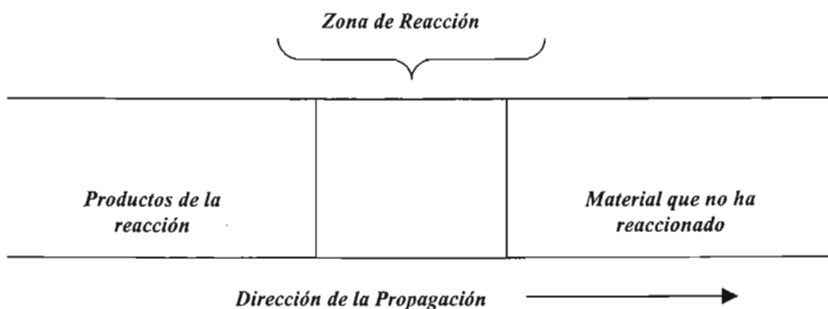
Las reacciones “*uniformes*” son aquéllas en las cuales la reacción química se presenta, más o menos de manera uniforme, por toda la masa del material. Ejemplos de reacciones uniformes son aquéllas reacciones químicas ordinarias que forman productos gaseosos.

Bajo condiciones confinadas, y con provisiones inadecuadas, que permitan la disipación del calor de reacción, inicialmente una reacción exotérmica uniforme puede acelerar el proceso para que ocurra una explosión térmica. Dependiendo de la reacción y así como también de la resistencia del recipiente de confinamiento, pueden presentarse dos escenarios:

- 1) durante el proceso de aceleración, el recipiente puede fallar y ventear el contenido, ó
- 2) el recipiente puede contener la reacción durante largo tiempo hasta iniciar una reacción de propagación.

Las reacciones “*de propagación*” son aquéllas en las cuales la reacción química se inicia en un lugar específico, dentro de la masa del material, y se propaga a partir de este punto, como una reacción frontal por todo el material que no ha reaccionado. Por otra parte, las reacciones de propagación se clasifican como “*deflagraciones*” ó “*detonaciones*”, dependiendo del mecanismo por el cual la energía se transfiere, de la zona de reacción al material que no ha reaccionado

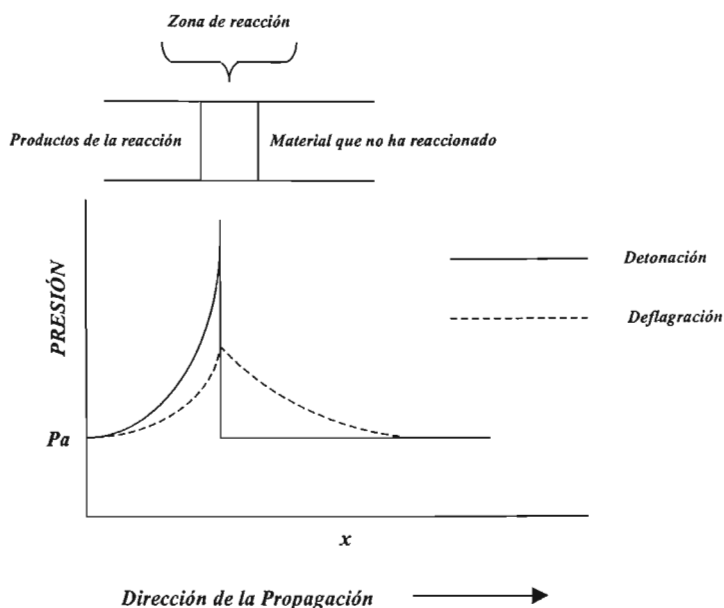
FIGURA 22



Las “*deflagraciones*” son reacciones de propagación en las cuales la transferencia de energía se presenta por medio de un proceso de transporte ordinario (transferencia de masa y de calor), de la zona de reacción al medio que no ha reaccionado. La velocidad de tales reacciones es menor que la velocidad del sonido en el reactivo.

Las “*detonaciones*” son reacciones de propagación en las cuales la transferencia de energía se presenta por medio de una onda de choque reactiva, de la zona de reacción al medio que no ha reaccionado. La velocidad de tales reacciones excede a la velocidad del sonido en el reactivo.

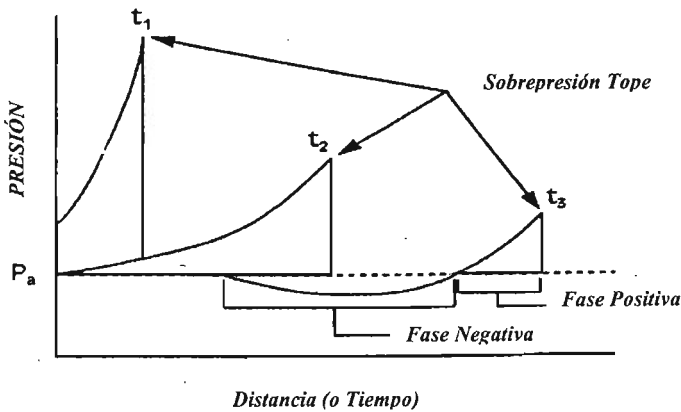
FIGURA 23. Ejemplo de perfiles de Presión para Deflagración vs. Detonación:



Ondas de Choque (Blast Wave)

La *Sobrepresión (+P)*, también conocida como presión estática, se refiere a la presión neta que se encuentra por encima de la presión atmosférica y que se presenta durante la fase positiva de una onda de choque. La *Sobrepresión Tope (Ps)* se refiere a la presión máxima neta que se encuentra por encima de la presión atmosférica y asociada con la fase positiva de una onda de choque. La *Bajapresión (-P)* se refiere a la presión neta que se encuentra por debajo de la presión atmosférica y que se presenta durante la fase negativa de una onda de choque.

FIGURA 24. Ejemplo de Intensidad de una Onda de Choque vs. Distancia (ó Tiempo)



La *Presión Dinámica (Pd)* se refiere a la presión generada por la energía cinética de los gases en expansión ó en movimiento cuando éstos encuentran un objeto sólido:

$$Pd = \frac{1}{2} \frac{\rho u_p^2}{g_c} \quad (\text{Ecuación 104})$$

$$\rho = \left[\frac{2\gamma Pa + (\gamma + 1)Ps}{2\gamma Pa + (\gamma - 1)Ps} \right] \rho_a \quad (\text{Ecuación 105})$$

P_d = presión dinámica (lb/ft^2).

P_s = sobrepresión tope detrás del frente de choque (lb/ft^2).

P_a = presión ambiental delante de la onda de choque (lb/ft^2).

ρ = densidad del aire detrás del frente de choque (lb/ft^3).

ρ_a = densidad del aire ambiental delante de la onda de choque (lb/ft^3).

u_p = velocidad tope del viento detrás del frente de choque (velocidad de partícula, ft/seg).

γ = relación de calores específicos para el aire, ≈ 1.4 .

g_c = 32.2 ($\text{lbm}\cdot\text{ft}/\text{lb}\cdot\text{seg}^2$).

Para una onda de choque ideal en el aire a nivel del mar, la sobrepresión tope, la presión dinámica tope y así como también la velocidad máxima del viento, se establecen por medio de los siguientes datos:

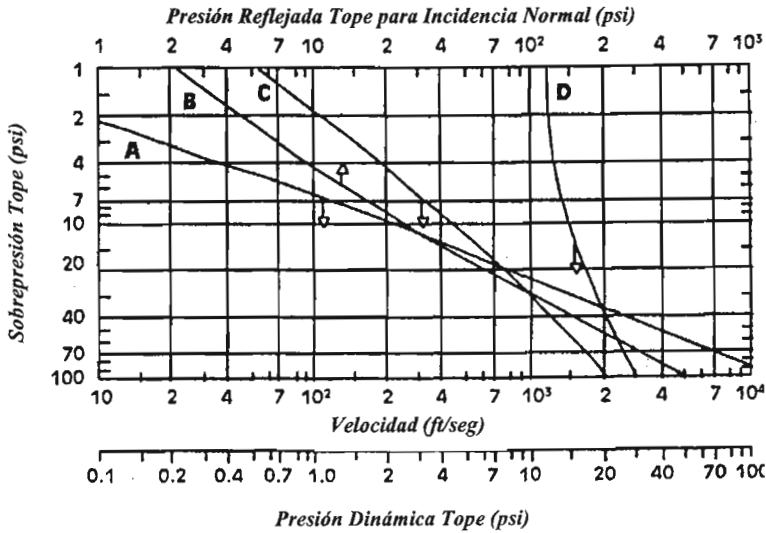
TABLA 21

<i>Sobrepresión Tope (psi)</i>	<i>Presión Dinámica Tope (psi)</i>	<i>Velocidad máxima del Viento (millas/h)</i>
200	330	2078
100	123	1415
50	41	934
30	17	669
20	8.1	502
10	2.2	294
5	0.6	163
2	0.1	70

Por otra parte, la *Presión Reflejada* (P_r) se refiere a la presión que recibe un objetivo dado. Cuando una onda de choque golpea de frente una superficie plana, la presión reflejada P_r está dada por:

$$P_r = 2P_s + (\gamma + 1)P_d \quad \text{(Ecuación 106)}$$

FIGURA 25



- A = Presión Dinámica.
- B = Presión Reflejada.
- C = Velocidad de Partícula.
- D = Velocidad de Choque.

FIGURA 26. *Reflexión de la Onda de Choque en la Superficie de la Tierra a partir de una Explosión en el Aire:*

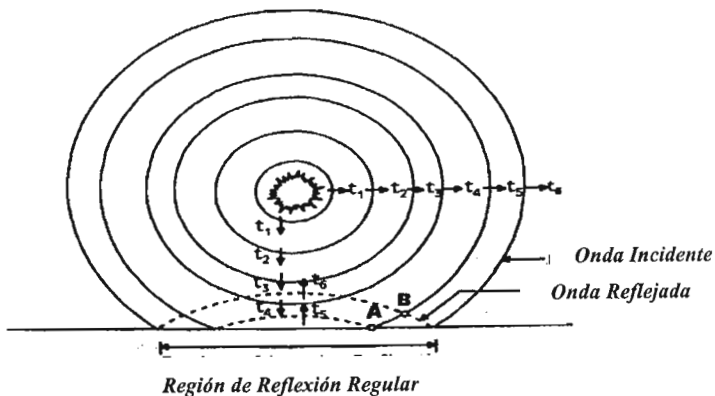
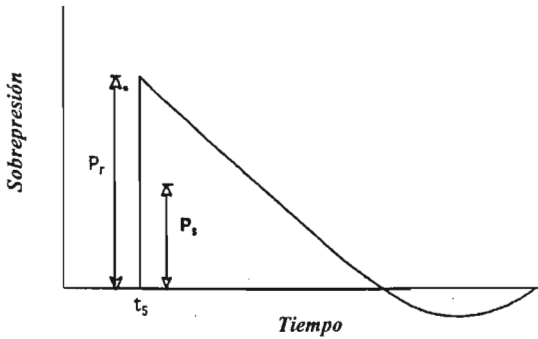


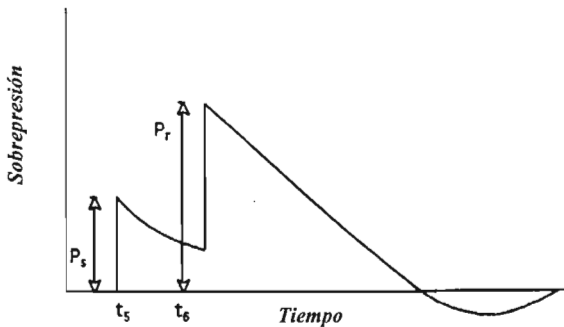
FIGURA 27. Variación de la Sobrepresión, con el Tiempo, en un punto sobre la Superficie localizado dentro de la Región de Reflexión Regular (punto A):



P_r = presión reflejada.

P_s = sobrepresión tope.

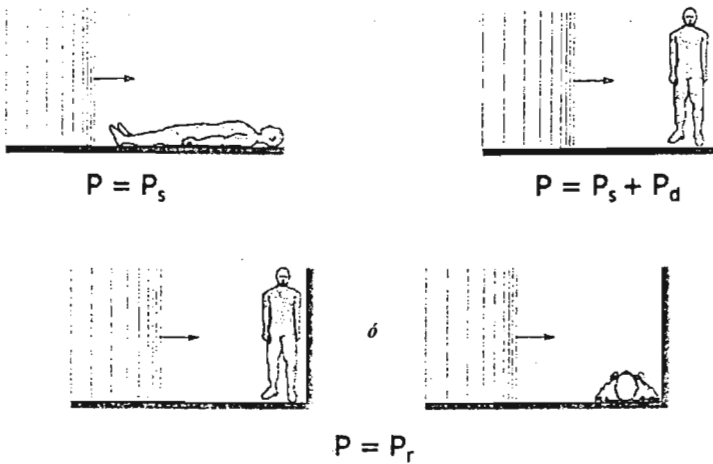
FIGURA 28. Variación de la Sobrepresión, con el Tiempo, en un punto por arriba de la Superficie localizado dentro de la Región de Reflexión Regular (punto B):



P_r = presión reflejada.

P_s = sobrepresión tope.

FIGURA 29. *Presión Actual ejercida sobre un Cuerpo para varias Orientaciones:*



Impulso Incidente Positivo (Is), se refiere a la integral de la presión sobre el tiempo para la duración de la fase positiva de la onda de choque:

$$I_s = \int_{t_0}^{t_p} P(t) dt \quad (\text{Ecuación 107})$$

I_s = impulso incidente positivo (psia-mseg).

$P(t)$ = la sobrepresión como una función del tiempo a un punto dado (psia).

t_0 = el tiempo de llegada de la onda de choque al punto dado (mseg).

t_p = tiempo en el cual termina la fase positiva de la onda de choque (mseg).

Para explosivos estándar, tales como el TNT, las características de las ondas de choque son bien conocidas, a nivel experimental. Las características de las ondas de choque son generalmente trazadas como una función de la distancia escalada "Z":

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (\text{Ecuación 108})$$

- Z = distancia escalada (ft/lbm^{1/3}).
- R = distancia radial de la explosión (ft).
- W_{TNT} = masa de TNT (lbm).

FIGURA 30. Parámetros de Onda de Choque para una Explosión Superficial de TNT (Hemisférica) a Nivel de Mar:

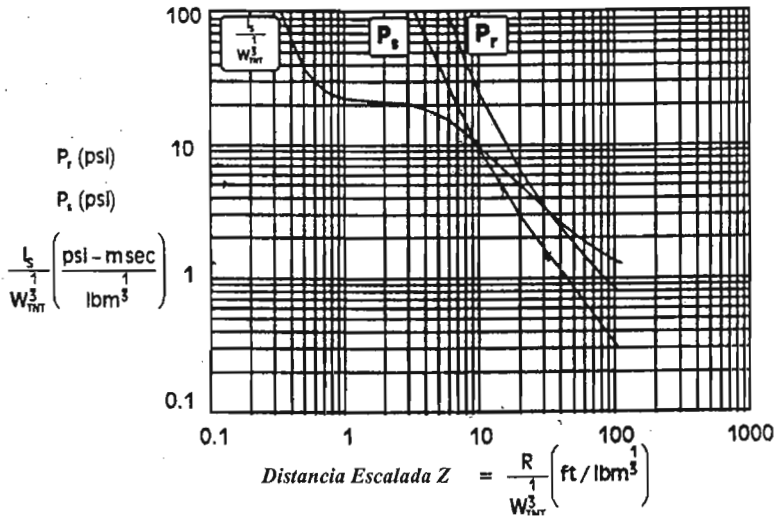
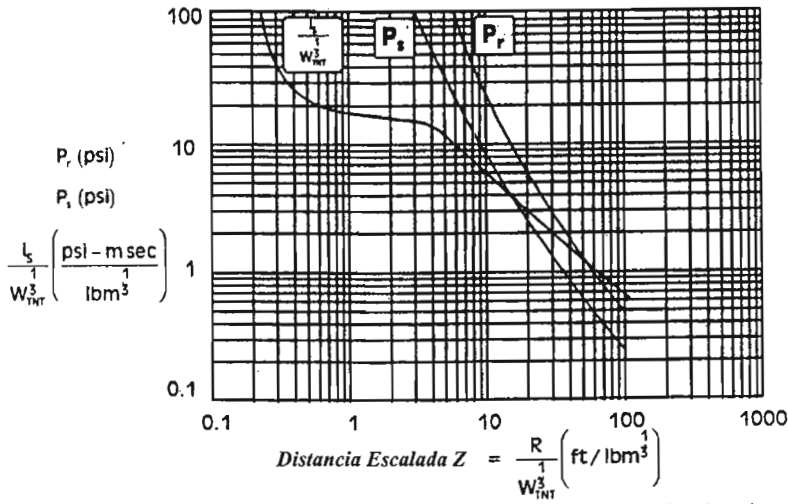


FIGURA 31. Parámetros de Onda de Choque para una Explosión en el Aire de TNT
(Esférica) cerca del Nivel de Mar:



Explosiones de Nubes de Vapor (Vapor Cloud Explosions, VCE's)

El desarrollo de una explosión, de nube de vapor, puede describirse en un proceso de cuatro pasos:

- 1.- Liberación de un vapor ó gas inflamable.
- 2.- Mezclado del material liberado con el aire ambiental para formar una nube, la cual una parte de su volumen se encuentra en el rango inflamable.
- 3.- Ignición de la mezcla inflamable.
- 4.- Propagación de la flama a través de las regiones de la nube en donde la concentración se encuentra dentro del rango inflamable.

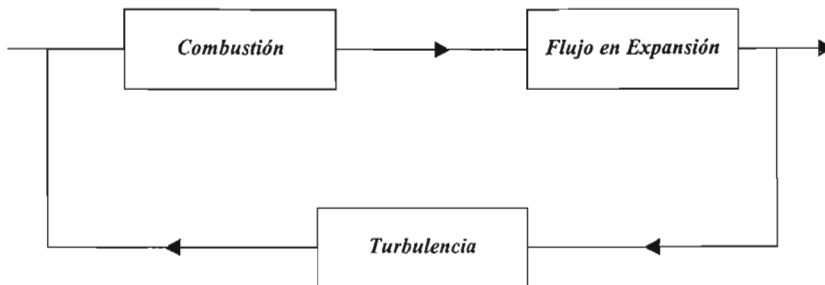
Evidencia de incidentes actuales de explosiones de nubes de vapor, sugieren que la propagación de una *detonación* a través de una nube de vapor, completa o una porción significativa de la misma, es extremadamente rara. En la mayoría de los casos, la flama se propagará como una *deflagración*.

Una nube de vapor que experimenta deflagración, puede presentar alguna de las dos categorías siguientes:

- 1) La propagación de la flama es bastante lenta de manera que no ocurre una sobrepresión significativa (fuego flash).
- 2) La propagación de la flama es bastante rápida para producir una sobrepresión significativa (explosión de nube de vapor).

Una sobrepresión significativa usualmente requiere de uno o más de los siguientes factores: turbulencia, confinamiento parcial u obstáculos y/o una detonación. Al respecto, la fuente más importante de la turbulencia es la generada por el proceso de combustión, en donde la turbulencia se desarrolla como una consecuencia de la propagación de la flama.

FIGURA 32. Mecanismo Básico de una Explosión de Gas con Deflagración:



Con base en revisiones actuales, de explosiones de nubes de vapor, la sobrepresión máxima, dentro de la nube de vapor, es de aproximadamente 15 psi, para áreas congestionadas. Para el caso de áreas planas y no obstruidas, puede establecerse un valor promedio de 1.5 psi como sobrepresión máxima.

Lenoir y Davenport (1992) presentan una base de datos de explosiones de nubes de vapor (1920 – 1991), en donde estuvieron involucrados los siguientes materiales inflamables:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

TABLA 22

<i>Acroleína</i>	<i>Bicloruro de etileno</i>	<i>Metano</i>
<i>Benceno</i>	<i>Oxido de etileno</i>	<i>Nafta</i>
<i>Butadieno</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Gas natural</i>
<i>Butano</i>	<i>Hexano</i>	<i>Propano</i>
<i>Butileno</i>	<i>Hidrógeno</i>	<i>Propileno</i>
<i>Ciclohexano</i>	<i>Isobutano</i>	<i>Syngas</i>
<i>Eter dimetilico</i>	<i>Isobutileno</i>	<i>Cloruro de vinilo</i>
<i>Cloruro de etilo</i>	<i>Isopreno</i>	<i>Xileno</i>
<i>Etileno</i>	<i>Gas L. P.</i>	

Lenoir y Davenport (1992) presentan la siguiente base de datos de explosiones de nubes de vapor, que resultaron en el mayor número de muertes reportadas:

TABLA 23

<i>Fecha</i>	<i>Localización</i>	<i>Material</i>	<i>Descripción</i>	<i>No. De muertes</i>
03/06/89	Ufa, URSS	Gas Natural	Fuga de Tubería	645
28/07/48	Ludwigshafen, Alemania	Eter dimetilico	Falla de carro de ferrocarril por sobrellenado y calentamiento solar	245
29/07/43	Ludwigshafen, Alemania	Butadieno y Butileno	Falla de carro de ferrocarril por sobrellenado y calentamiento solar	80
11/02/78	Poblado Tres, México	Gas Natural	Fuga de Tubería	40
01/06/74	Fixborough, Inglaterra	Ciclohexano	Falla de Tubería	28
28/06/59	Meldrin, Georgia	Gas L. P.	Perforamiento de carro de ferrocarril por descarrilamiento	23
23/10/89	Pasadera, Texas	Mezcla de Isobutano	Descarga accidental del contenido de un Reactor	23
06/11/90	Bombay, India	Etano y Propano	Fuga de Tubería	21
30/04/75	Tagle Pass, Texas	Gas L. P.	Falla de auto-tanque por volcadura	17

Lenoir y Davenport (1992) presentan la siguiente base de datos de explosiones de nubes de vapor, que resultaron en las mayores pérdidas de propiedad:

TABLA 24

<i>Fecha</i>	<i>Localización</i>	<i>Material</i>	<i>Descripción</i>	<i>Daño en Propiedad (MM dólares)</i>
23/10/89	Pasadera, Texas	Mezcla de Isobutano	Descarga accidental del contenido de un Reactor	730.2
01/06/74	Fixborough, Inglaterra	Ciclohexano	Falla de Tubería	424.5
05/05/88	Norco, Louisiana	Hidrocarburos Ligeros (C3)	Falla de Tubería debido a corrosión interna	330.7
11/03/91	Coatzacoalcos, México	Propano	Falla de Tubería debido a sobrepresionamiento	300
14/11/87	Pampa, Texas	Butano y Acido Acético	Explosión en el proceso dada la oxidación de N-butano	209.8
23/07/84	Romeoville, Illinois	Propano	Falla de soldadura en columna	149.4
03/04/77	Umm Said, Qatar	Propano	Falla de Tanque	140
20/01/68	Pernis, Holanda	Hidrocarburos Ligeros (<C10)	Falla de Tanque	101.3
15/04/78	Abqaiq, Arabia Saudita	Metano (1a. explosion) Gas L.P. (2a. explosion)	Falla de Tubería Falla de Recipiente	90.3
05/12/70	Linden, New Jersey	Hidrocarburos (>C10) e Hidrógeno	Falla de Reactor debida a sobrecalentamiento	87.6

3.5.2. *Modelo para Explosión Física.*

La energía asociada con la ruptura de un contenedor llenado con gas, puede estimarse a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{TNT} = 1.85 \times 10^{-4} V_1 \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma - 1} \right] \quad (\text{Ecuación 109})$$

- W_{TNT} = masa equivalente de TNT (lbm).
 V_1 = volumen del gas comprimido en el estado inicial (ft³).
 P_1 = presión inicial del gas comprimido (psia).
 P_2 = presión final del gas expandido (psia).
 γ = relación de calores específicos (Cp/Cv).
 1.85×10^{-4} = factor de conversión (asumiendo 144 in²/ft², 778 ft-lbf/Btu, y 2000 Btu = 1 lbm de TNT).

3.5.2.1. Procedimiento para aplicar el Modelo de Explosión Física.

- 1) Estimar tanto el volumen (V) como la presión (P_1) del gas comprimido.
- 2) Calcular la masa equivalente (W_{TNT}) de TNT.
- 3) Emplear la curva apropiada de onda de choque (FIGURAS 26 y 27) para estimar sobrepresiones (P_r o P_s) ó impulso (I_s) a distancias de interés.

3.5.2.2. Consideraciones/Limitaciones del Modelo para Explosión Física.

- El gas se comporta como un gas ideal.
- La explosión ocurre a nivel de piso.
- El modelo solo aplica cuando el índice de presurización es bajo, con respecto al tiempo de debilitamiento de las paredes del recipiente.
- La fuente de la explosión puede representarse como un punto.
- La disminución de la sobrepresión con la distancia, se asume similar a aquella asociada con altos explosivos (TNT).
- El modelo proporciona estimados moderados de sobrepresiones.
- No se toma en cuenta para evaluar los efectos sobre terrenos, edificaciones u obstáculos.

3.5.2.3. *Aplicación práctica del Modelo para Explosión Física (Ejemplo).*

Un cilindro de gas presurizado que contiene 1 ft³ de gas nitrógeno, a una temperatura ambiente de 70 °F y una presión de 2000 psia, se rompe catastróficamente. Estimar la energía de choque (equivalente a TNT) asociada con la explosión física resultante y así como también la sobrepresión tope a una distancia de 30 ft, a partir de la explosión física resultante.

Datos de Propiedades del Nitrógeno

- Relación de calores específicos = 1.4.

$$W_{TNT} = 1.85 \times 10^{-4} V_1 \left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma - 1} \right] \quad \text{(Ecuación 109)}$$

$$V_1 = 1 \text{ ft}^3$$

$$P_1 = 2000 \text{ psia}$$

$$P_2 = 14.7 \text{ psia}$$

$$\gamma = 1.4$$

$$W_{TNT} = (1.85 \times 10^{-4})(1) \left[\frac{2000 - 14.7}{1.4 - 1} \right]$$

$W_{TNT} = 0.92 \text{ lbm}$ de TNT = energía de choque asociada con la ruptura del cilindro de gas.

$$Z = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} = \frac{(30)}{(0.92)^{1/3}}$$

$$Z = 31 \text{ ft/lbm}^{1/3}$$

De la FIGURA 30 (página 174):

$P_1 = 1.6 \text{ psi}$ a 30 ft = sobrepresión tope (a la distancia referida) generada por la explosión física dada la ruptura del cilindro de gas.

3.5.3. Modelación para Explosiones de Vapores, en Expansión de Líquidos en Ebullición (Boiling Liquid Expanding Vapors Explosions, BLEVE's).

Una aproximación inicial, para aplicar este modelo, es emplear el modelo de explosión física (**Ecuación 109**), asumiendo que la expansión de los gases, en el espacio de vapor del recipiente, es la causa principal que genera sobrepresiones, sin tomar en cuenta el flasheo del líquido supercalentado.

Una segunda aproximación es la de asumir que el flasheo del líquido supercalentado es la causa principal que genera sobrepresiones:

$$W_{TNT} = 5 \times 10^{-4} n_v R_g T_1 \log_e \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Ecuación 110})$$

- W_{TNT}** = masa equivalente de TNT (lbm).
- n_v** = número de moles que flashean de líquido a vapor (lbmol).
- R_g** = constante universal de los gases = 1.987 Btu/lbmol-°R.
- T₁** = temperatura inicial del líquido supercalentado (°R).
- P₁** = presión inicial del líquido supercalentado (psia).
- P₂** = presión final del vapor expandido (psia).
- 5 x 10⁻⁴** = factor de conversión (1 lbm de TNT = 2000 Btu).

Una tercera aproximación es asumir una expansión adiabática y estimar la masa equivalente de TNT, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$W_{TNT} = \frac{-\Delta U}{H_{CNT}} \quad (\text{Ecuación 111})$$

$$\Delta U = m_{l,f} u_{l,f} + m_{v,f} u_{v,f} - m_{l,i} u_{l,i} - m_{v,i} u_{v,i} \quad (\text{Ecuación 112})$$

$$m_{l,f} = (1 - f) m_{l,i} \quad (\text{Ecuación 113})$$

$$m_{v,f} = fm_{l,i} + m_{v,i} \quad (\text{Ecuación 114})$$

W_{TNT}	=	masa equivalente de TNT (lbm).
ΔU	=	cambio en la energía interna del contenido del recipiente (Btu).
H_{CTNT}	=	calor de combustión del TNT ≈ 2000 (Btu/lbm).
$m_{l,f}$	=	masa de líquido presente después del proceso de flasheo (lbm).
$u_{l,f}$	=	energía interna específica del líquido después del proceso de flasheo (Btu/lbm).
$m_{v,f}$	=	masa de vapor presente después del proceso de flasheo (lbm).
$u_{v,f}$	=	energía interna específica del vapor después del proceso de flasheo (Btu/lbm).
$m_{l,i}$	=	masa de líquido presente antes del proceso de flasheo (lbm).
$u_{l,i}$	=	energía interna específica del líquido antes del proceso de flasheo (Btu/lbm).
$m_{v,i}$	=	masa de vapor presente antes del proceso de flasheo (lbm).
$u_{v,i}$	=	energía interna específica del líquido antes del proceso de flasheo (Btu/lbm).
f	=	fracción de líquido que flashea a vapor (adimensional).

3.5.4. *Modelaciones para Explosiones de Nubes de Vapor.*

3.5.4.1. *Modelo de Equivalencia TNT.*

Este modelo relaciona la cantidad de material inflamable con una cantidad equivalente de TNT, con base en calores relativos de combustión:

$$W_{\text{TNT}} = \frac{\eta M_f H_c}{H_{\text{CTNT}}} \quad (\text{Ecuación 115})$$

W_{TNT}	=	masa equivalente de TNT (lbm).
η	=	factor empírico de rendimiento de explosión (o eficiencia) = de 0.01 a 0.2 (adimensional).
M_f	=	masa de material inflamable (lbm).

$H_c =$ calor neto de combustión del material inflamable (Btu/lbm).

$H_{CTNT} =$ calor de combustión del TNT ≈ 2000 (Btu/lbm).

3.5.4.1.1. Procedimiento para aplicar el Modelo de Equivalencia TNT.

- 1) Estimar la masa de vapor inflamable (M_f).
- 2) Determinar el calor neto de combustión (H_c) para el material inflamable.
- 3) Determinar un valor apropiado para el factor de rendimiento de explosión (η).
- 4) Calcular la masa equivalente de TNT (W_{TNT}).
- 5) Emplear la curva apropiada de onda de choque (explosión superficial ó en el aire) para estimar valores de sobrepresiones (P_r o P_s) o de impulso (I_s) a distancias de interés.

Estimación de la Masa de Vapor Inflamable (M_f)

La masa de vapor inflamable, en la nube, es una función de la tasa de descarga, de la dispersión atmosférica de la nube y así como también del tiempo de ignición. Para ignición inmediata, de la nube de vapor (a unos pocos minutos de haberse iniciado la liberación), la masa inflamable puede considerarse como la cantidad total del vapor liberado antes de la ignición. Para ignición retardada, de la nube de vapor, puede emplearse la siguiente aproximación:

- 1) Efectuar cálculos de dispersión atmosférica y determinar las fronteras de la nube de vapor, correspondientes a los límites inferior y superior de inflamabilidad.
- 2) Estimar el volumen de la nube, dentro de las fronteras de los límites inferior y superior de inflamabilidad.
- 3) Multiplicar el volumen por la densidad promedio del vapor inflamable, dentro de las fronteras de los límites inferior y superior de inflamabilidad, con la finalidad de determinar la masa de vapor inflamable.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

El factor de rendimiento (η) asociado con la masa de vapor inflamable, entre los límites inferior y superior de inflamabilidad, deberá asumirse como = 1.0 (valor conservador).

TABLA 25. FACTORES DE RENDIMIENTO (η) PARA VAPORES Y GASES EXPLOSIVOS:

<i>SUSTANCIAS CON FACTORES DE RENDIMIENTO DE $\eta = 0.03$</i>	
Acetaldehído	3-Metil-1-Buteno
Acetona	Metil-Butil-Cetona
Acilonitrilo	Cloruro de Metilo
Alcohol amílico	Metil-Etil-Cetona
Benceno	Formato de Metilo
1,3-Butadieno	Mercaptano de Metilo
1-Buteno	Metil-Propil-Cetona
Monóxido de Carbono	Monoclorobenceno
Cianógeno	Acetato de N-amilo
1,1-Dicloroetano	Naftaleno
1,2-Dicloroetano	N-Butano
Dimetil éter	Acetato de N-butilo
Sulfuro de Dimetilo	N-Decano
Etano	N-Heptano
Etanol	N-Hexano
Acetato de Etilo	N-Pentano
Etilamina	N-Propanol
Cloruro de Etilo	Acetato de N-Propilo
Formato de Etilo	O-Diclorobenceno
Propionato de Etilo	Éter de Petróleo
Acido Cianhídrico	Propano
Hidrógeno	Propionaldehído
Acido Sulfúrico	Propileno
Alcohol Isobutílico	Bicloruro de Propileno
Isobutileno	P-Xileno
Iso-octano	Estireno
Alcohol Isopropílico	Tetrafluoroetileno
Metalamina	Tolueno
Metano	Acetato de Vinilo
Metanol	Cloruro de Vinilo
Acetato de Metilo	Cloruro de Vinilideno
<i>SUSTANCIAS CON FACTORES DE RENDIMIENTO DE $\eta = 0.06$</i>	
Acroleína	Etileno
Disulfuro de Carbono	Nitrato de Etilo
Ciclohexano	Metil-Vinil-Eter
Eter Di-Etilo	Oxido de Propileno
Eter Di-Vinilo	
<i>SUSTANCIAS CON FACTORES DE RENDIMIENTO DE $\eta = 0.19$</i>	
Acetileno	Nitrato de Isopropilo
Oxido de Etileno	Metil Acetileno
Nitrato de Etilo	Nitrometano
Hidracina	Vinil Acetileno

3.5.4.1.2. Consideraciones/Limitaciones del Modelo de Equivalencia TNT.

- La fuente de la explosión puede representarse como un punto.
- La disminución de la sobrepresión con la distancia, se asume similar a aquella asociada con grandes explosivos (TNT).
- Predice sobrepresiones en lugares cercanos a la fuente de la explosión.
- No predice sobrepresiones en lugares lejanos a la fuente de la explosión.
- No se toma en cuenta para evaluar los efectos sobre terrenos, edificaciones u obstáculos.

3.5.4.1.3. Aplicación Práctica del Modelo de Equivalencia TNT (Ejemplo).

Un tanque de almacenamiento de propano falla resultando en una nube de vapor que se ubica a nivel de piso y que contiene 100,000 lbm de vapor inflamable. La nube de vapor liberada, subsecuentemente se prende resultando en una explosión de nube de vapor. Estimar las sobrepresiones a distancias de 500 ft y 1000 ft a partir de la nube de vapor.

Datos de Propiedades del Propano

- Calor neto de combustión (H_c) = 19,801 Btu/lbm (46,013 kJ/kg).

1.- La energía de choque puede estimarse empleando el método de equivalencia TNT:

$$W_{\text{TNT}} = \frac{\eta M_f H_c}{H_{c_{\text{TNT}}}} \quad (\text{Ecuación 115})$$

$$\eta = 0.03 \quad (\text{TABLA 25, página 185})$$

$$M_f = 100,000 \text{ lbm}$$

$$H_c = 19,801 \text{ Btu/lbm}$$

$$H_{c_{\text{TNT}}} = 2000 \text{ Btu/lbm}$$

$$W_{\text{TNT}} = \frac{(0.03)(100,000)(19,801)}{(2000)}$$

$W_{\text{TNT}} = 29,702 \text{ lbm}$ de TNT= energía de choque asociada con la explosión de la nube de vapor.

2.- Empleando la curva de onda de choque para una explosión superficial (FIGURA 30, página 174), las distancias escaladas (Z) para 29,702 lbm de TNT y distancias (R) de 500 y 1,000 ft:

$$Z = \frac{R}{W_{\text{TNT}}^{1/3}} = \frac{(500)}{(29,702)^{1/3}} = 16.1 \text{ ft/lbm}^{1/3} \quad \text{para } R = 500 \text{ ft}$$

$$Z = \frac{(1000)}{(29,702)^{1/3}} = 32.3 \text{ ft/lbm}^{1/3} \quad \text{para } R = 1,000 \text{ ft}$$

De la FIGURA 30 (página 174), las sobrepresiones resultantes (Ps) son:

$Ps = 4 \text{ psi a } 500 \text{ ft}$

$Ps = 1.5 \text{ psi a } 1,000 \text{ ft}$

3.5.4.2. Modelo de Correlación TNO.

Este modelo se basa en explosiones de nubes de vapor recientes. El modelo estima la distancia para varios tipos de daños a partir de la siguiente ecuación:

$$R(S) = C(S)[\eta E_f]^{1/3} \quad (\text{Ecuación 116})$$

$R(S)$ = radio asociado con un tipo específico de daño S (m).

$C(S)$ = constante empírica, asociada con un tipo específico de daño S ($m/J^{1/3}$).

η = factor de explosión, empírico, (o eficiencia) ≈ 0.1 (adimensional).

E_f = energía total asociada con la parte inflamable de la nube de vapor (J).

TABLA 26

<i>VALOR PARA C(S), (m/J^{1/3})</i>	<i>TIPO DE DAÑO "S"</i>
0.03	Daño serio a edificios y equipo de proceso.
0.06	Daño reparable a edificios, así como a fachadas de hogares.
0.15	Daño a vidrios ó ventanas causando lesión (1 psi).
0.40	10% de daño aproximado a hojas de vidrio (0.3 psi).

3.5.4.2.1. Procedimiento para aplicar el Modelo de Correlación TNO.

- 1) Estimar la masa de vapor inflamable (M_f), entre los límites inferior y superior inflamables.
- 2) Determinar el calor neto de combustión (H_c) para el material inflamable.
- 3) Estimar la energía total (E_f) disponible para la explosión = $M_f \times H_c$.
- 4) Estimar las distancias para varios tipos de daños a partir de la *Ecuación 116*.

3.5.4.2.2. Consideraciones/Limitaciones del Modelo de Correlación TNO.

- La energía total de la explosión (E_f) es $\geq 5 \times 10^9$ J y $\leq 5 \times 10^{12}$ J.
- Aplica para materiales inflamables con un potencial explosivo medio, tales como etano, etileno, propano, propileno, butano e isobutano.
- Proporciona resultados conservadores, para explosiones de nubes de vapor, es decir, sobrevalúa distancias para daños específicos.
- No se toma en cuenta para evaluar los efectos sobre terrenos, edificaciones u obstáculos.

3.5.4.2.3. Aplicación Práctica del Modelo de Correlación TNO (Ejemplo).

Un tanque de almacenamiento de propano falla, resultando en una nube de vapor que se ubica a nivel de piso y que contiene 100,000 lbm de vapor inflamable. La nube de vapor liberada, subsecuentemente se prende, resultando en una explosión de nube de vapor. Estimar la distancia para daño a vidrios, causando lesión.

Datos de Propiedades del Propano

- Calor neto de combustión (H_c) = 19,801 Btu/lbm (46,013 kJ/kg).

1.- El modelo de Correlación TNO puede emplearse para estimar la distancia de interés:

$$R(S) = C(S) [\eta E_f]^{1/3} \quad (\text{Ecuación 116})$$

$$C(S) = 0.15 \text{ m/J}^{1/3} \quad (\text{TABLA 26, página 188})$$

$$\eta = 0.1$$

$$E_f = M_f H_c$$

$$M_f = 100,000 \text{ lbm} = 45,400 \text{ kg}$$

$$H_c = 4.6 \times 10^7 \text{ J/kg}$$

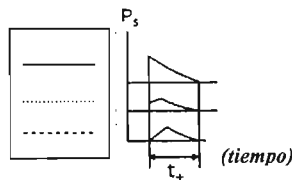
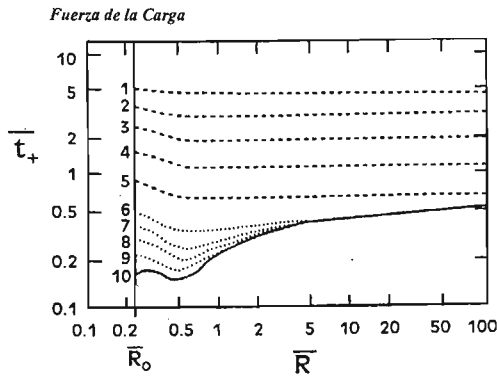
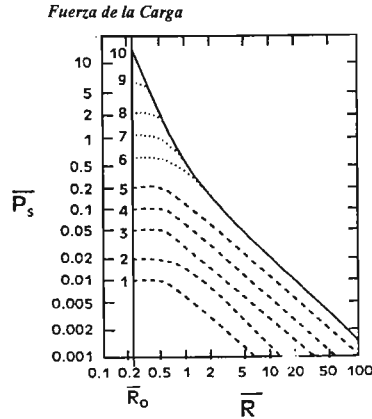
$$E_f = (45,400)(4.6 \times 10^7) = 2.09 \times 10^{12} \text{ J}$$

$$R(S) = (0.15) [(0.1) (2.09 \times 10^{12})]^{1/3}$$

$R(S) = 890 \text{ m} = 2,921 \text{ ft}$ = distancia para daño a vidrios causando lesión por la explosión de la nube de vapor bajo las condiciones establecidas.

3.5.4.3. Modelo de Multienergía TNO.

Este modelo se enfoca en las características del sitio, en vez del tamaño de la liberación. Específicamente, se basa en la premisa de que solo aquellas porciones de la nube de vapor que son obstruidas y/o parcialmente confinadas, pueden experimentar explosión generando combustión.



$$\overline{Ps} = \frac{Ps}{Pa}$$

Ps = sobrepresión tope

Pa = presión atmosférica

$$\overline{t_+} = \frac{t_+ C_0}{(E_{ME} / Pa)^{1/3}}$$

t₊ = duración de la fase positiva C₀ = velocidad atmosférica del sonido

E_{ME} = cantidad de la energía de combustión en la mezcla combustible-aire

$$\overline{R} = \frac{R}{(E_{ME} / Pa)^{1/3}}$$

$$\overline{R_0} = \frac{R_0}{(E_{ME} / Pa)^{1/3}}$$

R₀ = radio de carga de la mezcla combustible - aire

3.5.4.3.1. *Procedimiento para aplicar el Modelo de Multienergía TNO.*

- 1) Con base en la geometría del área de riesgo, calcular el volumen (V) asociado con la región congestionada/confinada de la nube liberada.
- 2) Si el volumen de la nube, capaz de producirse por el material liberado, es menor que V, entonces emplear el volumen menor en lugar de V.
- 3) Estimar el radio de carga (R₀), asumiendo que el volumen V de la nube es hemisférico.
- 4) Calcular la energía almacenada en el volumen hemisférico V de la mezcla gaseosa.
- 5) Calcular la energía de combustión (distancia escalada) para la distancia de interés.
- 6) Estimar la fuerza de la carga (1 a 10) y emplear la curva apropiada para estimar la sobrepresión a distancias de interés. Un valor de 10 para la fuerza de la carga, corresponde a una detonación, mientras que un valor de 6 – 7 corresponde a una fuerte deflagración.

- 7) Ejemplos prácticos respecto a fuentes potenciales de altas sobrepresiones (fuerza de carga alta) en explosiones de nubes de vapor, incluyen:
- Chorros (jets) de alta velocidad liberando combustible a una alta presión (fuga en tubería o en recipiente).
 - Objetos configurados densamente (equipo de proceso, estructuras multi-nivel, racks de tuberías, cajas ó cilindros apilados).
 - Espacios entre grandes planos paralelos (plataformas de concreto, carros estacionados, vagones de ferrocarril).
 - Espacios dentro de estructuras de forma tubular (túneles, puentes, corredores, sistemas de aguas residuales, alcantarillas).

3.5.4.3.2. Consideraciones/Limitaciones del Modelo de Multienergía TNO.

- El método aplica solo para explosiones a nivel de piso (volumen hemisférico).
- Se necesita mucha subjetividad y experiencia para: (1) identificar con mucha precisión las áreas obstruidas y/o parcialmente confinadas para la estimación del volumen V de la nube, y (2) estimar la fuerza de la carga.

FIGURA 33. MÉTODO DE MULTIENERGÍA TNO:

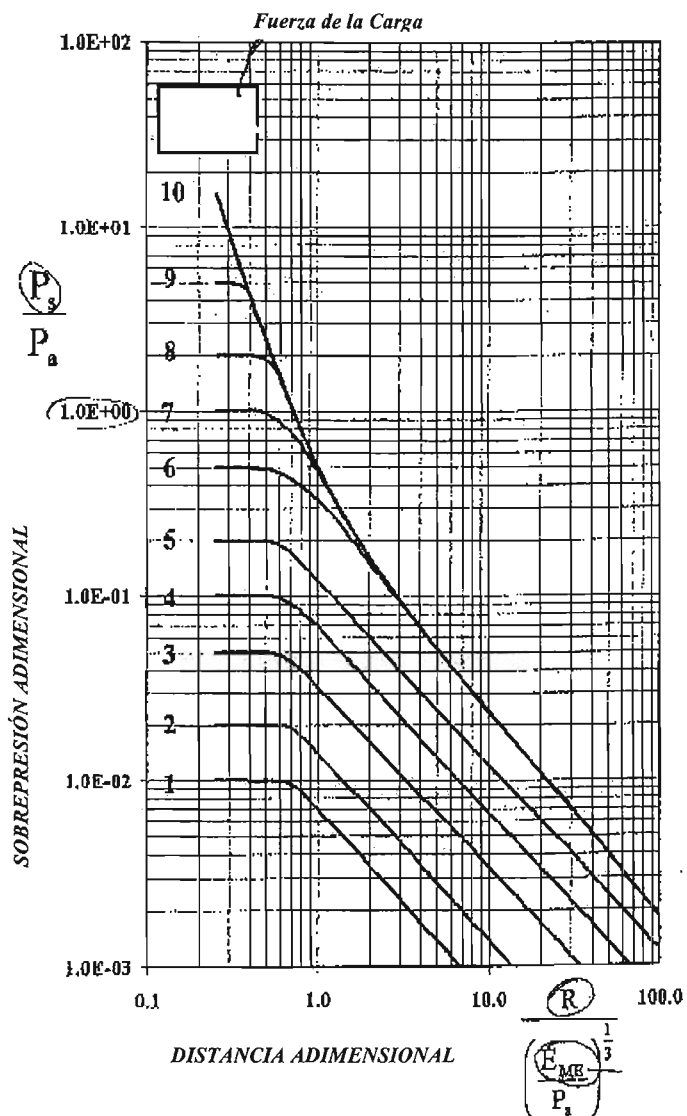
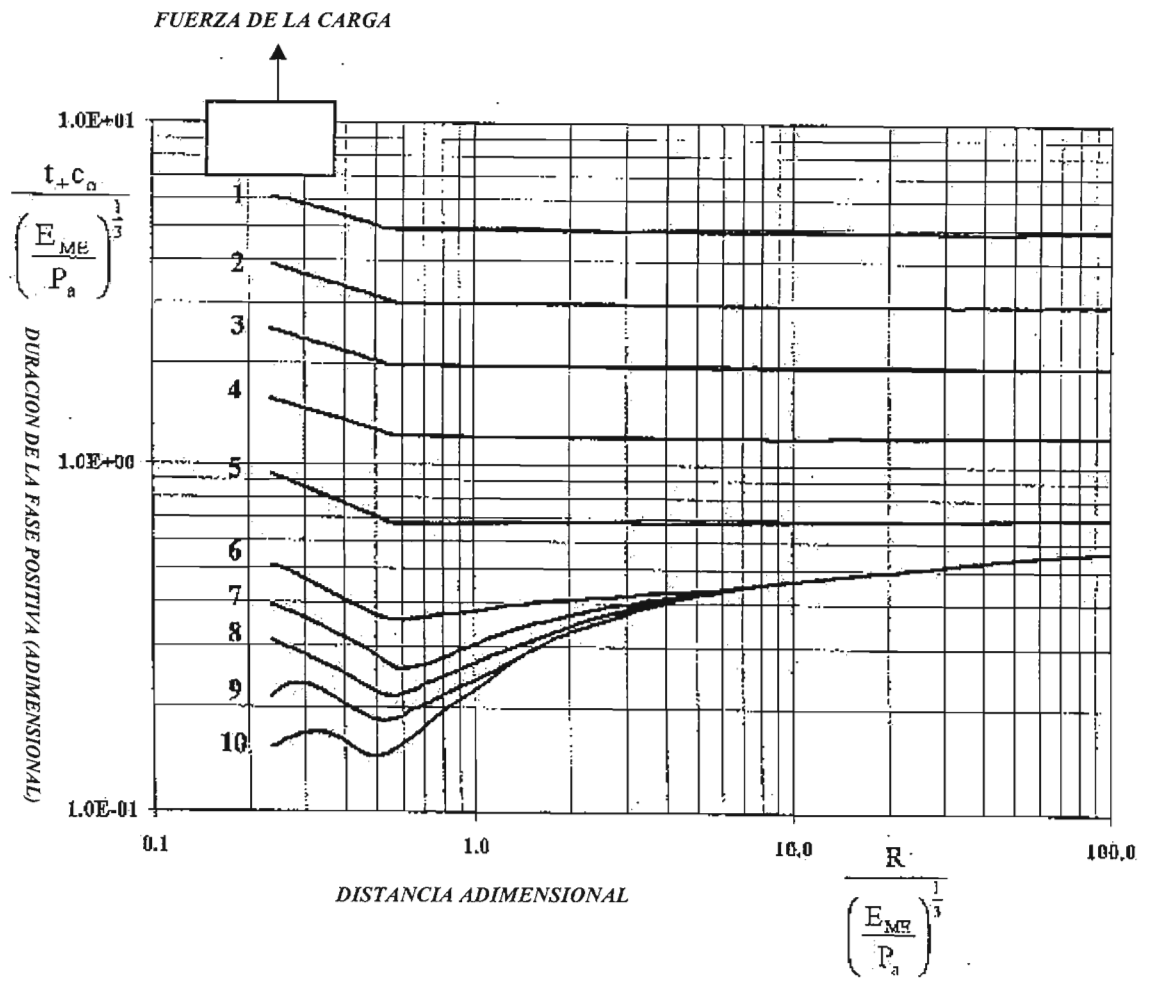
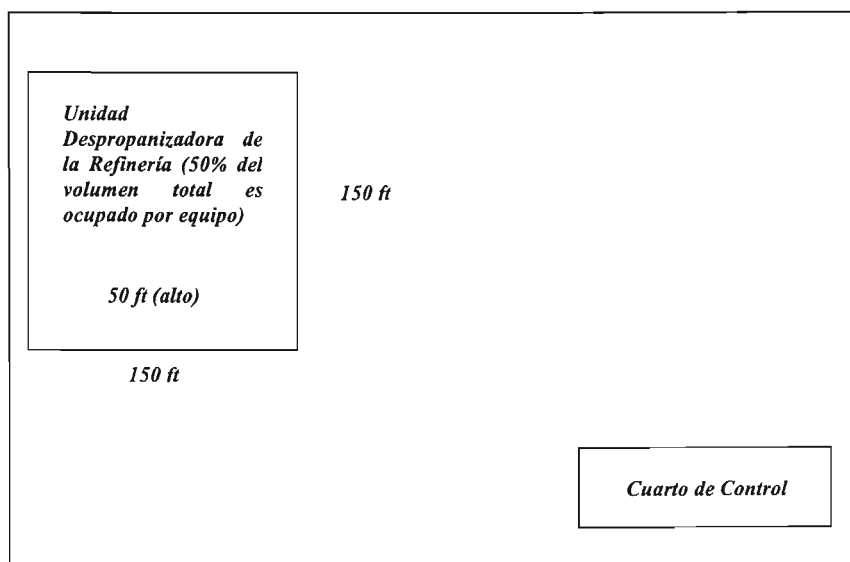


FIGURA 34. MÉTODO DE MULTIENERGÍA TNO:



3.5.4.3.3. Aplicación Práctica del Modelo de Multienergía TNO (Ejemplo).

Una línea de 3" de diámetro interior se rompe, dentro de una Refinería, en la Unidad Despropanizadora, liberando aproximadamente 4,700 lb/min de una mezcla inflamable (propano en su mayoría) por un periodo de más de 30 minutos. Se considera que la Unidad Despropanizadora está conformada por múltiples bloques de recipientes de proceso y racks de tuberías. La temperatura ambiente es de 70 °F. La nube de vapor inflamable se prende, resultando en una explosión de nube de vapor. Estimar la sobrepresión tope y el impulso en la fase positiva sobre el Cuarto de Control localizado a 135 ft de la Unidad Despropanizadora.



Datos de Propiedades del Propano

- Densidad de vapor a 70 °F y 14.7 psia (ρ_v) = 0.114 lbm/ft³ (1.83 kg/m³).
- Calor neto de combustión asociado con una mezcla estequiométrica de hidrocarburo y aire (H_{cmez}) = 91 Btu/ft³ de mezcla combustible – aire (3429 kJ/m³).
- Velocidad del sonido en el aire = 1,130 ft/seg (344 m/seg).

La aproximación recomendada para solucionar este problema es la siguiente:

- 1) Estimar el volumen del vapor inflamable liberado antes de la ignición.
- 2) Comparar con el volumen congestionado dentro de la Unidad Despropanizadora y emplear el volumen menor.
- 3) Estimar el radio equivalente de la mezcla inflamable, asumiendo un volumen hemisférico.
- 4) Estimar la energía total de la mezcla inflamable.
- 5) Calcular la distancia adimensional asociada con el Cuarto de Control.
- 6) Asignar a la explosión una fuerza de carga.
- 7) Estimar la sobrepresión tope adimensional para el Cuarto de Control.
- 8) Estimar la sobrepresión tope.
- 9) Estimar la duración de la fase positiva adimensional para el Cuarto de Control.
- 10) Estimar la duración de la fase positiva para el Cuarto de Control.
- 11) Estimar el impulso en la fase positiva para el Cuarto de Control.

PASO 1

$$V = \frac{\dot{Q}}{\rho} t_d$$

$$\dot{Q} = 4,700 \text{ lbm/min}$$

$$\rho = 0.114 \text{ lbm/ft}^3$$

$$t_d = 30 \text{ min}$$

$$V = \frac{(4,700)}{(0.114)} (30) = 1,240,000 \text{ ft}^3 = \text{volumen del vapor inflamable liberado antes de la ignición}$$

PASO 2

$$\text{Volumen congestionado} = (150 \text{ ft})(150 \text{ ft})(50 \text{ ft})(0.5) = 562,500 \text{ ft}^3$$

$$562,500 \text{ ft}^3 < 1,240,000 \text{ ft}^3$$

$\therefore 562,500 \text{ ft}^3 = \text{valor que deberá emplearse durante el análisis}$

PASO 3

$$V = \frac{2}{3} \pi R_o^3, \quad R_o = \left[\frac{3V}{2\pi} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$R_o = \left[\frac{(3)(562,500)}{2\pi} \right]^{\frac{1}{3}} = 64.5 \text{ ft}$$

PASO 4

$$E_{MR} = (562,500 \text{ ft}^3)(91 \text{ Btu/ft}^3)(778 \text{ ft-lbf/Btu}) = 3.98 \times 10^{10} \text{ ft-lbf}$$

$= \text{energía total de la mezcla inflamable.}$

PASO 5.

$$\bar{R} = \frac{R}{(E_{ME} / Pa)^{1/3}}$$

$$Pa = 14.7 \text{ lbf/in}^2 = 2,117 \text{ lb/ft}^2$$

$$R = 64.5 \text{ ft} + 135 \text{ ft} = 199.5 \text{ ft}$$

$$\bar{R} = \frac{199.5}{\left(\frac{3.98 \times 10^{10}}{2117}\right)^{1/3}} = 0.75 \quad \text{para } R = 199.5 \text{ ft}$$

PASO 6.

Para esta explosión, la reactividad de la mezcla es media (propano), la expansión de la flama es en tercera dimensión, y se asume como alta la densidad del obstáculo, por lo que se asume un valor de 5 para la fuerza de la carga.

PASO 7.

Para un valor de 5, respecto a la fuerza de la carga, la sobrepresión tope adimensional se lee de la **FIGURA 33 (página 194):**

$$\text{Para } \bar{R} = 0.75, \text{ entonces } \bar{P}_s \approx 0.16$$

PASO 8.

$$\bar{P}_s = \frac{P_s}{Pa} \quad \text{ó } P_s = Pa \bar{P}_s \quad Pa = 14.7 \text{ lbf/in}^2$$

$$P_s = (14.7)(0.16) = 2.4 \text{ psi} \quad \text{para } R = 199.5 \text{ ft}$$

PASO 9.

Para un valor de 5, respecto a la fuerza de la carga, la duración de la fase positiva adimensional se lee de la **FIGURA 34 (página 195):**

$$\text{Para } \bar{R} = 0.75, \text{ entonces } \bar{t}_+ \approx 0.67$$

PASO 10

$$\bar{t}_v = \frac{t_v c_o}{\left(\frac{E_{MR}}{P_s}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad t_v = \frac{\bar{t}_v \left(\frac{E_{MR}}{P_s}\right)^{\frac{1}{3}}}{c_o}$$

$c_o = 1,130 \text{ ft/sec}$

$P_s = 2,117 \text{ lbf/ft}^2$

$$t_v = \frac{(0.67) \left(\frac{3.98 \times 10^{10}}{2117}\right)^{\frac{1}{3}}}{1130} = 0.16 \text{ seg}$$

para $R = 199.5 \text{ ft}$

PASO 11

$$I_v = \frac{1}{2} P_s t_v$$

$$I_v = \frac{1}{2} (2.4) (0.16)$$

$I_g = 0.19 \text{ psi-seg} = 190 \text{ psi-mseg}$, para $R = 199.5 \text{ ft}$
 = impulso en la fase positiva para el Cuarto de Control

4

EFFECTOS POR RADIACIONES TÉRMICAS, SOBREPRESIONES Y TOXICIDAD

4.1 *EFFECTOS POR RADIACIONES TÉRMICAS (FUEGOS/INCENDIOS).*

4.1.1. *Fundamentos y Consideraciones.*

Lesiones sobre las Personas por los Efectos de la Radiación Térmica

El grado de las lesiones, sobre las personas, por el efecto de la radiación térmica, depende tanto del flujo de calor incidente como del tiempo de exposición. La Agencia Federal de Administración de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA) de los E. U. A., presenta los siguientes datos para umbrales de dolor y quemaduras de segundo grado:

TABLA 27

<i>Intensidad de la Radiación Térmica</i>		<i>Tiempo para Umbral de Dolor (seg)</i>	<i>Tiempo para Quemaduras de Segundo Grado (seg)</i>
<i>(Btu/h/ft²)</i>	<i>(kW/m²)</i>		
300	1	115	663
600	2	45	187
1000	3	27	92
1300	4	18	57
1600	5	13	40
1900	6	11	30
2500	8	7	20
3200	10	5	14
3800	12	4	11

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

API-521 presenta los siguientes datos, para los efectos que pueden producirse por la exposición a la radiación térmica de llamaradas:

TABLA 28

<i>Intensidad de la Radiación Térmica</i>		<i>Tipo de Daño</i>
<i>(Btu/h/ft²)</i>	<i>(kW/m²)</i>	
500	1.58	Nivel permisible en cualquier lugar y en donde el personal se encuentre expuesto continuamente.
1500	4.73	Nivel permisible en áreas en donde las acciones de emergencia que duran varios minutos, pueden efectuarse por personal sin protección, pero con ropa adecuada.
2000	6.31	Nivel permisible en áreas en donde las acciones de emergencia, que requieran hasta de 1 minuto de atención, pueden efectuarse por personal sin protección, pero con ropa adecuada.
3000	9.46	Nivel permisible en áreas en donde la exposición hacia las personas se limita a unos cuantos segundos, es decir, solo el tiempo suficiente para escapar.

Tsao y Perry (1979), así como TNO (1992), presentan los siguientes modelos PROBIT (PROBability unIT, unidad de probabilidad) para estimar los efectos sobre las personas por la exposición a charcos de fuego y fuegos “flash”:

$$Pr = -39.83 + 3.0186 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras de primer grado} \quad (\text{Ecuación 117})$$

$$Pr = -43.14 + 3.0186 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras de segundo grado} \quad (\text{Ecuación 118})$$

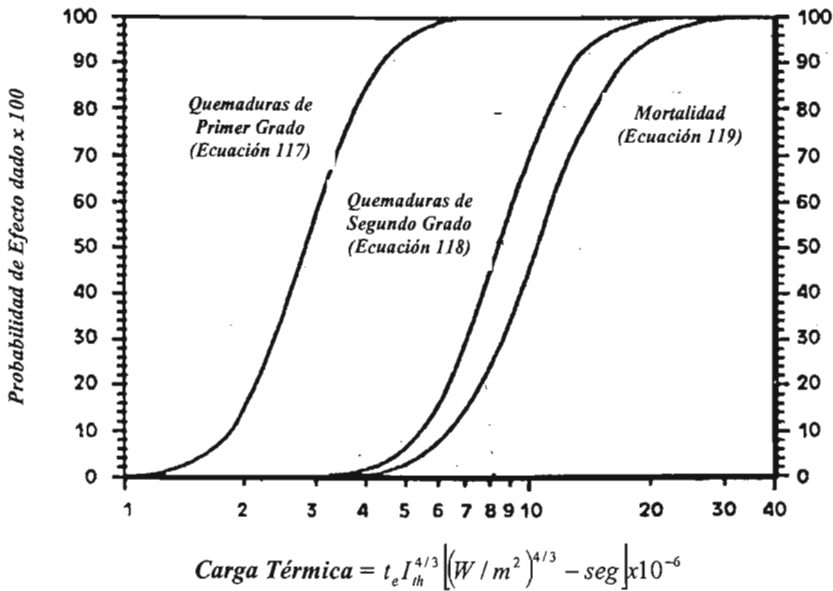
$$Pr = -36.38 + 2.56 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras mortales} \quad (\text{Ecuación 119})$$

t_e = duración de la exposición (seg).

I_{th} = intensidad de la radiación térmica (W/m²).

Pr = valor probit (adimensional).

FIGURA 35



Prugh (1994) presenta los siguientes datos de dosis térmicas para exposiciones a Bolas de Fuego:

TABLA 29

Dosis Térmica $\int I_{th}(t) dt$		Tipo de Lesión
kJ/m^2	Btu/ft	
40	3.5	Umbral de Dolor.
100	8.8	Quemadura de Sol (quemadura de primer grado).
150	13	Ampollas (quemadura de segundo grado).
250	22	1% de muertes (quemadura de tercer grado).
500	44	50% de muertes (quemadura de tercer grado).
1200	106	99% de muertes (quemadura de tercer grado).

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Factores que afectan el grado de lesiones, sobre las personas, por los efectos de la Radiación Térmica:

- Protección proporcionada por cobertizos ó refugios.
- Protección proporcionada por ropa.
- Contribución de la radiación solar a la exposición total (250 – 330 Btu/h-ft²).
- Susceptibilidad de la persona expuesta.

TABLA 30. RELACION ENTRE EDAD, PORCENTAJE DE AREA QUEMADA Y MORTALIDAD:

	EDAD (años)																
	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80
93+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
88-92	.9	.9	.9	.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
83-87	.9	.9	.9	.9	.9	.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
78-82	.8	.8	.8	.8	.9	.9	.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
73-77	.7	.7	.8	.8	.8	.8	.8	.9	.9	1	1	1	1	1	1	1	1
68-72	.6	.6	.7	.7	.7	.8	.8	.8	.9	.9	1	1	1	1	1	1	1
63-67	.5	.5	.6	.6	.6	.7	.7	.8	.8	.9	.9	1	1	1	1	1	1
58-57	.4	.4	.4	.5	.5	.6	.6	.7	.7	.8	.9	.9	1	1	1	1	1
53-57	.3	.3	.3	.4	.4	.5	.5	.6	.7	.7	.8	.9	.9	1	1	1	1
48-52	.2	.2	.3	.3	.3	.3	.4	.5	.6	.6	.7	.8	.9	1	1	1	1
43-47	.2	.2	.3	.3	.3	.3	.4	.5	.6	.6	.7	.8	.9	1	1	1	1
38-42	.1	.1	.1	.1	.2	.2	.2	.3	.3	.4	.5	.6	.8	.9	1	1	1
33-37	.1	.1	.1	.1	.1	.1	.5	.5	.3	.3	.4	.5	.7	.8	.9	1	1
28-32	0	0	0	0	.1	.1	.1	.1	.2	.2	.3	.4	.6	.7	.9	1	1
23-27	0	0	0	0	0	0	.1	.1	.1	.2	.2	.3	.4	.6	.7	.9	1
18-22	0	0	0	0	0	0	0	.1	.1	.1	.1	.2	.3	.4	.6	.8	.9
13-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.1	.1	.2	.3	.5	.6	.7
8-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.1	.1	.2	.3	.5	.5
3-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.1	.2	.3	.4
0-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.1	.1	.2	.2

↓
% de Área Corporal Quemada

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

Daño Estructural y de Equipo por los Efectos de la Radiación Térmica

El efecto de la radiación térmica, sobre equipo u estructuras, depende de si éstos son combustibles o no, y así como también de la naturaleza y duración de la exposición. Los materiales de madera pueden fallar rápidamente, por un proceso de combustión, mientras que las estructuras de acero, bajo cargas normales, pueden fallar rápidamente cuando alcanzan una temperatura de 500 – 600 °C (930 – 1,100 °F). A su vez, las estructuras de concreto resistirán mucho más.

Finalmente, se determina que la incidencia de una flama, sobre una estructura, es más severa que la radiación térmica. Al respecto, el Banco Mundial (1988) presenta los siguientes criterios de daños basados en observaciones de grandes fuegos:

TABLA 31

<i>Intensidad de la Radiación Térmica</i>		<i>Tipo de Daño</i>
<i>(Btu/h/ft²)</i>	<i>(kW/m²)</i>	
11,890	37.5	Suficiente para causar daño a equipo de proceso.
7,930	25.0	Energía mínima requerida para prender madera a tiempos de exposición indefinidos y sin la presencia de una flama.
3,960	12.5	Energía mínima requerida para prender madera sin la presencia de una flama, o para causar el derretimiento de tubería plástica.

TNO (1992) presenta los siguientes criterios de daños:

TABLA 32

<i>Tipo de Daño</i>	<i>* Intensidad de la Radiación Crítica (kW/m²)</i>	
	<i>Nivel de Daño 1 (**)</i>	<i>Nivel de Daño 2 (***)</i>
Acero	100	25
Madera	15	2
Materiales Sintéticos	15	2
Vidrio	4	-

- * *Definida como la intensidad de la radiación que puede causar daño por una exposición de larga duración.*
- ** *Nivel de Daño 1: Superficies de materiales expuestos dentro de un fuego y colapso ó ruptura de elementos estructurales.*
- *** *Nivel de Daño 2: Superficies de materiales expuestos que experimentan una seria decoloración y así como también descapeladas de pintura. Asimismo, elementos estructurales que experimentan una deformación sustancial.*

Una evaluación más precisa respecto a los daños, que pueden producirse en las estructuras ó equipos por los efectos de la radiación térmica, requiere la ejecución de balances de calor para determinar la temperatura superficial resultante, en comparación con temperaturas aceptables para el equipo o estructura.

Análisis PROBIT

El valor probit (Pr) está relacionado a una probabilidad por medio de la siguiente ecuación:

$$Pr\ obabilidad = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{Pr-5} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (Ecuación 120)$$

Pr es una variable aleatoria de distribución Gaussiana, con un valor promedio de 5.0 y una desviación estándar de 1.0. La siguiente tabla proporciona la relación entre Pr y % (probabilidad):

TABLA 33

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82*	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
99**	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.75	7.88	8.09

* Para $Pr = 3.82$, $\% = 12$ (o probabilidad = 0.12).

** Los valores en la última fila son para 99.0 hasta 99.9 %.

4.1.2. *Evaluación de Daños por Radiación Térmica (Ejemplo).*

Estimar el rango de daños fisiológicos y estructurales por los efectos asociados con la exposición a un flujo térmico de $1,500 \text{ W/m}^2$ por 5 minutos.

Los efectos fisiológicos pueden estimarse empleando los siguientes modelos probit:

$$Pr = -39.83 + 3.0186 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras de primer grado} \quad (\text{Ecuación 117})$$

$$Pr = -43.14 + 3.0186 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras de segundo grado} \quad (\text{Ecuación 118})$$

$$Pr = -36.38 + 2.56 \log_e (t_e I_{th}^{4/3}) \quad \text{para quemaduras mortales} \quad (\text{Ecuación 119})$$

$$t_e = 5 \text{ min} = 300 \text{ sec}$$

$$I_{th} = 1500 \text{ W/m}^2$$

$$Pr = -39.83 + (3.0186) \log_e [(300) (1500)^{4/3}]$$

$Pr = 6.82 \Rightarrow 96 - 97\% \text{ de oportunidad para Quemaduras de Primer Grado}$
--

$$Pr = -43.14 + (3.0186) \log_e [(300) (1500)^{4/3}]$$

$Pr = 3.47 \Rightarrow 6.29\% \text{ de oportunidad para Quemaduras de Segundo Grado}$
--

$$Pr = -36.38 + (2.56) \log_e [(300) (1500)^{4/3}]$$

$Pr = 3.18 \Rightarrow 3.46\% \text{ de oportunidad para Quemaduras Mortales}$
--

Con base en los criterios de daño de TNO, 1,500 W/m² no son suficientes para causar un daño significativo a equipo o estructuras, dada la corta duración de la exposición.

4.2. EFECTOS POR SOBREPRESIONES (EXPLOSIONES).

4.2.1. Fundamentos y Consideraciones.

Lees (1980) presenta los siguientes datos, de lesiones para efectos de choque directos (sobrepresión) e indirectos (misiles e impactos sobre el cuerpo):

TABLA 34

<i>SOBREPRESION (psi)</i>	<i>EFECTO FISIOLÓGICO</i>
1	Personal derribado.
1 – 8	Rango para lesiones de ligeras a serias, debidas a laceraciones en la piel, provocadas éstas por vidrios en el aire u otros misiles.
2.4 – 12.2	Rango del 1 – 90% para ruptura de tímpanos entre las personas expuestas.
15.5 - 29	Rango del 1 – 99% para muertes, entre las personas expuestas, debido a la sobrepresión

Eisenberg (1975) presenta los siguientes modelos probit para lesiones de personas por efectos de choque directos, basados en datos de una explosión nuclear:

- Para muertes por hemorragia de pulmón:

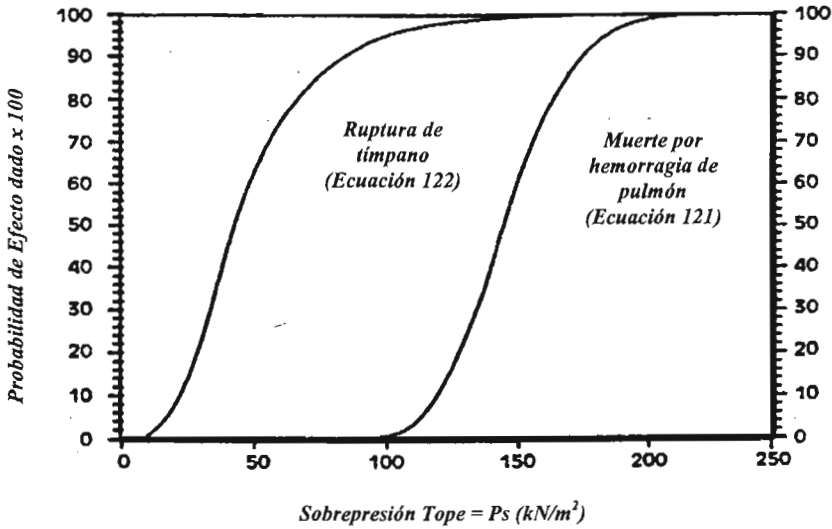
$$Pr = -77.1 + 6.91 \log_e Ps \quad \text{(Ecuación 121)}$$

- Para rupturas de tímpanos:

$$Pr = -15.6 + 1.93 \log_e Ps \quad \text{(Ecuación 122)}$$

Ps = sobrepresión tope (N/m²)

FIGURA 36



TNO (1992) presenta los siguientes modelos probit para lesiones de personas, por efectos de choque directos:

- Para muertes por hemorragia de pulmón:

$$Pr = 5.0 - 5.74 \log_e \left(\frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \right) \quad (\text{Ecuación 123})$$

- Para rupturas de tímpanos:

$$Pr = -12.6 + 1.524 \log_e Ps \quad (\text{Ecuación 124})$$

$$\bar{P} = \frac{P}{Pa} \quad \text{y} \quad \bar{I} = \frac{I_s}{Pa^{1/2} m_b^{1/3}} \quad (\text{Ecuación 125})$$

- P** = presión actual ejercida sobre el cuerpo (dependiente de la posición de la persona, N/m²).
- P_a** = presión atmosférica, 1.013 x 10⁵ (N/m²).
- I_s** = impulso incidente positivo (N-seg/m²).
- m_b** = peso del cuerpo humano (kg).

Eisenberg (1975) presenta los siguientes modelos probit para lesiones de personas por efectos de choque indirectos, basados en datos de una explosión nuclear:

- Para muertes por impacto:

$$Pr = -46.1 + 4.82 \log_e I_s \quad \text{(Ecuación 126)}$$

- Para lesiones por impacto:

$$Pr = -39.1 + 4.45 \log_e I_s \quad \text{(Ecuación 127)}$$

- Para lesiones por fragmentos en el aire:

$$Pr = -27.1 + 4.26 \log_e I_s \quad \text{(Ecuación 128)}$$

- I_s** = impulso (N-seg/m²).

TNO (1992) presenta los siguientes modelos probit, para muertes de personas por efectos de choque indirectos ($P_s < 4 \times 10^5 \text{ N/M}^2$):

- Para impacto en la cabeza:

$$Pr = 5.0 - 8.49 \log_e \left(\frac{2.43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s I_s} \right) \quad \text{(Ecuación 129)}$$

- Para impacto en el cuerpo:

$$\text{Pr} = 5.0 - 2.44 \log_e \left(\frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s I_s} \right) \quad (\text{Ecuación 130})$$

Los modelos presentados anteriormente, son buenos a nivel intelectual, pero a nivel práctico no son muy aceptables.

TNO (1992) presenta los siguientes modelos probit para muertes de personas por fragmentos en el aire, de masa m_{frag} y velocidad v_0 :

$$\text{Pr} = -13.19 + 10.54 \log_e v_0 \quad \text{para } m_{\text{frag}} > 4.5 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 131})$$

$$\text{Pr} = -17.56 + 5.3 \log_e \left(\frac{1}{2} m_{\text{frag}} v_0^2 \right) \quad \text{para } 0.1 < m_{\text{frag}} \leq 4.5 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 132})$$

$$\text{Pr} = -29.15 + 2.1 \log_e (m_{\text{frag}} v_0^{5.115}) \quad \text{para } 0.001 < m_{\text{frag}} \leq 0.1 \text{ kg} \quad (\text{Ecuación 133})$$

Por otra parte, TNO sugiere que los proyectiles, con una energía cinética de 100 J, pueden causar muertes.

Daño Estructural y de Equipo por los Efectos de una Explosión

El daño a equipo ó estructuras se presenta por las fuerzas que se producen por diferentes presiones y que actúan sobre superficies separadas del equipo/estructuras. A la vez, la duración de la sobrepresión es un factor importante para determinar los efectos sobre las estructuras. Si el tiempo de duración de la onda de choque es más corto que el tiempo de respuesta estructural característico, entonces el equipo o las estructuras pueden posiblemente soportar sobrepresiones mayores.

Clancey (1972) presenta los siguientes criterios para daños derivados de explosiones:

TABLA 35

<i>SOBREPRESION (psi)</i>	<i>DAÑO ESPERADO</i>
0.03	Ruptura ocasional de grandes ventanas.
0.04	Fuerte ruido (143 dB); falla de vidrios por estruendo sónico.
0.1	Ruptura de pequeñas ventanas.
0.15	Presión típica para ruptura de vidrios.
0.3	Distancia "segura"; solo 5% de oportunidad para daño serio; algún daño a techos de casas; 10% de probabilidad para ruptura de vidrios.
0.4	Daño estructural menor limitado.
0.5 – 1	Ventanas usualmente destrozadas y algunos daños a marcos de ventanas.
0.7	Daño menor a estructuras de casas.
1	Demolición parcial de casas, volviéndolas inhabitables.
1 – 2	Falla de paneles de metal corrugado y de madera; derribo de paneles.
1.3	Marcos de acero ligeramente distorsionados.
2	Colapso parcial de paredes y techos de casas.
2 – 3	Destrucción de paredes de concreto no reforzado.
2.3	Límite inferior para daño estructural serio.
2.5	50% de oportunidad para destrucción de casas de ladrillo.
3	Marcos de acero distorsionados y arrojados de sus cimientos.
3 – 4	Demolición de paneles de acero; ruptura de tanques de almacenamiento de aceite crudo.
4	Ruptura de fachadas de edificaciones industriales.
5	Resquebrajamiento de pilares de madera.
5 – 7	Destrucción, casi completa, de casas.
7	Volcadura de vagones de ferrocarril, cargados.
7 – 8	Falla de paneles de ladrillo, no reforzado, con un espesor de 8 – 12 pulgadas.
9	Demolición de furgones de ferrocarril, cargados.
10	Probable destrucción total de edificaciones; movimiento de maquinaria pesada (7,000 libras) y seriamente dañada.

Eisenberg (1975) presenta los siguientes modelos probit para daño estructural, con base en datos de una explosión nuclear:

- Para daño estructural:

$$Pr = -23.8 + 2.92 \log_e Ps \quad (\text{Ecuación 134})$$

- Para ruptura de vidrios:

$$Pr = -18.1 + 2.79 \log_e Ps \quad (\text{Ecuación 135})$$

$Ps =$ sobrepresión tope (N/m^2)

TNO (1992) presenta los siguientes modelos probit para daño estructural de estructuras tipo edificio de apartamentos ≤ 4 pisos:

- Para daño menor:

$$Pr = 5.0 - 0.26 \log_e \left[\left(\frac{4600}{Ps} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{Is} \right)^{5.0} \right] \quad (\text{Ecuación 136})$$

- Para daño estructural mayor:

$$Pr = 5.0 - 0.26 \log_e \left[\left(\frac{17500}{Ps} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{Is} \right)^{9.3} \right] \quad (\text{Ecuación 137})$$

- Para colapso:

$$Pr = 5.0 - 0.22 \log_e \left[\left(\frac{40000}{Ps} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{Is} \right)^{11.3} \right] \quad (\text{Ecuación 138})$$

4.2.2. Evaluación de Daños por Sobrepresión (Ejemplo).

Estimar el rango de daños fisiológicos y estructurales por los efectos asociados con una explosión que causa una sobrepresión tope de 7 psi, una presión dinámica de 1 psi y así como también un impulso incidente positivo de 50 psi-mseg. Asumir que el individuo objetivo tiene un peso aproximado de 150 lbm, se encuentra de pie y no está ubicado cerca de alguna superficie vertical.

El daño fisiológico, por los efectos de un choque directo, puede estimarse empleando los siguientes modelos probit:

$$Pr = -77.1 + 6.91 \log_e P_s \quad \text{Para muertes por hemorragia de pulmón} \quad (\text{Ecuación 121})$$

$$Pr = -15.6 + 1.93 \log_e P_s \quad \text{Para rupturas de tímpano} \quad (\text{Ecuación 122})$$

$$P_s = 7 \text{ psi} = 4.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$Pr = -77.1 + (6.91) \log_e (4.8 \times 10^4)$$

$$Pr = -2.62 \quad \Rightarrow \quad \text{Muy improbable de causar muertes por hemorragia de pulmón}$$

$$Pr = -15.6 + (1.93) \log_e (4.8 \times 10^4)$$

$$Pr = 5.20 \quad \Rightarrow \quad 58\% \text{ De oportunidad para ruptura de tímpanos}$$

Los modelos probit de TNO también pueden aplicarse:

$$Pr = 5.0 - 5.74 \log_e \left(\frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \right) \quad \text{Para muertes por hemorragia de pulmón} \quad (\text{Ecuación 123})$$

$$Pr = -12.6 + 1.524 \log_e P_s \quad \text{Para rupturas de tímpano} \quad (\text{Ecuación 124})$$

$$\bar{P} = \frac{P}{P_s} \quad \bar{I} = \frac{I_s}{P_s^{1/2} m_b^{1/3}} \quad (\text{Ecuación 125})$$

$$P = P_s + P_d = 8 \text{ psi} = 5.5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$P_s = 14.7 \text{ psi} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$I_s = 50 \text{ psi} \cdot \text{msec} = 345 \text{ N} \cdot \text{sec/m}^2$$

$$m_b = 150 \text{ lb} = 68 \text{ kg}$$

$$P_s = 7 \text{ psi} = 4.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$\bar{P} = \frac{(5.5 \times 10^4)}{(1.013 \times 10^5)} = 0.54$$

$$\bar{I}_1 = \frac{(345)}{(1.013 \times 10^3)^{0.5} (68)^{1/3}} = 0.27$$

$$Pr = 5.0 - (5.74) \log_e \left[\frac{(4.2)}{(0.54)} + \frac{(1.3)}{(0.27)} \right]$$

$Pr = 9.54 \Rightarrow$ *Muy improbable de causar muertes por hemorragia de pulmón*

$$Pr = -12.6 + (1.524) \log_e (4.8 \times 10^4)$$

$Pr = 3.82 \Rightarrow$ *12% De oportunidad para ruptura de tímpanos*

El daño fisiológico por el efecto de un choque indirecto, puede estimarse empleando los siguientes modelos probit:

$$Pr = -46.1 + 4.82 \log_e I_1 \quad \text{Para muertes por impacto (Ecuación 126)}$$

$$Pr = -39.1 + 4.45 \log_e I_1 \quad \text{Para lesiones por impacto (Ecuación 127)}$$

$$I_1 = 345 \text{ N-sec/m}^2$$

$$Pr = -46.1 + (4.82) \log_e (345)$$

$Pr = -17.9 \Rightarrow$ *Muy improbable de causar muertes por impacto*

$$Pr = -39.1 + (4.45) \log_e (345)$$

$Pr = -13.1 \Rightarrow$ *Muy improbable de causar lesiones por impacto*

El modelo probit de TNO también puede aplicarse:

$$Pr = 5.0 - 8.49 \log_e \left(\frac{2.43 \times 10^3}{P_1} + \frac{4 \times 10^8}{P_1 I_1} \right) \quad \text{Para impacto en la cabeza (Ecuación 129)}$$

$$Pr = 5.0 - 2.44 \log_e \left(\frac{7.38 \times 10^7}{P_1} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_1 I_1} \right) \quad \text{Para impacto en el cuerpo (Ecuación 130)}$$

$$P_s = 4.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$I_s = 345 \text{ N-sec/m}^2$$

$$Pr = 5.0 - (8.49) \log_e \left[\frac{(2.43 \times 10^3)}{(4.8 \times 10^4)} + \frac{(4 \times 10^4)}{(4.8 \times 10^4)(345)} \right]$$

$Pr = -22.1 \Rightarrow$ <i>Muy improbable de causar muertes por impacto en la cabeza</i>

$$Pr = 5.0 - (2.44) \log_e \left[\frac{(7.38 \times 10^3)}{(4.8 \times 10^4)} + \frac{(1.3 \times 10^4)}{(4.8 \times 10^4)(345)} \right]$$

$Pr = -5.65 \Rightarrow$ <i>Muy improbable de causar muertes por impacto en el cuerpo</i>

El daño estructural puede estimarse a partir de los siguientes modelos probit:

$$Pr = -23.8 + 2.92 \log_e P_s \quad \text{Para daño estructural (Ecuación 134)}$$

$$Pr = -18.1 + 2.79 \log_e P_s \quad \text{Para ruptura de vidrios (Ecuación 135)}$$

$$P_s = 4.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$Pr = -23.8 + (2.92) \log_e (4.8 \times 10^4)$$

$Pr = 7.67 \Rightarrow$ <i>99.6% De oportunidad para daño estructural</i>

$$Pr = -18.1 + (2.79) \log_e (4.8 \times 10^4)$$

$Pr = 12 \Rightarrow$ <i>100% De oportunidad para ruptura de vidrios</i>
--

Los modelos probit de TNO también pueden aplicarse:

$$Pr = 5.0 - 0.26 \log_e \left[\left(\frac{4600}{P_s} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{I_s} \right)^{5.0} \right] \quad \text{Para daño menor (Ecuación 136)}$$

$$Pr = 5.0 - 0.26 \log_e \left[\left(\frac{17,500}{P_s} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{I_s} \right)^{9.3} \right] \quad \text{Para daño estructural mayor (Ecuación 137)}$$

$$Pr = 5.0 - 0.22 \log_e \left[\left(\frac{40,000}{P_s} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{I_s} \right)^{11.3} \right] \quad \text{Para colapso (Ecuación 138)}$$

$$P_s = 4.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$I_s = 345 \text{ N-sec/m}^2$$

$$Pr = 5.0 - (0.26) \log_e \left[\left(\frac{4600}{4.8 \times 10^4} \right)^{3.9} + \left(\frac{110}{345} \right)^{5.0} \right]$$

$$Pr = 6.48 \quad \Rightarrow \quad 93\% \text{ De oportunidad para daño menor}$$

$$Pr = 5.0 - (0.26) \log_e \left[\left(\frac{17,500}{4.8 \times 10^4} \right)^{8.4} + \left(\frac{290}{345} \right)^{9.3} \right]$$

$$Pr = 5.42 \quad \Rightarrow \quad 66\% \text{ De oportunidad para daño estructural mayor}$$

$$Pr = 5.0 - (0.22) \log_e \left[\left(\frac{40,000}{4.8 \times 10^4} \right)^{7.4} + \left(\frac{460}{345} \right)^{11.3} \right]$$

$$Pr = 4.28 \quad \Rightarrow \quad 24\% \text{ De oportunidad para colapso}$$

4.3. EFECTOS TÓXICOS.

4.3.1. Fundamentos y Consideraciones.

El grado de lesiones, sobre las personas por la exposición a materiales tóxicos, depende tanto de la concentración como del tiempo de exposición (dosis). Los materiales tóxicos pueden entrar al cuerpo por medio de inhalación, ingestión, absorción ó inyección.

Los materiales tóxicos pueden eliminarse, o volverse inactivos, por medio de los siguientes medios:

- Excreción vía los riñones, hígado, pulmones, piel (transpiración), pelo y uñas.
- Desintoxicación, cambiando el material tóxico en algo menos inocuo, vía biotransformación.
- Almacenamiento en el tejido adiposo.

La exposición a materiales tóxicos, es a menudo clasificada como **aguda ó crónica**. La **exposición aguda** resulta de una exposición simple y de corta duración, o a partir de series de exposiciones que se presentan muy juntas en un corto periodo de tiempo. A la vez, la **exposición crónica**, resulta a partir de múltiples exposiciones que se presentan sobre un largo periodo de tiempo.

Los materiales tóxicos se clasifican con base en sus efectos:

- **Irritantes**, los cuales causan inflamación o quemaduras químicas de ojos, piel, nariz, garganta, pulmones u otros tejidos del cuerpo.
- **Asfixiantes simples**, los cuales desplazan y excluyen el oxígeno que se necesita para mantener el conocimiento y la vida.
- **Asfixiantes químicos**, los cuales evitan que el cuerpo tome el oxígeno que éste necesita.
- **Anestésicos/narcóticos**, los cuales actúan sobre el sistema nervioso central.

- **Sensibilizadores**, los cuales hacen que el cuerpo se vuelva alérgico al material tóxico, después de una exposición inicial, lo cual trae como resultado efectos significativos o peligrosos cuando se expone de nueva cuenta a ese material tóxico.
- **Cancerígenos**, los cuales pueden iniciar o producir cáncer, dentro de algunas partes del cuerpo.
- **Venenos sistémicos**, los cuales causan daño a sistemas específicos en el cuerpo.
- **Mutágenos**, los cuales pueden producir cambios en los materiales genéticos de las células.
- **Materiales teratogénicos**, los cuales pueden tener efectos adversos sobre el esperma, ovarios y/o tejido fetal.

Para estimar el grado de lesiones, sobre las personas, por la exposición a materiales tóxicos, inicialmente debe calcularse la carga tóxica:

$$\text{Carga Tóxica} = \int_0^{t_e} [C(t)]^n dt \quad (\text{Ecuación 139})$$

C(t) = concentración de material tóxico, como una función del tiempo t (ppm).

n = exponente que es una función del material tóxico específico (adimensional).

t_e = tiempo de exposición total (min).

Para exposición, a una concentración constante $C(t) = C$, la carga tóxica está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Carga Tóxica} = C^n t_e \quad (\text{Ecuación 140})$$

Para exposición a una concentración que varía con respecto al tiempo, la carga tóxica puede aproximarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Carga Tóxica} \cong \sum_{i=1}^n C_i^n t_{ei} \quad (\text{Ecuación 141})$$

Para $C_i \neq 0$

C_i = concentración de material tóxico, para un tiempo de exposición t_{ei} (ppm).

T_{ei} = tiempo de exposición, para un intervalo de tiempo i (min).

La ecuación probit es a menudo empleada para relacionar las cargas tóxicas con la probabilidad de causar un efecto, entre una población dada:

$$Pr = A_i + B_i \log_e [c \text{ arg atóxica}] \quad (\text{Ecuación 142})$$

Pr = probit (adimensional).

A_i, B_i = coeficientes asociados con un material tóxico específico (adimensional).

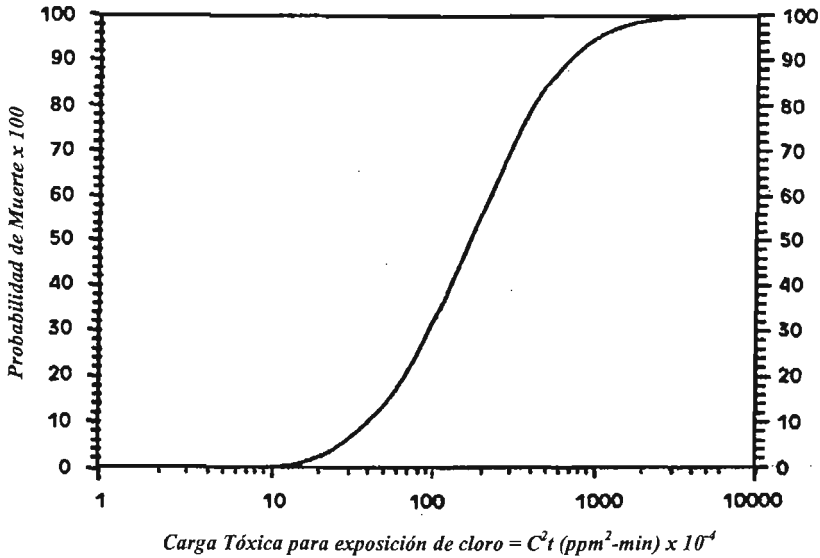
Las unidades para la carga tóxica son: ppmⁿ-min.

TABLA 36. CONSTANTES PARA ECUACIÓN PROBIT DE TOXICIDAD LETAL:

<i>SUSTANCIA</i>	<i>A_i**</i>	<i>B_i**</i>	<i>N**</i>
Acroleína	-9.931	2.049	1
Acrilonitrilo	-29.42	3.008	1.43
Amoniaco	-35.9	1.85	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	2.50
Cloro	-8.29	0.92	2
Formaldehído	-12.24	1.3	2
Acido clorhídrico	-16.85	2.00	1.00
Acido cianhídrico	-29.42	3.008	1.43
Acido fluorhídrico	-25.87	3.354	1.00
Acido sulfhídrico	-31.42	3.008	1.43
Bromuro de metilo	-56.81	5.27	1.00
Isocianato de metilo	-5.642	1.637	0.653
Dióxido de nitrógeno	-13.79	1.4	2
Fosgeno	-19.27	3.686	1
Oxido de propileno	-7.415	0.509	2.00
Dióxido de azufre	-15.67	2.10	1.00
Tolueno	-6.794	0.408	2.50

** *Estas constantes son aplicables solo cuando la concentración está en ppm y el tiempo de exposición en minutos.*

FIGURA 37. EFECTOS TÓXICOS POR EXPOSICIONES DE CLORO:



4.3.2. Evaluación de Daños por Toxicidad (Ejemplo).

Estimar la probabilidad de muerte por la exposición a 100 ppm de gas cloro por 30 minutos.

La probabilidad de muerte, por la exposición al gas cloro, puede estimarse empleando un modelo probit:

$$Pr = A_i + B_i \log_e [c \text{ arg atóxica}] \quad (\text{Ecuación 142})$$

$$Carga\ Tóxica = C^n t_e$$

- $C = 100\ ppm$
- $t_e = 30\ min$
- $n = 2 \quad (\text{TABLA 36, página 222})$
- $A_i = -8.29 \quad (\text{TABLA 36, página 222})$
- $B_i = 0.92 \quad (\text{TABLA 36, página 222})$

$$Pr = -8.29 + (0.92) \log_e [(100)^2 (30)]$$

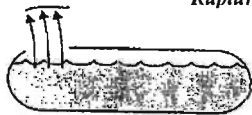
$Pr = 3.31$ \Rightarrow <i>4 - 5% de oportunidad para muertes</i>

APÉNDICE “A”

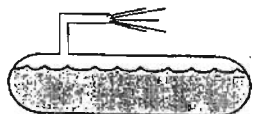
FALLAS DE COMPONENTES, Y ACCIDENTES COMUNES PARA ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

FALLAS COMUNES EN EQUIPOS, LÍNEAS Y DISPOSITIVOS DE PROCESO

Ruptura de Recipiente



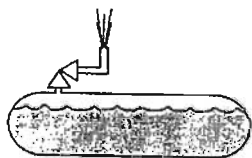
Ruptura de Línea de Líquido



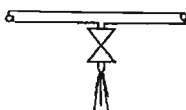
Ruptura de Línea de Vapor



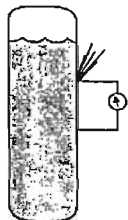
Fuga en Tubería



Descarga de Válvula de Relevo



Fuga en Válvula de Dren

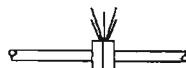
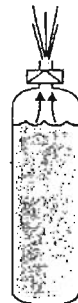


Fuga en Recipiente

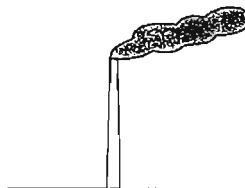


Fuga en Manguera Flexible

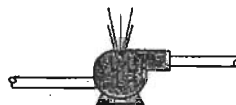
Liberación por Disco de Ruptura



Fuga en Brida

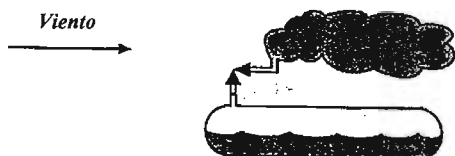


Liberación de Chimenea

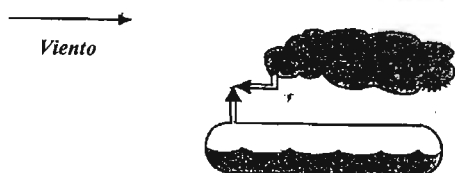


Fuga en Sello de Bomba

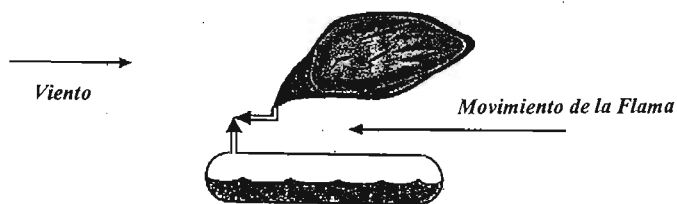
IGNICION RETARDADA DE FUGA DE MATERIAL INFLAMABLE, RESULTANDO EN UN FUEGO FLASH (FLASH FIRE) Y EN UN FUEGO DE CHORRO (JET FIRE)



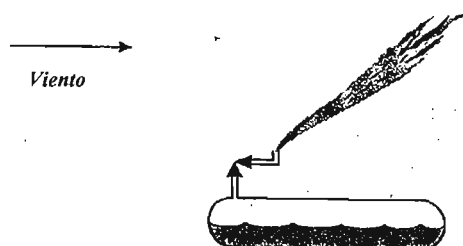
(a) Liberación inicial del material inflamable, a partir del Recipiente



(b) Ignición retardada de la Nube de Vapor inflamable

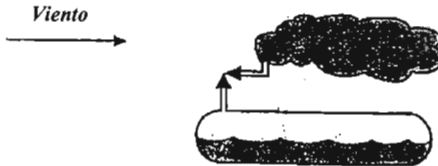


(c) Breve Fuego Flash (Flash Fire)



(d) Fuego de Chorro (Jet Fire)

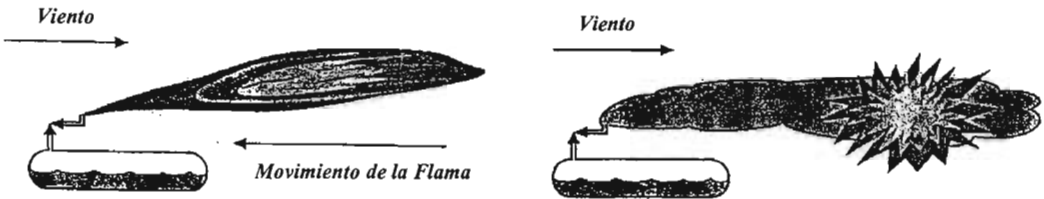
IGNICION RETARDADA DE FUGA DE MATERIAL INFLAMABLE, RESULTANDO EN UN FLASH FIRE Y/O EN UNA EXPLOSION DE NUBE DE VAPOR Y JET FIRE



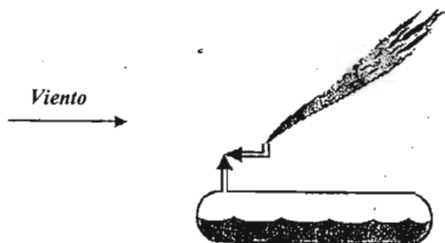
(a) Liberación inicial del material inflamable, a partir del Recipiente



(b) Ignición retardada de la Nube de Vapor inflamable

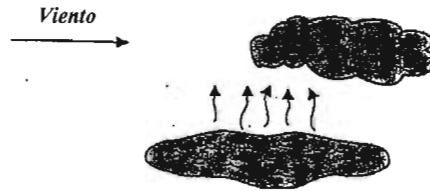


(c) Fuego flash (flash fire) y/o Explosión de Nube de Vapor

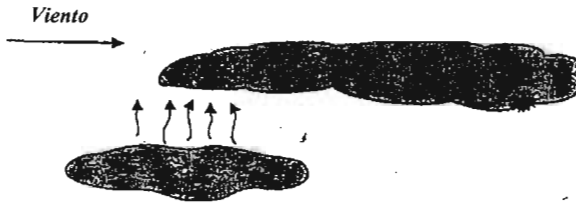


(d) Fuego de Chorro (Jet Fire)

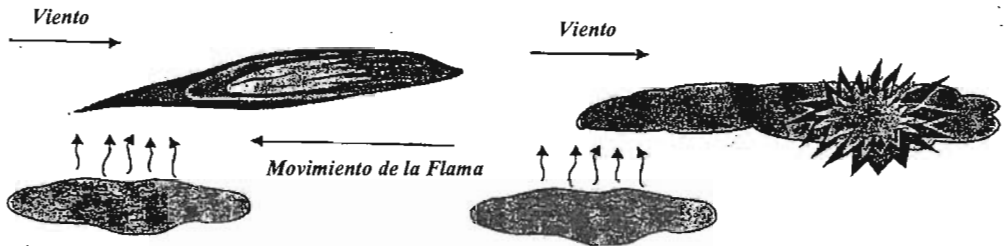
IGNICIÓN RETARDADA DE FUGA DE MATERIAL INFLAMABLE, RESULTANDO EN UN FLASH FIRE Y/O EN UNA EXPLOSIÓN DE NUBE DE VAPOR Y CHARCO DE FUEGO (POOL FIRE)



(a) Charco de Líquido en Evaporación



(b) Ignición retardada de la Nube de Vapor inflamable



(c) Fuego flash (flash fire) y/o Explosión de Nube de Vapor

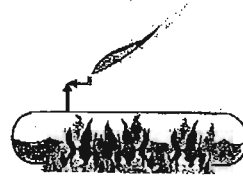


(d) Charco de Fuego (Pool Fire)

**FALLA DE RECIPIENTE RESULTANDO EN UN BLEVE Y EN UNA BOLA DE FUEGO
(FIREBALL)**



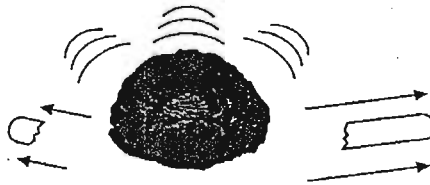
(a) Recipiente envuelto en llamas



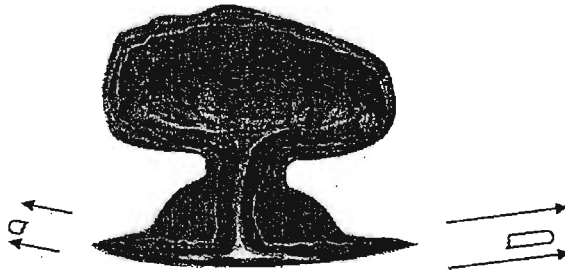
(b) Apertura de Válvula de Relevo con ignición inmediata, resultando en un Fuego de Chorro (Jet Fire)



(c) Falla subsiguiente del Recipiente

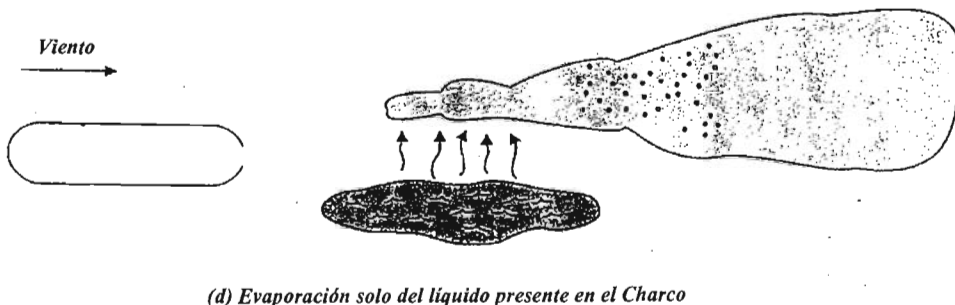
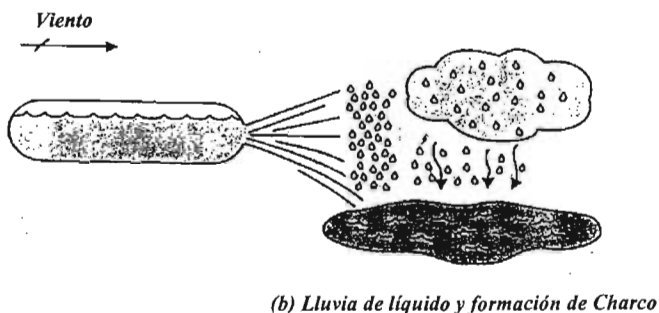
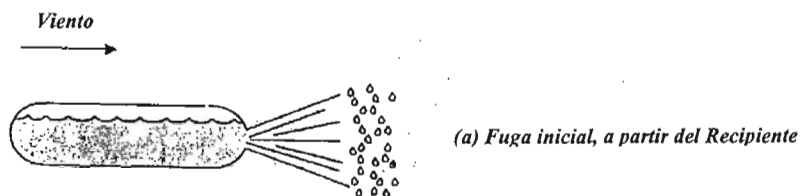


(d) Expansión rápida del material supercalentado, resultando en un BLEVE



(e) Ignición subsiguiente, resultando en una Bola de Fuego (Fireball)

EJEMPLO DE UN ESCENARIO DE FUGA ACCIDENTAL (LIQUIDO PRESURIZADO)



APÉNDICE “B”

TABLAS PARA ESTIMAR EL FACTOR DE VISTA GEOMÉTRICO MÁXIMO (F) PARA FLAMAS CILÍNDRICAS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = 0^\circ$)</i>											
1.1	0.35613	0.48125	0.55942	0.57594	0.58038	0.58120	0.58161	0.58168	0.58179	0.58183	0.58184	0.58184
1.2	0.20130	0.33119	0.46603	0.50572	0.51752	0.51974	0.52086	0.52105	0.52132	0.52144	0.52146	0.52147
1.3	0.13204	0.23674	0.38792	0.44813	0.46836	0.47229	0.47428	0.47462	0.47510	0.47530	0.47534	0.47535
1.4	0.09492	0.17729	0.32370	0.39866	0.42739	0.43323	0.43621	0.43671	0.43743	0.43772	0.43778	0.43780
1.5	0.07231	0.13806	0.27179	0.35555	0.39220	0.40006	0.40410	0.40478	0.40575	0.40615	0.40622	0.40625
2.0	0.02851	0.05627	0.12945	0.20819	0.26770	0.28508	0.29495	0.29667	0.29914	0.30015	0.30032	0.30039
3.0	0.00988	0.01969	0.04805	0.08890	0.14141	0.16674	0.18585	0.18970	0.19551	0.19794	0.19837	0.19851
4.0	0.00503	0.01004	0.02483	0.04779	0.08394	0.10700	0.12938	0.13471	0.14347	0.14740	0.14811	0.14835
5.0	0.00305	0.00610	0.01514	0.02960	0.05457	0.07314	0.09481	0.10080	0.11166	0.11703	0.11803	0.11836
10.0	0.00069	0.00138	0.00346	0.00688	0.01351	0.01967	0.03010	0.03432	0.04559	0.05506	0.05740	0.05825
20.0	0.00017	0.00033	0.00083	0.00166	0.00330	0.00491	0.00800	0.00946	0.01456	0.02236	0.02577	0.02734
50.0	0.00003	0.00005	0.00013	0.00026	0.00052	0.00077	0.00129	0.00154	0.00253	0.00476	0.00655	0.00788
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00013	0.00019	0.00032	0.00038	0.00064	0.00126	0.00184	0.00237
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00008	0.00010	0.00016	0.00032	0.00047	0.00063

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = +10^\circ$)</i>											
1.1	0.39631	0.54206	0.62592	0.64213	0.64626	0.64700	0.64737	0.64744	0.64753	0.64757	0.64757	0.64757
1.2	0.21619	0.37085	0.52905	0.57136	0.58292	0.58498	0.58600	0.58617	0.58641	0.58651	0.58653	0.58654
1.3	0.13861	0.26015	0.44286	0.51113	0.53193	0.53570	0.53753	0.53783	0.53826	0.53844	0.53847	0.53848
1.4	0.09830	0.19149	0.36906	0.45773	0.48857	0.49432	0.49712	0.49757	0.49822	0.49847	0.49852	0.49854
1.5	0.07423	0.14712	0.30815	0.40989	0.45071	0.45866	0.46253	0.46316	0.46404	0.46439	0.46445	0.46448
2.0	0.02871	0.05795	0.14113	0.23851	0.31201	0.33177	0.34213	0.34383	0.34617	0.34707	0.34723	0.34728
3.0	0.00985	0.01986	0.05019	0.09754	0.16335	0.19535	0.21810	0.22236	0.22841	0.23073	0.23111	0.23124
4.0	0.00499	0.01005	0.02547	0.05093	0.09459	0.12400	0.15220	0.15858	0.16844	0.17241	0.17307	0.17328
5.0	0.00302	0.00608	0.01538	0.03100	0.06013	0.08333	0.11108	0.11859	0.13150	0.13720	0.13816	0.13847
10.0	0.00068	0.00137	0.00345	0.00697	0.01407	0.02103	0.03356	0.03885	0.05331	0.06497	0.06755	0.06842
20.0	0.00016	0.00033	0.00082	0.00165	0.00334	0.00504	0.00842	0.01008	0.01618	0.02611	0.03041	0.03228
50.0	0.00003	0.00005	0.00013	0.00026	0.00051	0.00078	0.00130	0.00157	0.00263	0.00518	0.00737	0.00907
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00013	0.00019	0.00032	0.00038	0.00065	0.00130	0.00195	0.00257
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00008	0.00010	0.00016	0.00032	0.00049	0.00065

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = +20^\circ$)</i>											
1.1	0.43651	0.60529	0.69240	0.70758	0.71123	0.71187	0.71218	0.71223	0.71231	0.71234	0.71235	0.71235
1.2	0.22713	0.41131	0.59568	0.63923	0.65004	0.65186	0.65273	0.65287	0.65308	0.65316	0.65317	0.65318
1.3	0.14159	0.28129	0.50264	0.57852	0.59907	0.60249	0.60409	0.60435	0.60471	0.60486	0.60488	0.60489
1.4	0.09885	0.20244	0.41844	0.52258	0.55463	0.56004	0.56252	0.56292	0.56346	0.56368	0.56372	0.56373
1.5	0.07392	0.15293	0.34685	0.47066	0.51505	0.52276	0.52628	0.52683	0.52759	0.52788	0.52793	0.52795
2.0	0.02802	0.05790	0.15082	0.27206	0.36350	0.38557	0.39604	0.39763	0.39974	0.40050	0.40063	0.40068
3.0	0.00951	0.01941	0.05094	0.10502	0.18839	0.22946	0.25644	0.26103	0.26710	0.26920	0.26952	0.26963
4.0	0.00480	0.00975	0.02534	0.05291	0.10548	0.14364	0.17975	0.18737	0.19823	0.20207	0.20265	0.20283
5.0	0.00290	0.00587	0.01515	0.03155	0.06509	0.09430	0.13058	0.14013	0.15541	0.16126	0.16213	0.16240
10.0	0.00065	0.00132	0.00334	0.00685	0.01424	0.02193	0.03689	0.04358	0.06252	0.07702	0.07979	0.08065
20.0	0.00016	0.00031	0.00079	0.00160	0.00327	0.00501	0.00863	0.01047	0.01770	0.03057	0.03607	0.03830
50.0	0.00002	0.00005	0.00012	0.00025	0.00050	0.00075	0.00128	0.00154	0.00265	0.00552	0.00821	0.01042
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00012	0.00018	0.00031	0.00037	0.00063	0.00131	0.00202	0.00274
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00008	0.00009	0.00015	0.00031	0.00048	0.00065

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = +30^\circ$)</i>											
1.1	0.47665	0.67107	0.75778	0.77118	0.77423	0.77474	0.77499	0.77504	0.77510	0.77512	0.77513	0.77513
1.2	0.23258	0.45256	0.66583	0.70863	0.71817	0.71968	0.72039	0.72050	0.72066	0.72073	0.72074	0.72074
1.3	0.14009	0.29876	0.56829	0.65033	0.66959	0.67252	0.67384	0.67405	0.67433	0.67444	0.67446	0.67447
1.4	0.09607	0.20867	0.47296	0.59405	0.62596	0.63074	0.63282	0.63314	0.63358	0.63374	0.63377	0.63378
1.5	0.07109	0.15437	0.38832	0.53940	0.58612	0.59320	0.59621	0.59666	0.59726	0.59749	0.59753	0.59754
2.0	0.02639	0.05586	0.15735	0.30978	0.42479	0.44880	0.45888	0.46028	0.46206	0.46267	0.46277	0.46280
3.0	0.00886	0.01831	0.04999	0.11056	0.21776	0.27173	0.30355	0.30831	0.31410	0.31588	0.31614	0.31622
4.0	0.00446	0.00913	0.02434	0.05330	0.11631	0.16709	0.21442	0.22348	0.23511	0.23862	0.23909	0.23923
5.0	0.00269	0.00547	0.01439	0.03106	0.06897	0.10614	0.15500	0.16739	0.18539	0.19113	0.19187	0.19209
10.0	0.00060	0.00122	0.00312	0.00649	0.01393	0.02219	0.03987	0.04845	0.07402	0.09230	0.09517	0.09597
20.0	0.00014	0.00029	0.00073	0.00149	0.00310	0.00481	0.00855	0.01055	0.01901	0.03609	0.04333	0.04596
50.0	0.00002	0.00004	0.00011	0.00023	0.00046	0.00070	0.00121	0.00147	0.00258	0.00573	0.00904	0.01197
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00011	0.00017	0.00029	0.00035	0.00060	0.00128	0.00203	0.00284
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003	0.00004	0.00007	0.00008	0.00014	0.00030	0.00046	0.00064

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = +40^\circ$)</i>											
1.1	0.51661	0.73919	0.82042	0.83140	0.83375	0.83414	0.83433	0.83436	0.83440	0.83442	0.83443	0.83443
1.2	0.23031	0.49455	0.73874	0.77814	0.78595	0.78711	0.78764	0.78772	0.78784	0.78789	0.78790	0.78790
1.3	0.13309	0.31016	0.64090	0.72579	0.74261	0.74494	0.74594	0.74609	0.74630	0.74638	0.74640	0.74640
1.4	0.08951	0.20808	0.53421	0.67244	0.70229	0.70621	0.70783	0.70806	0.70838	0.70850	0.70852	0.70853
1.5	0.06551	0.14998	0.43297	0.61759	0.66436	0.67039	0.67278	0.67312	0.67356	0.67373	0.67375	0.67376
2.0	0.02382	0.05164	0.15900	0.35294	0.49939	0.52444	0.53350	0.53464	0.53602	0.53647	0.53654	0.53656
3.0	0.00792	0.01654	0.04702	0.11288	0.25338	0.32657	0.36365	0.36833	0.37347	0.37486	0.37505	0.37510
4.0	0.00397	0.00819	0.02239	0.05160	0.12634	0.19625	0.26032	0.27095	0.28287	0.28584	0.28619	0.28629
5.0	0.00239	0.00489	0.01311	0.02930	0.07098	0.11873	0.18742	0.20391	0.22486	0.23015	0.23073	0.23089
10.0	0.00054	0.00108	0.00280	0.00589	0.01306	0.02158	0.04212	0.05323	0.08925	0.11278	0.11559	0.11628
20.0	0.00013	0.00026	0.00065	0.00134	0.00281	0.00443	0.00813	0.01022	0.01992	0.04337	0.05322	0.05629
50.0	0.00002	0.00004	0.00010	0.00020	0.00041	0.00063	0.00109	0.00134	0.00241	0.00574	0.00979	0.01381
100.0	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00010	0.00015	0.00026	0.00031	0.00054	0.00119	0.00196	0.00284
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002	0.00004	0.00006	0.00008	0.00013	0.00027	0.00042	0.00059

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

e/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = +50^\circ$)</i>											
1.1	0.55624	0.80868	0.87807	0.88618	0.88782	0.88809	0.88821	0.88823	0.88826	0.88828	0.88828	0.88828
1.2	0.21732	0.53714	0.81238	0.84525	0.85101	0.85182	0.85217	0.85223	0.85231	0.85234	0.85234	0.85235
1.3	0.11962	0.31130	0.72117	0.80269	0.81597	0.81763	0.81832	0.81842	0.81856	0.81861	0.81862	0.81862
1.4	0.07882	0.19771	0.60453	0.75663	0.78202	0.78492	0.78604	0.78620	0.78642	0.78649	0.78651	0.78651
1.5	0.05705	0.13810	0.48117	0.70582	0.74894	0.75357	0.75527	0.75550	0.75580	0.75590	0.75592	0.75593
2.0	0.02035	0.04511	0.15318	0.40319	0.59152	0.61579	0.62316	0.62399	0.62495	0.62524	0.62529	0.62530
3.0	0.00670	0.01415	0.04179	0.11002	0.29829	0.40163	0.44353	0.44773	0.45184	0.45281	0.45293	0.45297
4.0	0.00335	0.00696	0.01947	0.04724	0.13382	0.23443	0.32496	0.33701	0.34833	0.35059	0.35082	0.35089
5.0	0.00202	0.00415	0.01128	0.02612	0.06983	0.13136	0.23384	0.25649	0.28018	0.28460	0.28500	0.28511
10.0	0.00045	0.00091	0.00237	0.00506	0.01156	0.01986	0.04287	0.05728	0.11117	0.14229	0.14481	0.14534
20.0	0.00011	0.00022	0.00055	0.00113	0.00241	0.00385	0.00730	0.00935	0.02005	0.05375	0.06784	0.07128
50.0	0.00002	0.00003	0.00008	0.00017	0.00035	0.00054	0.00094	0.00115	0.00212	0.00547	0.01032	0.01602
100.0	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004	0.00008	0.00013	0.00022	0.00027	0.00046	0.00105	0.00179	0.00270
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00006	0.00011	0.00023	0.00037	0.00052

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = -10^\circ$)</i>											
1.1	0.31605	0.42263	0.49355	0.50972	0.51427	0.51514	0.51558	0.51566	0.51577	0.51582	0.51583	0.51583
1.2	0.18357	0.29231	0.40634	0.44253	0.45409	0.45637	0.45755	0.45776	0.45805	0.45818	0.45820	0.45821
1.3	0.12264	0.21195	0.33690	0.38913	0.40814	0.41208	0.41414	0.41449	0.41501	0.41523	0.41527	0.41528
1.4	0.08918	0.16085	0.28151	0.34443	0.37049	0.37619	0.37921	0.37974	0.38050	0.38082	0.38088	0.38090
1.5	0.06847	0.12661	0.23740	0.30630	0.33857	0.34604	0.35008	0.35079	0.35181	0.35225	0.35232	0.35235
2.0	0.02747	0.05312	0.11650	0.18034	0.22871	0.24375	0.25288	0.25455	0.25704	0.25810	0.25829	0.25836
3.0	0.00962	0.01894	0.04479	0.07959	0.12174	0.14198	0.15796	0.16136	0.16676	0.16918	0.16964	0.16979
4.0	0.00491	0.00973	0.02352	0.04380	0.07361	0.09189	0.10981	0.11424	0.12190	0.12565	0.12637	0.12662
5.0	0.00299	0.00593	0.01447	0.02754	0.04869	0.06362	0.08076	0.08557	0.09466	0.09958	0.10056	0.10091
10.0	0.00068	0.00136	0.00336	0.00659	0.01262	0.01798	0.02662	0.02999	0.03889	0.04661	0.04869	0.04948
20.0	0.00016	0.00033	0.00081	0.00161	0.00316	0.00465	0.00740	0.00866	0.01291	0.01910	0.02183	0.02314
50.0	0.00003	0.00005	0.00013	0.00025	0.00050	0.00075	0.00123	0.00147	0.00237	0.00429	0.00574	0.00680
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00013	0.00019	0.00031	0.00037	0.00061	0.00118	0.00169	0.00213
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00008	0.00009	0.00016	0.00031	0.00045	0.00059

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = -20^\circ$)</i>											
1.1	0.27610	0.36591	0.42865	0.44390	0.44838	0.44925	0.44970	0.44978	0.44990	0.44995	0.44995	0.44996
1.2	0.16376	0.25415	0.34960	0.38174	0.39264	0.39489	0.39608	0.39628	0.39659	0.39671	0.39674	0.39675
1.3	0.11104	0.18630	0.28904	0.33361	0.35092	0.35470	0.35674	0.35710	0.35763	0.35786	0.35790	0.35791
1.4	0.08153	0.14285	0.24181	0.29415	0.31720	0.32255	0.32550	0.32602	0.32680	0.32713	0.32719	0.32721
1.5	0.06301	0.11341	0.20463	0.26104	0.28892	0.29580	0.29967	0.30037	0.30140	0.30185	0.30193	0.30196
2.0	0.02567	0.04876	0.10276	0.15444	0.19369	0.20649	0.21469	0.21627	0.21867	0.21973	0.21993	0.22000
3.0	0.00907	0.01769	0.04067	0.06991	0.10375	0.11997	0.13323	0.13618	0.14105	0.14337	0.14382	0.14399
4.0	0.00465	0.00915	0.02165	0.03920	0.06363	0.07818	0.09256	0.09622	0.10280	0.10625	0.10695	0.10721
5.0	0.00283	0.00559	0.01342	0.02495	0.04265	0.05465	0.06827	0.07214	0.07970	0.08407	0.08502	0.08536
10.0	0.00065	0.00129	0.00316	0.00613	0.01148	0.01605	0.02315	0.02586	0.03292	0.03920	0.04101	0.04173
20.0	0.00016	0.00031	0.00077	0.00152	0.00294	0.00428	0.00668	0.00775	0.01125	0.01618	0.01837	0.01945
50.0	0.00002	0.00005	0.00012	0.00024	0.00048	0.00071	0.00115	0.00136	0.00216	0.00379	0.00497	0.00581
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00012	0.00018	0.00029	0.00035	0.00057	0.00107	0.00151	0.00188
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003	0.00004	0.00007	0.00009	0.00015	0.00028	0.00041	0.00054

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = -30^\circ$)</i>												
1.1	0.23630	0.31080	0.36486	0.37870	0.38292	0.38376	0.38421	0.38428	0.38440	0.38444	0.38445	0.38446
1.2	0.14245	0.21663	0.29535	0.32311	0.33302	0.33514	0.33628	0.33648	0.33678	0.33691	0.33693	0.33694
1.3	0.09774	0.16014	0.24370	0.28100	0.29628	0.29977	0.30170	0.30205	0.30256	0.30278	0.30282	0.30284
1.4	0.07234	0.12379	0.20410	0.24705	0.26690	0.27175	0.27450	0.27500	0.27575	0.27607	0.27613	0.27615
1.5	0.05622	0.09895	0.17319	0.21892	0.24248	0.24860	0.25217	0.25283	0.25382	0.25425	0.25434	0.25436
2.0	0.02322	0.04340	0.08855	0.13004	0.16164	0.17234	0.17949	0.18092	0.18314	0.18416	0.18435	0.18442
3.0	0.00827	0.01598	0.03586	0.06003	0.08704	0.09997	0.11083	0.11333	0.11759	0.11973	0.12017	0.12032
4.0	0.00426	0.00831	0.01932	0.03416	0.05396	0.06549	0.07698	0.07997	0.08550	0.08857	0.08924	0.08948
5.0	0.00260	0.00510	0.01206	0.02197	0.03654	0.04612	0.05691	0.06001	0.06621	0.07000	0.07086	0.07119
10.0	0.00059	0.00118	0.00288	0.00552	0.01014	0.01396	0.01973	0.02188	0.02747	0.03254	0.03408	0.03471
20.0	0.00014	0.00028	0.00070	0.00138	0.00265	0.00382	0.00586	0.00676	0.00960	0.01351	0.01526	0.01615
50.0	0.00002	0.00004	0.00011	0.00022	0.00043	0.00064	0.00104	0.00122	0.00191	0.00327	0.00421	0.00488
100.0	0.00001	0.00001	0.00003	0.00006	0.00011	0.00016	0.00027	0.00032	0.00051	0.00095	0.00132	0.00163
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00003	0.00004	0.00007	0.00008	0.00013	0.00026	0.00037	0.00047

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = -40^\circ$)</i>												
1.1	0.19664	0.25705	0.30216	0.31422	0.31801	0.31878	0.31919	0.31926	0.31936	0.31941	0.31942	0.31942
1.2	0.12004	0.17966	0.24316	0.26639	0.27502	0.27693	0.27797	0.27816	0.27843	0.27855	0.27857	0.27858
1.3	0.08314	0.13368	0.20036	0.23079	0.24378	0.24686	0.24860	0.24892	0.24940	0.24960	0.24964	0.24965
1.4	0.06193	0.10398	0.16796	0.20245	0.21902	0.22323	0.22569	0.22614	0.22683	0.22713	0.22719	0.22721
1.5	0.04836	0.08356	0.14282	0.17921	0.19859	0.20382	0.20697	0.20757	0.20847	0.20887	0.20895	0.20898
2.0	0.02020	0.03725	0.07403	0.10680	0.13182	0.14055	0.14658	0.14781	0.14978	0.15071	0.15089	0.15096
3.0	0.00725	0.01389	0.03055	0.05006	0.07129	0.08145	0.09017	0.09223	0.09583	0.09771	0.09811	0.09825
4.0	0.00374	0.00726	0.01661	0.02882	0.04456	0.05358	0.06262	0.06502	0.06955	0.07218	0.07277	0.07299
5.0	0.00228	0.00447	0.01043	0.01869	0.03042	0.03795	0.04639	0.04883	0.05381	0.05699	0.05775	0.05804
10.0	0.00052	0.00104	0.00252	0.00478	0.00864	0.01176	0.01635	0.01804	0.02241	0.02644	0.02770	0.02824
20.0	0.00013	0.00025	0.00062	0.00121	0.00230	0.00328	0.00497	0.00570	0.00797	0.01103	0.01240	0.01312
50.0	0.00002	0.00004	0.00010	0.00019	0.00038	0.00056	0.00090	0.00106	0.00164	0.00273	0.00348	0.00400
100.0	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00010	0.00014	0.00023	0.00028	0.00045	0.00081	0.00111	0.00136
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002	0.00004	0.00006	0.00007	0.00012	0.00022	0.00032	0.00040

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

c/b	a/b											
	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	6.0	10.0	20.0	30.0	40.0
	<i>Factor de Vista Geométrico Máximo (F) para una Flama Cilíndrica ($\theta = -50^\circ$)</i>											
1.1	0.15712	0.20438	0.24045	0.25042	0.25364	0.25430	0.25466	0.25472	0.25481	0.25485	0.25486	0.25486
1.2	0.09683	0.14317	0.19264	0.21124	0.21839	0.22000	0.22090	0.22106	0.22130	0.22140	0.22142	0.22143
1.3	0.06756	0.10705	0.15857	0.18248	0.19302	0.1956	0.19708	0.19735	0.19777	0.19795	0.19798	0.19799
1.4	0.05058	0.08366	0.13303	0.15981	0.17307	0.17654	0.17861	0.17899	0.17959	0.17985	0.17990	0.17992
1.5	0.03964	0.06751	0.11330	0.14136	0.15668	0.16095	0.16358	0.16408	0.16486	0.16521	0.16528	0.16530
2.0	0.01671	0.03049	0.05935	0.08447	0.10369	0.11054	0.11540	0.11641	0.11806	0.11886	0.11902	0.11907
3.0	0.00604	0.01148	0.02484	0.04004	0.05626	0.06402	0.07079	0.07242	0.07532	0.07690	0.07724	0.07736
4.0	0.00312	0.00603	0.01362	0.02327	0.03539	0.04225	0.04917	0.05102	0.05460	0.05675	0.05724	0.05743
5.0	0.00191	0.00372	0.00859	0.01518	0.02430	0.03005	0.03648	0.03835	0.04221	0.04477	0.04540	0.04564
10.0	0.00044	0.00087	0.00209	0.00394	0.00704	0.00948	0.01302	0.01431	0.01763	0.02073	0.02173	0.02217
20.0	0.00011	0.00021	0.00052	0.00100	0.00190	0.00269	0.00403	0.00460	0.00635	0.00868	0.00973	0.01029
50.0	0.00002	0.00003	0.00008	0.00016	0.00032	0.00047	0.00074	0.00087	0.00133	0.00219	0.00276	0.00316
100.0	0.00000	0.00001	0.00002	0.00004	0.00008	0.00012	0.00019	0.00023	0.00037	0.00066	0.00090	0.00109
200.0	0.00000	0.00000	0.00001	0.00001	0.00002	0.00003	0.00005	0.00006	0.00010	0.00018	0.00026	0.00033

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ ***Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, Second Edition.***
- ✓ ***H. R. Greenberg and J. J. Cramer, Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.***
- ✓ ***Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries, a thirty-year Review, a Publication of J&H. Marsh & McLennan Consulting Services, eighteenth edition, 1998.***
- ✓ ***Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, published by the Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1989.***
- ✓ ***Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Materials: Liquids and Gases (The Yellow Book), TNO, 1979, 2 vols. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, Apeldoorn, The Netherlands.***
- ✓ ***D. A. Crowl and J. F. Louvar, Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications, Prentice Hall, Inc., 1990.***
- ✓ ***Ir. G. Opschoor, Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (TNO Yellow Book) Chapter 5: Evaporation, TNO, Rijswijk, The Netherlands, 1979.***
- ✓ ***Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVE's, published by the Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1994.***

- ✓ *G. W. Hoftijzer, Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (TNO Yellow Book) Chapter 6: Heat Radiation, TNO, Rijswijk, The Netherlands, 1979.*
- ✓ *K. S. Mudan, "Geometric View Factors for Thermal Radiation Hazard Assessment", Fire Safety Journal, Vol. 12, 1987.*
- ✓ *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineering and the National Fire Protection Association, 1988.*
- ✓ *C. J. H. van den Bosch, Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials (TNO Green Book) Chapter 1: Damage Caused by Heat Radiation, The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO), The Hague, 1992.*
- ✓ *W. E. Baker, Explosion Hazards and Evaluation, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1983.*
- ✓ *Federal Emergency Management Agency, Handbook of Chemical Hazard Analysis Procedures, Washington, D. C. 20472.*
- ✓ *W. P. M. Merx, Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials (TNO Green Book) Chapter 3: The Consequences of Explosion Effects on Humans, The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research (TNO), The Hague, 1992.*
- ✓ *S. J. Tunkel, Methods for Calculation of Fire and Explosion Hazards, AIChE Today Series, American Institute of Chemical Engineers, 1984.*

- ✓ *B. J. Wiekema, Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material (TNO Yellow Book) Chapter 8: Vapor Cloud Explosions, TNO, Rijswijk, The Netherlands, 1979.*

- ✓ *D. J. Finney, Probit Analysis, Third Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1971.*

- ✓ *Diplomado en Seguridad Industrial y Protección Ambiental, Asociación de ex alumnos de la UNAM en el Estado de Tabasco, A.C., Diciembre 1990.*

- ✓ *Perry, Manual del Ingeniero Químico, Sexta Edición (Tercera Edición en español), Editorial McGraw Hill, México, 1992.*