



INFORMES

TÉCNICOS

MODELACIÓN DE RADIOS DE AFECTACIÓN POR EXPLOSIONES EN INSTALACIONES DE GAS

MARTHA ELENA ALCÁNTARA GARDUÑO
TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN

COORDINACIÓN
DE
INVESTIGACIÓN

Área de Riesgos Químicos



CENAPRED
MÉXICO

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Miguel Ángel Osorio Chong
SECRETARIO DE GOBERNACIÓN

Luis Felipe Puente Espinosa
COORDINADOR NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL

Dr. Carlos M. Valdés González
DIRECTOR GENERAL DEL
CENTRO NACIONAL DE
PREVENCIÓN DE DESASTRES

1ª edición, diciembre 2001
CI/RQ-10122001
Versión Electrónica 2014

©SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
Abraham González Núm. 48,
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,
C.P. 06699, México, D.F.

©CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
Av. Delfín Madrigal Núm. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Deleg. Coyoacán, C.P.04360, México, D. F.
Teléfonos:
(55) 54 24 61 00
(55) 56 06 98 37
Fax: (55) 56 06 16 08
e-mail: editor@cenapred.unam.mx
www.cenapred.gob.mx

©Autores: Martha E. Alcántara Garduño y Tomás González Morán
Edición: Martha E. Alcántara Garduño
Portada: D.G. Demetrio Vázquez y Susana González
Responsable de la Publicación: M. en I. Tomás Alberto Sánchez Pérez

ISBN: 970-628-603-9

Derechos reservados conforme a la ley
IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres
EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

MODELACIÓN DE RADIOS DE AFECTACIÓN POR
EXPLOSIONES EN INSTALACIONES DE GAS

Martha E. Alcántara Garduño
Tomás González Morán

Coordinación de Investigación
Área de Riesgos Químicos

Diciembre, 2001

MODELACIÓN DE RADIOS DE AFECTACIÓN POR EXPLOSIONES EN ESTACIONES DE GAS

RESUMEN

A escala mundial, México es uno de los principales consumidores de gas LP como combustible de uso doméstico e industrial. Su producción, transporte, distribución y uso final, implican diferentes riesgos a la población. Generalmente, se presentan fugas e incendios que involucran este producto, en el hogar, comercios y también, en instalaciones industriales.

Esta investigación presenta una revisión acerca de problemática de la industria gasera y la normatividad vigente en México, así como las afectaciones que puede ocasionar a la población civil y el mal manejo de este producto. Para determinar el grado de riesgo al cual se encuentra expuesta la población, se presentan diversas metodologías de análisis.

El uso de distintos modelos matemáticos dependerá, entre otros elementos, del tipo de actividad industrial o doméstica desarrollada, la capacidad de almacenamiento, condiciones de uso y antigüedad de las instalaciones. Una vez determinadas las zonas que presentan el mayor riesgo se puede determinar el radio de afectación para diferentes eventos (nube tóxica, incendio y explosión).

La simulación numérica permite estimar las áreas que pueden sufrir afectaciones y establecer anticipadamente medidas de prevención y protección, especialmente orientadas hacia la población y al entorno natural del sitio.

ABSTRACT

At a world level, Mexico is one of the most important LPG-gas consumers. The production, transportation, distribution, storage and final use of this product imply different risks for the population. Cases of leaks and fires are generally presented at home, as well as commercial and industrial facilities.

This research presents an exhaustive review of the problem, the actual legislation of the LPG industry in Mexico and specially how an inadequate handling of this product affects the population and natural environment.

This document discusses different mathematical analysis methodologies. Its selection will depend on the developed operating process and characteristics of the industrial plants. Determining the activities of highest risk, it is possible to calculate the radius of influence when a toxic cloud, fire or explosion takes place.

The numeric simulation of an event allows the determination of possible hazards areas. This leads to the establishment of protection and preparedness measures, specially focused on people, the environment and the facilities.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iii
CONTENIDO.....	v
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 Características del gas LP.....	1
1.1.2 Manejo y distribución del gas LP.....	3

CAPÍTULO 2 NORMATIVIDAD Y LEGISLACIÓN APLICABLE

2.1 NORMATIVIDAD VIGENTE PARA EL MANEJO DE MATERIALES PELIGROSOS.....	5
2.1.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.....	5
2.1.2 Programa Nacional de Desarrollo Urbano.....	7
2.2 REGLAMENTACIÓN EN EL MANEJO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL	8
2.2.1 Normatividad Aplicable.....	8
2.2.2 Aplicación de la Normatividad.....	10

CAPÍTULO 3 RIESGO ORIGINADO POR EL MANEJO DE GAS LP

3.1 ORIGEN DE LOS RIESGOS EN EL MANEJO DE MATERIALES PELIGROSOS.....	11
3.2 ACCIDENTES INDUSTRIALES.	12

CAPÍTULO 4 EVALUACIÓN DEL RIESGO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

4.1 ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE RIESGOS.....	21
4.1.1 Evaluación de las pérdidas causadas por los accidentes.....	25
4.2 MODELOS DE ANALISIS DE RIESGO INDUSTRIAL	27
4.2.1 Listas de verificación (Check list).....	29
4.2.2 Estudio de Riesgo y Operabilidad (HAZOP).....	31
4.2.3 Índice Dow (Dow Chemical Company's Fire and Explosion Index).....	32
4.2.4 Índice Mond.....	38
4.2.5 Árbol de fallas.....	43
4.2.6 Análisis "Qué pasa sí..." ("What – If").....	46
4.3 PROCESO APELL.....	47

CAPÍTULO 5 ELEMENTOS DE RIESGO EN LA INDUSTRIA GASERA

5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INDUSTRIA PROCESADORA Y DISTRIBUIDORA DE GAS EN MÉXICO.....	53
5.1.1 Producción nacional e internacional de gas natural y gas licuado de petróleo.....	53
5.1.2 Instalaciones para la producción.....	54
5.1.3 Instalaciones para la distribución de gas LP.....	54
5.1.4 Acciones de prevención contra accidentes.....	61

CAPÍTULO 6 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD

6.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD.....	63
6.2 MODELO DE DISPERSION DE UNA NUBE TÓXICA.....	67
6.3 FORMACIÓN DE NUBES INFLAMABLES Y NUBES EXPLOSIVAS.....	70
6.3.1 Nubes Inflamables.....	70

6.3.2	Nubes Explosivas.....	73
6.3.3	Incendios.....	77
6.4	FLASH FIRE.....	80
6.5	EXPLOSIÓN DE VAPOR EXPANDIDO POR LÍQUIDO EN EBULLICIÓN (BLEVE) Y BOLA DE FUEGO (FIREBALL).....	82
6.5.1	Explosión de vapor expandido por líquido en ebullición (BLEVE).....	82
6.5.2	Bola de Fuego (FireBall).....	83
6.6	EVALUACIÓN DE LOS MODELOS.....	86

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES.....	91
-------------------	----

DEFINICIONES

DEFINICIONES.....	93
-------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

a) Referencias Bibliográficas	95
b) Direcciones Electrónicas Referidas.....	99

ANEXO A

HOJA DE SEGURIDAD DE MATERIALES DEL GAS LP.....	101
HOJA DE TRANSPORTE PARA GAS LICUADO DE PETRÓLEO.....	104

LISTA DE TABLAS

1.1	Uso de gas LP en México.....	2
1.2	Demanda de gas LP en México.....	3
2.1	Distancias mínimas entre construcciones habitacionales e instalaciones que manejen derivados del petróleo.....	7
2.2	Distancias mínimas de las tangentes de los tanques de almacenamiento a otras instalaciones.....	9
2.3	Distancias mínimas de la pared del tanque de almacenamiento, áreas de retención y licuefactor, con edificios, límites de propiedad o fuentes de ignición.....	9
3.1	Accidentes que involucran algunos derivados del petróleo 1970-2000.....	13
3.1	(Continuación) Accidentes que involucran algunos derivados del petróleo 1970-2000..	14
3.1	(Continuación) Accidentes que involucran algunos derivados del petróleo 1970-2000..	15
3.2	Tipo de eventos en donde se involucra gas LP.....	16
3.3	Causas de accidentes en caminos y carreteras en donde se involucra gas LP.....	18
4.1	Probabilidad de ocurrencia de eventos.....	22
4.2	Gravedad o consecuencias para la vida y la salud.....	23
4.3	Gravedad o consecuencias para el medio ambiente.....	24
4.4	Gravedad o consecuencias para la propiedad.....	24
4.5	Velocidad de propagación.....	24
4.6	Estimación del riesgo, entendido como personas afectadas por el evento.....	26
4.7	Prioridades calculadas con base en el monto monetario implicado en el evento.....	27
4.8	Hoja de cálculo del índice Dow.....	34
4.8	(Continuación) Hoja de cálculo del índice Dow.....	35
4.9	Clasificación de los riesgos del índice Dow.....	38
4.10	Hoja de cálculo del índice Mond.....	39
4.10	(Continuación) Hoja de cálculo del índice Mond.....	40
4.11	Grado de riesgo según Mond.....	41
4.12	Clasificación de peligro según el método Mond (mediante índices).....	41
4.13	Clasificación de peligro según el método Mond (factor global de riesgo).....	43
4.14	Índice total Mond.....	43
4.15	Simbología relativa al árbol de fallas.....	46
4.16	Esquema del vínculo de responsabilidad para aplicar el APELL.....	48
4.17	Jerarquización según la frecuencia de ocurrencia de un accidente.....	50
5.1	Producción de gas Licuado.....	53
5.2	Red principal de transporte de gas LP.....	55
5.3	Centros de distribución de gas LP.....	57
5.4	Distribución de población y parques industriales en México.....	60
6.1	Objetos de riesgo.....	65
6.2	Tipo de afectaciones sufridas por accidentes tecnológicos.....	66
6.3	Categorías de estabilidad atmosférica.....	68
6.4	Categorías de estabilidad de Pasquill.....	68
6.5	Relaciones numéricas para obtener los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z	69
6.6	Ecuaciones de Briggs (1973) para obtener los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z	69
6.7	Valor del exponente "p" de acuerdo a los perfiles de viento, en terrenos rugosos.....	69
6.8	Gradiente de temperatura con respecto a la altura.....	73
6.9	Valor de constantes para calcular la concentración de nubes de gases inflamables.....	73
6.10	Diámetro de las ondas expansivas.....	74
6.11	Análisis de nubes explosivas.....	75
6.12	Temperatura de flama adiabática para distintas sustancias en aire.....	78
6.13	Hoja de cálculo para la estimación de daño a causa de una sustancia inflamable.....	79
6.14	Daños en caso de incendio de acuerdo a la intensidad.....	80
6.15	Efectos de una explosión a diferentes sobrepresiones.....	87
6.15	(Continuación) Efectos de una explosión a diferentes sobrepresiones.....	88

LISTA DE FIGURAS

3.1	Resultados del incendio y explosión de contenedores de gas LP en San Juan Ixhuatepec, México, el 19 de noviembre de 1984.....	12
3.2	Distribución porcentual de tipo de eventos donde se involucra el gas LP.....	16
3.3	Distribución porcentual, por estado, de accidentes en fuentes fijas donde se involucra el gas LP.....	17
3.4	Distribución de accidentes en caminos y carreteras, en donde se involucra gas LP.....	19
4.1	Sistema de análisis HAZOP.....	32
4.2	Procedimiento de cálculo del IyE y MPPD.....	33
4.3	Diagrama de flujo para el cálculo del índice Dow.....	37
4.4	Diagrama de flujo para el cálculo del índice Mond.....	42
4.5	Etapas de desarrollo en un análisis de árbol de fallas.....	45
5.1	Centro procesador de gas en Cactus, Chis.....	54
5.2	Red básica de gas natural en México.....	55
5.3	Ducto de gas LP de 12" dn Jáltipan – Salina Cruz.....	56
5.4	Distribución de plantas de gas LP en México.....	58
5.5	Capacidad de almacenamiento de gas LP en México.....	59
5.6	Terminal de almacenamiento de gas licuado, Tepeji del Río, Qro.....	61
5.7	Cilindros de gas LP destruidos.....	61
6.1	Árbol de consecuencias originadas por fuga de materiales.....	64
6.2	Incendio de gas LP en esferas de almacenamiento (San Juan Ixhuatepec, México).....	77
6.3	BLEVE (lento en dos pasos) en un tanque de gas LP.....	83
6.4	BLEVE (lento en un paso) en un tanque de gas LP.....	83
6.5	Bola de fuego (fireball) originada a partir del escape de gas LP de un tanque de almacenamiento.....	84

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El correcto manejo de materiales peligrosos ha sido en los últimos años un tema de gran importancia en las áreas de seguridad de todo tipo de empresas, buscando minimizar el riesgo al cual se encuentran expuestos tanto el personal, las instalaciones y el medio ambiente.

Las diferentes propiedades físicas y químicas de las sustancias peligrosas pueden ocasionar efectos adversos al hombre y al entorno donde se fugan, descargan o disponen; para este tipo de sustancias el daño ocasionado puede ser muy difícil de cuantificar, ya que los efectos observados varían en función de la concentración, tiempo y forma de exposición, así como de la toxicidad específica.

El uso de gas natural¹ y gas licuado de petróleo (o gas LP²) se ha incrementado en los últimos años. Hasta hace poco tiempo el uso de estos combustibles se había limitado a aplicaciones domésticas e industriales, pero con el desarrollo y crecimiento de instalaciones en sitios de producción, la construcción de nuevas redes de tuberías de distribución y la diversificación en su uso, el riesgo asociado con estos materiales obliga a mejorar las medidas de seguridad existentes.

En el caso particular de la industria dedicada a la producción, transporte, manejo y distribución de gas LP, el riesgo se ha visto incrementado en los últimos años debido a la ubicación de zonas habitacionales en áreas que en inicio de las operaciones de muchas empresas, se encontraban totalmente deshabitadas y que funcionaban como “*cinturones de seguridad*” en caso de que se presentara algún accidente.

La identificación de los factores de riesgo en las instalaciones permite establecer las medidas de seguridad necesarias y específicas a aplicar, además de que es uno de las tareas fundamentales para la elaboración de planes de emergencia que permitan salvaguardar la seguridad, tanto de los individuos como de las instalaciones que se encuentran expuestas a eventos como fugas, incendios y explosiones.

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 Características del gas LP

El gas licuado de petróleo es un combustible usado ampliamente en México, siendo uno de los países con mayor consumo en el ámbito mundial tanto a nivel doméstico como industrial (SE (a), 1999). Su producción está registrada desde principios de siglo, aunque es hasta 1946 cuando se inicia su comercialización como una estrategia para sustituir el uso de combustibles vegetales como leña y carbón en las casas habitación (Ibarra, 1997). En los años sesenta adquiere una importancia relevante gracias al desarrollo tecnológico del proceso productivo que reduce su costo de elaboración, además de una mayor disponibilidad al mejorar su transporte y manejo, lo cual se reflejó al intensificar su uso, hasta lograr que en la actualidad tres de cada cuatro hogares mexicanos lo usen para satisfacer sus distintas necesidades (Ibarra, 1997). Este combustible está compuesto por una mezcla de propano y butano (61% y 39%, respectivamente); en condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, aunque para fines prácticos de almacenamiento, distribución y transporte se licúa y maneja bajo presión para mantenerlo en estado líquido (ver Hoja de Seguridad de Materiales del gas LP, en Anexo 1).

¹ Como gas natural se entiende a la mezcla de hidrocarburos compuesta básicamente por metano (Reglamento de gas natural, Diario Oficial, 8 de noviembre de 1995).

² El gas licuado de petróleo o gas LP es el combustible en cuya composición química predominan los hidrocarburos butano y propano o sus mezclas y que contiene propileno o butileno o la mezcla de éstos como impurezas principales (Reglamento de distribución de gas licuado de petróleo, Cap. I, Art. 2º, Párr. X, Diario Oficial, 25 de noviembre de 1993).

La denominación de “gas LP” varía en algunos países respecto a su composición, por ejemplo, en Estados Unidos y Canadá se denomina como gas LP al combustible constituido prácticamente en un 100% por propano, con algunas trazas de otros componentes, los cuáles se consideran de alto valor por lo cual se separan de la corriente de líquidos durante el proceso de destilación, empleándose como materia prima para sintetizar compuestos de alto octanaje que se usan en la formulación de gasolinas (SE (a), 1999).

Para el proceso de licuefacción de gas LP se usa gas natural, el cual contiene una mezcla de metano (CH_4), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) e hidrocarburos más pesados, así como por impurezas tales como el azufre (S) (SE (a), 1999).

Durante una primera etapa del proceso, la corriente de gas natural pasa a una planta endulzadora, donde se elimina el azufre. Enseguida se alimenta a una planta criogénica, en la cual mediante enfriamiento y expansiones sucesivas se obtienen dos corrientes, una gaseosa constituida básicamente por metano (gas residual) y la otra líquida (licuables). En un proceso posterior de fraccionamiento, la fase líquida se separa en diversos componentes: etano, gas LP y gasolinas naturales (SE (a), 1999).

Durante los últimos quince años el mercado nacional de gas LP ha registrado un crecimiento constante en la producción y consumo de este combustible pasando de 167.1 miles de barriles por día (MBD), en 1985, a 254.9 MBD en 1999 (SE (b), 1999). Para 2003 se pronostica una demanda de 329 MBD (PEMEX (a), 1998). El consumo de este hidrocarburo es destinado en su mayor parte al uso doméstico e industrial (SE (a), 1999.) y en los últimos años ha aumentando su uso como combustible (carburante) en vehículos (PEMEX (b), 1998). Se calcula que existen alrededor de 35,000 vehículos alimentados con ese hidrocarburo, con una infraestructura de abasto de nueve estaciones públicas y más de 850 privadas, propiedad de las compañías refresqueras, del transporte y elaboradoras de pan, entre otras (Uno más Uno, 1999).

El uso del gas LP representa alrededor del 10% del requerimiento energético de México; entre los principales usos a los cuáles se destina este hidrocarburo se encuentran los mostrados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Uso de gas LP en México.

Uso	Porcentaje (%)
Residencial	70%
Comercial	15%
Industrial	6%
Transporte	7%
Agropecuario	2%

Fuente: PEMEX (b), 1998.

El consumo de gas LP se da en mayor medida en la zona norte del país y en la zona metropolitana de la Ciudad de México. En el transcurso del año existen diferencias en su consumo, aumentando su demanda en forma considerable durante el invierno y disminuyendo durante la temporada de calor (SE (a), 1999).

En lo referente al transporte, almacenamiento y distribución de gas, estas actividades se pueden llevar a cabo, previo permiso, por los sectores social y privado los que pueden construir, operar y ser propietarios de ductos, instalaciones y equipos (Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo, 1995). Adicionalmente se publicaron en forma posterior una serie de normas que fijan las características técnicas y medidas de seguridad que deben ser observadas por las instalaciones indicadas.

Dado que el gas LP es un petrolífero explosivo e inflamable, los riesgos asociados a su manejo están constituidos por las fugas que se podría presentar en las tuberías, tanques y cilindros en los cuáles se conduce, almacena y distribuye; estos riesgos implican que se cumpla de manera estricta con los estándares de calidad señalados por la normatividad vigente, en la materia, para evitar posibles afectaciones a la población, el ambiente y las propiedades (SE (a), 1999).

1.1.2 Manejo y distribución de gas LP

En México, las formas más importantes para la distribución de gas LP a nivel doméstico se realizan mediante cilindros, pipas y autotanques que recargan tanques estacionarios.

La demanda anual de gas LP es de aproximadamente 8.6 millones de toneladas. El 63% de la distribución de gas LP se realiza mediante cilindros portátiles con capacidades de 20, 30 y 45 kilogramos, principalmente. El 36.4% corresponde al servicio estacionario, con aproximadamente dos millones de tanques fijos. El uso más importante de los tanques portátiles es el de satisfacer la demanda de tipo doméstica y en algunos casos, de tipo comercial para sitios donde se preparan y venden alimentos, sobre todo en puestos semifijos y móviles. Para el caso de tanques estacionarios, estos se usan comúnmente en comercios, restaurantes, industrias, hoteles y moteles, y baños públicos, entre los más importantes.

En el caso de las pipas, éstas alimentan tanques estacionarios de distinta capacidad, desde 200 hasta 5000 litros; los de menor capacidad, comúnmente de 200 litros, se ubican en domicilios particulares (unifamiliares); los de 500 a 1000 litros en edificios de departamentos (multifamiliares), donde abastecen a varios usuarios; cilindros de capacidades desde 500 hasta 5000 litros se usan, principalmente, en instalaciones de tipo comercial, industrial y de servicios.

El período de abastecimiento para los distintos usuarios puede variar desde un par de semanas (por ejemplo, abastecimiento de un tanque estacionario de una casa habitación donde se encuentran una o más personas) hasta uno o varios abastecimientos semanales para instalaciones comerciales e industriales donde los tanques son de gran capacidad (500 ó más litros).

Prácticamente en todas las ciudades de México se encuentran localizadas compañías distribuidoras, tanto en cilindros, como por medio de pipas (SIEM, 2000); algunas compañías cuentan, además, con equipo para abastecer a los vehículos que usan gas carburante. Las capacidades de almacenamiento de las compañías es muy variado y depende de factores como son el tamaño y tipo del área donde distribuye el combustible, las actividades desarrolladas por los clientes a los cuales atiende (habitacionales y/o industriales), y las condiciones climáticas de la región (diferencias muy marcadas entre los distintos meses del año), entre otras.

En la actualidad, existen alrededor de 500 empresas distribuidoras de gas LP, que son propietarias de 898 plantas de almacenamiento y distribución. Una gran parte de este hidrocarburo se distribuye mediante cilindros portátiles de distinta capacidad, para lo cual se usan alrededor de 9 mil camiones. También es necesario tomar en cuenta a los autotanques que suministran este material a los tanques estacionarios, para lo cual se cuenta con alrededor de 3 mil unidades automotrices (SIEM, 2000).

Para ciudades pequeñas y medianas, el número de empresas distribuidoras que las abastecen puede ser de una o dos, mientras que para ciudades de gran tamaño como el Distrito Federal, Guadalajara, Ciudad Juárez y Monterrey, el número de empresas puede ser de 40 ó más; además del número de empresas debe tomarse en consideración la capacidad de almacenamiento de cada una de ellas.

Tabla 1.2 Demanda de gas LP en México (SE (c), 2000).

<i>Estado</i>	<i>Porcentaje (%)</i>
Distrito Federal y Estado de México	28%
Chihuahua	9%
Jalisco	7%
Baja California	6%
Resto del País	50%

CAPÍTULO 2

NORMATIVIDAD Y LEGISLACIÓN APLICABLE

2.1 NORMATIVIDAD VIGENTE PARA EL MANEJO DE MATERIALES PELIGROSOS

La normatividad vigente en México para la industria dedicada a la extracción, procesamiento y distribución de gas y gas natural se encuentra contemplada desde distintos puntos de vista en la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional, en el Ramo del Petróleo (b) (1996), el Reglamento de Distribución de Gas Licuado de Petróleo (1993) y el Reglamento de Gas Natural (1995), entre otras.

Entre los elementos más importantes contemplados en la legislación vigente, y que será el punto central de este capítulo, se encuentra la delimitación de las zonas de salvaguarda, es decir aquellas áreas alrededor de las instalaciones en donde los efectos de un evento indeseado (fuga, incendio o explosión) protegen de daños a la salud de los habitantes o a sus propiedades. La distancia mínima que debe existir entre los elementos de riesgo (tanques o esferas de almacenamiento, equipos, tuberías, etc.) se determinará a partir de diversos parámetros entre los cuales se encuentran las características fisicoquímicas de la sustancia, la cantidad almacenada, las características del recipiente, las condiciones climáticas (vientos, lluvia y humedad, entre otros), el uso al cual se encuentra sometido, los sistemas de control del equipo y las medidas de protección contra incendio con las cuales cuenta la instalación.

De acuerdo a la capacidad almacenada y a los diversos usos del gas natural, gas natural comprimido y gas LP (sitios de almacenamiento, llenado de recipientes portátiles para uso en el hogar, estaciones de servicio para vehículos automotores, etc.) cada instalación debe cumplir con normas específicas que garanticen minimizar las afectaciones que puedan llegar a producirse, a causa de un accidente ocasionado por dichos materiales, por lo que las distancias mínimas de salvaguarda se fijan en forma particular.

2.1.1 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiente (LGEEPA, 1996) define como material peligroso a aquellos "elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales por sus características, corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas"³. De acuerdo a esta definición, el gas LP es un material peligroso ya que es inflamable y puede llegar a explotar bajo ciertas condiciones, por lo que debe estar sujeto a la normatividad emitida para tales sustancias.

La LGEEPA (1996) establece también la definición de actividades consideradas como altamente riesgosas en virtud a sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas para el equilibrio ecológico o el ambiente. El gas LP se encuentra incluido en el "Segundo listado de actividades altamente riesgosas"⁴ (1992) como material inflamable y explosivo, cuando su cantidad de reporte⁵ es igual o mayor de 50,000 kg.

³ LGEEPA: Título Primero, Cap. 1, Art. 3, Párr. XXII.

⁴ Se considerará como actividad altamente riesgosa, el manejo de sustancias peligrosas en un volumen igual o superior a la cantidad de reporte indicado en este listado.

⁵ 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.

Ya que en muchas ocasiones el crecimiento de los asentamientos humanos ha alcanzado a los sitios en donde se llevan a cabo actividades altamente riesgosas, la ubicación de estos últimos debe tomar en consideración la expansión a futuro de los centros de población que se encuentren cercanos, además de que el Gobierno Federal podrá limitar los usos que se lleven a cabo en áreas cercanas, incluyendo la zona de salvaguarda alrededor de las citadas instalaciones de alto riesgo.

De acuerdo al Artículo 20, fracción II, de la LGEEPA (1996.), se señala que se establecerán lineamientos y estrategias para la localización de las actividades productivas y de los asentamientos humanos, como parte del ordenamiento ecológico del territorio y en el Artículo 23, fracciones II y VI, se establece que no deberán permitirse usos habitacionales, comerciales u otros que pongan en riesgo a la población⁶, dentro de lo que se considere como zona de salvaguarda.

En lo que respecta al artículo 145 de la misma LGEEPA, la ley especifica que la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) promoverá que en la determinación de los usos de suelo se especifiquen las zonas en las que se permita el establecimiento de industrias, comercios o servicios considerados riesgosos por la gravedad de los efectos que puedan generar en los ecosistemas o en el ambiente tomándose en consideración:

- a) Las condiciones topográficas, meteorológicas, climatológicas, geológicas y sísmicas de las zonas,
- b) Su proximidad a centros de población, previendo las tendencias de expansión del respectivo asentamiento y la creación de nuevos asentamientos,
- c) Los impactos que tendría un posible evento extraordinario de la industria, comercio o servicio de que se trate,
- d) La compatibilidad con otras actividades de la zona,
- e) La infraestructura existente y necesaria para la atención de emergencias ecológicas, y
- f) La infraestructura para la dotación de servicios básicos.

En la actualidad sólo se encuentra declarada como zona de salvaguarda el área en torno a la empresa Química Flúor, SA de CV, dedicada a la producción de ácido fluorhídrico⁷, aunque de acuerdo al artículo 48 de la LGEEPA (1996) se plantea que “cuando para garantizar la seguridad de los vecinos de una industria que lleve actividades altamente riesgosas, sea necesario establecer una zona intermedia de salvaguarda, el Gobierno Federal podrá, mediante declaratoria, establecer restricciones a los usos urbanos que pudieran ocasionar riesgos para la población”. De esta forma, la SEMARNAT promoverá, ante las autoridades locales competentes, que en los planes o programas de desarrollo establezcan que en dichas zonas no se permitirán usos habitacionales, comerciales u otros que pongan en riesgo a la población.

Se indica como requisito para la ubicación de nuevas plantas de almacenamiento y distribución la elaboración, presentación y aprobación ante las autoridades pertinentes (en este caso el Instituto Nacional de Ecología (INE)), de un estudio de impacto ambiental, así como en algunos casos de estudios de riesgo, con la finalidad de asegurar que no se exponga a los habitantes ubicados en los alrededores de las instalaciones a daños en sus personas o propiedades (LGEEPA, 1999). El tipo de estudio de impacto ambiental que se requiera elaborar se encuentra determinado por lo establecido en la LGEEPA, y se fija por las características particulares de cada instalación.

En el caso del estudio de riesgo, éste se puede elaborar una vez que la instalación se encuentra en pleno funcionamiento; para elaborarlo existen diversas metodologías (ver Capítulo 4, Evaluación del riesgo en instalaciones industriales), cada una de ellas con características de aplicación particulares, por lo cual su selección y elaboración la debe llevar a cabo un especialista en la materia.

⁶ LGEEPA; Título Primero, Cap. IV, Sección IV, Art. 23, Párr. VIII.

⁷ La zona de salvaguarda alrededor de esta empresa fue declarada por el Ejecutivo Federal mediante “Decreto por el que se declara por causa de utilidad pública el establecimiento de la Zona Intermedia de Salvaguarda en torno a la Planta de la Empresa Química Flúor, SA de CV Municipio de Matamoros, Tamps.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día viernes 11 de enero de 1991.

Para la elaboración de los estudios de riesgo, y determinar en su caso el área de afectación que puede resultar a causa de un accidente, surge la necesidad de usar modelos de simulación numérica que determinen los radios de afectación y las posibles consecuencias provocados por eventos tales como incendios o explosiones, en donde se involucre el uso de gas LP o de gas natural.

2.1.2 Programa Nacional de Desarrollo Urbano

Para evitar posibles afectaciones a asentamientos humanos, en el Programa Nacional de Desarrollo Urbano 1990 - 1994, se incluyen algunos criterios de desarrollo urbano de tipo complementario a los reglamentos de construcciones y de seguridad estructural actualmente vigentes en los estados con la finalidad de evitar situaciones críticas ocasionadas por el crecimiento desordenado de los centros de población (Muñoz *et. al*, 1992).

Entre los criterios de importancia para el manejo de gas LP, se encuentra el criterio **D** que establece las características sobre áreas para usos industriales y ductos. En el apartado 3 se indican las distancias mínimas para el resguardo del desarrollo urbano, con respecto a las plantas de recibo y/o distribución de energéticos o derivados del petróleo. Para el caso de poliductos, la distancia mínima para el resguardo es entre 50 y 500 metros. En el apartado 6, que se refiere a los ductos y poliductos que transporten derivados del petróleo, no se debe permitir el desarrollo urbano sobre su sección y trayecto de derecho de vía, dado que esta es zona federal. No se permite, asimismo, el tránsito no controlado de transportes o maquinaria pesada sobre su tendido, ni la excavación a cualquier profundidad cerca de la tubería. Para aquellos casos en que se desee instalar una red de infraestructura urbana cercana a los ductos, o la construcción de una vía o dispositivo vial cercano al tendido, se deberá concertar y coordinar en forma obligatoria, su proyecto y construcción bajo la supervisión de PEMEX. La distancia mínima de resguardo a usos urbanos a partir del eje de la tubería es de 35 metros (Muñoz *et. al*, 1992).

El criterio señalado con la letra **O** (apartado 9), indica que no se debe permitir el desarrollo urbano en zonas de extracción petrolera, previa determinación precisa de sus límites (Muñoz *et. al*, 1992).

De acuerdo al mismo Programa, el criterio **U** (apartado 3), indica las distancias mínimas para establecer cualquier uso habitacional; para el caso de cualquier ducto de petróleo o sus derivados, tal como se indica en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Distancias mínimas entre construcciones habitacionales e instalaciones que manejen derivados del petróleo.

Sitio	Distancia de separación mínima(m)
Ducto de petróleo o sus derivados / construcción habitacional	50
Zonas industriales o de almacenamiento de alto riesgo / construcción habitacional	50
Zonas industriales pesadas, semipesadas o zonas de almacenaje a gran escala de bajo riesgo/ construcción habitacional	25
Zonas industriales ligera y/o medianas / construcción habitacional	10

Fuente: Muñoz *et. al*, 1992

Sin embargo, dentro del Programa Nacional de Desarrollo 1995-2000, no se toman en consideración los criterios antes señalados, aunque dentro del diagnóstico de la planeación del desarrollo urbano en el ámbito nacional se determinó que 20 estados⁸ han concluido la adecuación de sus leyes de desarrollo urbano

⁸ Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Campeche, Chiapas, Coahuila, Colima, Chiapas, Chihuahua, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Nuevo León, Quintana Roo, Tlaxcala, Yucatán y Zacatecas.

de acuerdo a la Ley de Asentamientos Humanos mientras que actualmente se proporciona asistencia técnica para cumplir con este proceso a 11 estados más (SEDESOL, 2001). En esta nueva versión del Programa se tiene como uno de los objetivos el continuar con las acciones preventivas junto con PEMEX para evitar la ocupación de los derechos de vía (SHCP, 1995).

2.2 REGLAMENTACIÓN EN EL MANEJO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL

2.2.1 Normatividad Aplicable

El transporte, almacenamiento y la distribución de gas LP y gas natural pueden ser llevadas a cabo tanto por los sectores social y privado, los cuales deberán ajustarse a las disposiciones reglamentarias, técnicas y de regulación que sean expedidas⁹ por el Estado. Cada una de las empresas dedicadas al almacenamiento de gas debe contar con permisos vigentes, los cuales le permiten almacenar esta sustancia en una localización específica y una capacidad determinada¹⁰, lo cual permite identificar las áreas de riesgo en donde se encuentre dicho material, además de que debe conocerse el objeto, la descripción, el trayecto o localización y las especificaciones técnicas del proyecto que se busca desarrollar¹¹

En el Reglamento de distribución de gas licuado de petróleo (Diario Oficial, 25 de noviembre de 1993) se especifica que "las plantas de almacenamiento se ubicarán fuera de los centros de población, y que en las construcciones circundantes no deberán realizarse actividades que puedan ocasionar riesgo para la seguridad de estas instalaciones"¹², por lo cual "se podrán establecer zonas intermedias de salvaguarda, conforme a lo dispuesto en la LGEEPA".

De acuerdo al Reglamento de distribución de gas licuado de petróleo (1996) es obligación de las empresas dedicadas al transporte de gas, así como la operación de plantas de almacenamiento, estaciones de gas y bodegas de distribución, llevar bitácoras con la información correspondiente a la operación y mantenimiento de los equipos¹³. Estas bitácoras permiten identificar riesgos y prevenir los accidentes que se presenten en la operación diaria de las instalaciones, lo cual permite localizar los puntos críticos y diseñar así los programas de mantenimiento y los programas de prevención de accidentes requeridos.

Las plantas de almacenamiento para gas LP¹⁴, en la regulación establecida por la norma NOM-001-SEDG-1996 (1997) en sus parámetros de diseño y construcción establecen distancias mínimas entre los tanques de almacenamiento y los almacenes y sitios de reunión pública (Tabla 2.2), es decir, sitios que se encuentran fuera de los límites de la instalación y que pueden afectar a la población de los alrededores, así como a sus bienes.

⁹ La Ley reglamentaria del artículo 27 Constitucional en el ramo del petróleo, Art. 4° (1996).

¹⁰ Reglamento de gas natural, Cap. VII, Sección Tercera, Art. 99 (1995).

¹¹ Reglamento de gas natural, Cap. VII, Sección Tercera, Art. 101 (1995).

¹² Reglamento de distribución de gas licuado de petróleo, Cap. VII, Art. 47 (1993).

¹³ Reglamento de distribución de gas licuado de petróleo, Cap. II, Art. 5° , Cap. V, Art. 35 (1993).

¹⁴ Esta corresponde a un sistema fijo y permanente para almacenar gas LP y que mediante instalaciones apropiadas haga el trasiego de éste. Puede ser exclusiva para llenado de recipientes, o para carga y descarga de transportes y autotankers, o mixta (NOM-005-SECRE-1997, Art. 3.9, 1997)

Tabla 2.2 Distancias mínimas de las tangentes de los tanques de almacenamiento a instalaciones

Sitio	Distancia (m)
Almacén de combustibles excepto en otra planta de almacenamiento de gas LP	100
Almacén de explosivos	100
Casa habitación	100
Escuela	100
Hospital	100
Iglesia	100
Sala de espectáculos	100

Fuente: NOM-001-SEDG-1996, 1997.

En cuanto a las estaciones de servicio¹⁵, tanto de gas LP y gas natural comprimido, se ha publicado la norma NOM-005-SECRE-1997 (1997) que establece, entre otros elementos, las medidas de seguridad que deben ser aplicadas en las instalaciones, con volumen de almacenamiento menor a 265,000 litros, es decir, volúmenes menores a los contemplados por la norma NOM-001-SEDG-1996 (1997). Entre los puntos más importantes que establece esta norma se encuentran las distancias mínimas que deben de existir entre la pared del tanque de almacenamiento, área de retención y licuefactor, con edificios, límites de propiedad o fuentes de ignición (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Distancias mínimas de la pared del tanque de almacenamiento, área de retención y licuefactor, con edificios, límites de propiedad o fuentes de ignición (NOM-005-SECRE-1997, 1997).

Capacidad total del tanque de almacenamiento de GNL* de una estación de servicio (litros)	Distancias mínimas (metros)
Hasta 475	0
476 hasta 1,890	3
1,891 hasta 7,570	8
7,571 hasta 113,500	15
113, 501 hasta 264,950	23

* GNL: Gas Natural Licuado.

En la primera norma se establece que “las medidas de respuesta ante emergencias en las estaciones de servicio que abastecen al público deben coordinarse con la autoridad local correspondiente. En estaciones privadas, dichas medidas deben coordinarse por el departamento de seguridad del propietario, si la emergencia no rebasa los límites de la propiedad, y con la autoridad local correspondiente si la emergencia rebasa dichos límites” (Art. 6.3.3). Esto implica la coordinación entre las autoridades municipales, estatales y federales¹⁶, junto con los propietarios y responsables de las estaciones de servicio, para hacer frente a los eventos que rebasando los límites de las instalaciones puedan afectar a la población circundante (NOM-005-SECRE-1997, 1997).

El plan de protección que se plantea debe cubrir, entre otros aspectos, las condiciones potenciales de riesgo de la instalación, así como una clasificación de las emergencias que puedan llegar a presentar, y que debe estar aprobado por la autoridad local correspondiente (Art. 6.3.4). El alcance de las medidas y sistemas de protección contra incendio debe determinarse cuidadosamente tomando en consideración elementos tales

¹⁵ Como estación de servicio se denomina a aquella “instalación en la que se recibe, almacena y suministra gas natural licuado a vehículos automotores” (NOM-005-SECRE-1997, 1997).

¹⁶ LGEEPA (1996): Título Cuarto, Cap. V, Art. 149.

como las condiciones locales del sitio, la operación de los vehículos, los riesgos existentes dentro de la instalación y el daño que puede ocasionarse a las propiedades contiguas (Art. 6.3.2).

El diseño de las estaciones de gas LP con almacenamiento fijo, que mediante instalaciones y equipos apropiados se destinen exclusivamente a llenar tanques instalados permanentemente en los vehículos de combustión interna que usen gas como combustible, se encuentra reglamentado por la norma NOM-025-SCFI-1993 “Estaciones de gas LP con almacenamiento fijo.- Diseño y construcción” (1993), y en ella se fija que la distancia mínima entre el tanque de almacenamiento y los centros hospitalarios, educativos y de reunión, debe ser al menos de 30 metros (Art. 6.7).

Para las estaciones de gas natural comprimido que suministran este hidrocarburo a vehículos de combustión interna como combustible, las medidas de seguridad se encuentran fijadas a su vez por la norma NOM-031-SCFI-1994 “Gas natural comprimido para uso automotor. Requisitos de seguridad para estaciones de servicio e instalaciones vehiculares” (1994). En ella se establece que la distancia mínima que debe existir entre las instalaciones y los hospitales, centros educativos y vía de ferrocarril más cercana, es de 15 metros, mientras que la distancia mínima entre el predio de la estación y la banqueta más cercana es de 3 metros.

2.2.2 Aplicación de la normatividad

Ya que en algunos casos no se ha cumplido con las especificaciones indicadas por el reglamento vigente, se ha tenido que llegar a la clausura de compañías distribuidoras de gas para vehículos, como fue el caso de “Gas vehicular Cilsa”, “Tecogas” y “Equigas”, las cuáles además de ser clausuradas en forma temporal, debieron pagar una multa por la falta de permisos y por no contar con las medidas de protección civil adecuadas, para reducir el riesgo al que se encontraba expuesta la población circundante (OnceTV, 2000).

En lo que respecta a las medidas básicas de seguridad aplicables a las compañías que distribuyen gas LP en tanques portátiles y estacionarios, éstas deben contar al menos con los siguientes elementos:

- a) Identificación con el logotipo o razón social del proveedor, de los vehículos que se dedican a la distribución de cilindros portátiles, los autotanques que llenan los tanques de tipo estacionario así como los mismos cilindros portátiles (NOM-011/1-SEDG-1999, 2000).
- b) Uso de transportes adecuados (camiones, camionetas y autotanques, entre otros) que cuenten con las medidas de seguridad adecuadas para dotar del hidrocarburo a los usuarios finales (NOM-010-SEDG-1999, 1999).
- c) La supervisión de las condiciones físicas de las instalaciones de las plantas de almacenamiento y distribución, para asegurar el manejo adecuado de los materiales desde su recepción hasta su distribución, y llenado de los tanques estacionarios y en las estaciones dedicadas a proveer del hidrocarburo a vehículos automotores (NOM-001-SEDG-1996, 1997).

CAPÍTULO 3

RIESGO ORIGINADO POR EL MANEJO DE GAS LP

Debido al incremento en el uso de gas natural y gas LP para consumo industrial, y en los últimos años como combustible de vehículos, han venido ocurriendo accidentes tanto en México, como en otros países del mundo. La gravedad de los daños ocasionados tanto a la salud de los individuos, a la propiedad y al ambiente, son muy variados, y dependen en gran medida del tipo de instalación y cantidad involucrada, así como de las condiciones atmosféricas imperantes.

Las empresas dedicadas al transporte, almacenamiento y distribución de gas LP y gas natural deben estar conscientes del riesgo que implican sus instalaciones para los asentamientos humanos, y determinar las medidas de seguridad, dentro y fuera de la empresa, que deben aplicarse para reducir al mínimo dicho riesgo. Existen distintos métodos para identificar los riesgos presentes en las instalaciones industriales. Entre ellos se encuentra el análisis de riesgo, el cual forma parte de un plan de respuesta a emergencias en donde se manejan materiales peligrosos. El análisis de riesgo es una evaluación de la probabilidad de una liberación accidental de materiales peligrosos, así como la determinación de las consecuencias que podrían resultar de dicho escape (FEMA, 1990).

3.1 ORIGEN DE LOS RIESGOS EN EL MANEJO DE MATERIALES PELIGROSOS

El manejo de materiales peligrosos en instalaciones industriales, ponen en riesgo la seguridad tanto del personal, de las instalaciones, el medio ambiente, y en muchos casos a la población circundante, obligando a los responsables de dichas instalaciones a realizar un análisis de los riesgos ya que pueden desencadenar accidentes de magnitud considerable.

Las propiedades de ciertas sustancias (inflamabilidad, toxicidad y explosividad) obligan a asumir la responsabilidad de un manejo adecuado y responsable de ellas, implementando las medidas de seguridad que permitan disminuir los riesgos asociados a su almacenamiento, transporte, manejo, transformación y disposición. Normalmente las instalaciones se diseñan para soportar ciertas alteraciones ocasionales de operación, sin causar daño a personas y bienes.

Una peculiaridad en las instalaciones de procesos es que suele existir una interrelación entre riesgos y los factores causales, que desencadena el evento, provoca diferentes niveles de peligrosidad y gravedad de las consecuencias.

El estudio de seguridad de un proceso industrial requiere contar con un equipo de trabajo multidisciplinario, que conozca las características y funcionamiento del proceso y las instalaciones

Los efectos en la salud y el ambiente causados por la fuga, derrame, incendio y/o explosión de materiales peligrosos son variados y dependen de las condiciones y características con los cuáles dichos eventos se lleven a cabo. En el Capítulo 6 será revisada a detalle la modelación de estos eventos.

Como resultado de varios años de sistematizar información sobre accidentes, se ha encontrado que después del aceite crudo de petróleo, el gas LP es la sustancia que más frecuentemente se encuentra relacionada en accidentes en fuentes fijas (ACQUIM, 2000).

Una explosión puede ocasionar ondas expansivas y la generación de proyectiles que pueden causar la muerte o lesiones a los individuos que se encuentre ubicados dentro del radio de afectación, ocasionar daño estructural a las construcciones por el colapsamiento de muros, ventanas y estructuras de soporte. Efectos similares, aunque en algunos casos con mayores áreas de afectación, son el resultado de la explosión de nubes de gases o vapores combustibles, liberadas por la ruptura de contenedores o de ductos (INE (a), 2001).

En el caso de los incendios, estos pueden provocar quemaduras de diverso grado de severidad dependiendo de la exposición a radiaciones térmicas, cuya magnitud depende de la intensidad del calor radiado y del tiempo de duración de la exposición. La muerte de los individuos expuestos a un incendio puede producirse no solo por la exposición a la radiación térmica, sino por la disminución de oxígeno en la atmósfera (ocasionado por el consumo de éste durante el proceso de oxidación del combustible) o por la exposición a gases tóxicos generados (INE (a), 2001).

El escape de una mezcla turbulenta de líquido y gas que se expande rápidamente en el aire, como una nube de vapor, puede dar lugar a una bola de fuego con posibilidad de inflamarse al encontrar una fuente de ignición, ocasionando quemaduras graves e incluso la muerte a los individuos ubicados inclusive a cientos de metros del sitio donde se encuentre el depósito dañado (INE (a), 2001). Un ejemplo de este tipo de eventos es el ocurrido en San Juan Ixhuatepec, México, el 19 de noviembre de 1984 (Figura 3.1).

Figura 3.1 Resultados del incendio y explosión de contenedores de gas LP en San Juan Ixhuatepec, México, el 19 de noviembre de 1984 (Tudelft, 2001)



En el caso de la liberación de concentraciones elevadas de sustancias tóxicas, éstas guardan una relación directa con la exposición aguda durante e inmediatamente después del accidente, más que con una exposición de larga duración. La magnitud de los efectos de la exposición a nubes tóxicas depende de las concentraciones que alcancen las sustancias contenidas en ellas y de la duración de la exposición. Las sustancias tóxicas emitidas no sólo dañan a las personas y animales expuestos a ellas, sino también al ecosistema que recibe dichas emisiones, afectando las condiciones de desarrollo de plantas y animales que se encuentran en los medios naturales (agua, suelo y aire) (INE (a), 2001).

3.2 ACCIDENTES INDUSTRIALES

Entre las principales características del gas LP resalta que es muy inflamable. El mal manejo al cual es sometido ha provocado una serie de accidentes en el ámbito mundial, que en muchos casos han ocasionado la

muerte de personas, así como una afectación importante a los bienes y al ambiente. En la tabla 3.1 se presenta una recopilación de accidentes en donde la principal sustancia involucrada es el gas LP, gas natural o alguno de sus componentes.

Tabla 3.1 Accidentes que involucran algunos derivados del petróleo, 1970 - 2000 (UNEP^c, 2001).

Fecha		País y situación	Origen del accidente	Productos involucrados	Número de		
					Muertos	Lesionados	Evacuados
1970	8.04	Japón, Osaka	Explosión en un subterráneo	Gas	79	425	
	05.12	EUA, Linden, NJ	Explosión de nube de vapor	C ₁₀ HC	-	40	
	17.12	Irán, Agha Jari	Explosión	Gas natural	34	>1	
1972	22.01	EUA, San. Luis	Explosión (transporte ferroviario)	Propileno	-	230	>100
	30.03	Brasil, Duque de Caxias	Falla en el proceso	Gas LP	39	51	..
	1.07	México, Chihuahua	Explosión (transporte ferroviario)	Butano	>8	800	..
1973	10.02	EUA, State Island	Explosión	Gas	40	2	..
	-	Checoslovaquia	Explosión	Gas	47	-	-
1974	29.04	EUA, Eagle Pass	Transporte ferroviario	Gas LP	17	34	-
	19.07	EUA, Decatur	Transporte ferroviario	Isobutano	7	349	-
	21.09	EUA, Houston	Explosión (transporte ferroviario)	Butadieno	1	235	1 700
1977	03.04	Umm Said, Qatar	Incendio	Gas LP	7	13	
1978	2.03	Canadá, Ontario	Tubería	Gas LP	-	-	20 000
	11.07	*España, San Carlos	Transporte carretero	Propileno	216	200	-
	15.07	México, Xilatopec	Explosión (Transporte carretero)	Gas	100	200	-
	2.11	México, Sanch. Magal.	Explosión en tubería	Gas	41	32	..
1979	8.01	Irlanda, Bahía Bantry	Explosión (transporte marino)	Aceite, gas	50	..	..
	02	Polonia, Warsaw	Fuga, explosión	Gas	49	77	..
	1.10	Grecia, Bahía Suda	Explosión (transbordador)	Propano	7	140	-
	11.11	Canadá, Mississauga	Explosión (transporte ferroviario)	Cloro, Gas LP	-	-	226 000
1980	16.08	Japón, Shizuoka	Explosión	Metano	15	222	-
	24.11	Turquía, Danaciobasi	Uso / aplicaciones	Butano	107	..	..
	29.11	España, Ortuella	Explosión	Propano	51	90	-
1982	5.03	Australia, Melbourne	Transporte	Butadieno	-	>1 000	-
	25.04	Italia, Todi	Explosión (uso / aplicación)	Gas	34	140	..
1983	05	Egipto, Río Nilo	Explosión (transporte)	Gas LP	317	44	-

Tabla 3.1 (Continuación) Accidentes que involucran algunos derivados del petróleo, 1970 - 2000 (UNEP⁶, 2001).

Fecha		País y situación	Origen del accidente	Productos involucrados	Número de		
					Muertos	Lesiona- dos	Evacua- dos
1984	16.08	Brasil, Río de Janeiro	Fuga y fuego en plataforma	Gas	36	19	--
	19.11	México, San J. Ixhuatepec	Explosión (esferas de almacenamiento)	Gas LP	>500	2500	>200 000
	12	Paquistán, Gahri Dhoda	Explosión en tubería	Gas	60	..	-
1986	25.12	México, Cárdenas	Fuga (tubería)	Gas	-	2	>20 000
1988	6.07	RU, Mar del Norte	Explosión, fuego (plataforma)	Aceite, gas	167	-	-
	22.10	China, Shanghai	Explosión en refinería	Petroquímicos	25	17	..
	31.11	Bangladesh, Chittagong	Explosión	Vapores inflamables	33	..	..
	1.12	China	Explosión	Gas	45	23	..
1989	4.06	URSS, Acha Ufa	Explosión en tubería	Gas	575	623	..
	23.10	EUA, Pasadena	Explosión	Etileno	23	125	1 300
1990	9.04	*EUA, Warren	Explosión y fuego	Butano			
	16.04	India, cerca de Patna	Fuga, accidente en transporte	Gas	100	100	
1990	9.04	*EUA, Warren	Explosión y fuego	Butano			
	16.04	India, cerca de Patna	Fuga, accidente en transporte	Gas	100	100	
	22.07	Corea, Ulsan	Explosión	Butano			>10 000
	25.09	Tailandia, Bangkok	Accidente en el transporte	Gas LP	>51	>54	
	3.11	*EUA, Chalmette	Explosión en una refinería	Nube de gas inflamable			
	5.11	*India, Nagothane	Fuga	Etano y propano	32	22	
	25.11	*EUA, Denver	Fuego (almacén de combustible en el aeropuerto)	Keroseno			
	30.11	*Arabia Saudita, Ras Tan.	Fuego en una refinería	Keroseno y benceno	1	2	
1991	30.05	*Francia, Berre- L`Etang	Fuga (planta química)	Etileno		4	
	24.09	Tailandia, Bangkok	Explosión	Gas	>63		
	3.11	*EUA, Beaumont	Fuego en una refinería	Hidrocarburos			
	.11	India, Medran	Accidente en el transporte (fuga)	Líquido inflamable	93	25	
	29.12	México, San Luis Potosi	Fuga	Butano		40	
1992	23.02	Corea, Kwangju	Explosión en un almacén de gas	Gas LP		16	20 000
	22.04	*México, Guadalajara	Explosión en drenaje de la ciudad	Hidrocarburos, gas	>206	>1500	6500
	8.08	Turquía, Corlu	Explosión	Metano	32	64	
	8.10	*EUA, Wilmington	Fuga (refinería)	Hidrocarburos, hidrógeno		16	
	9.11	*Francia, Chateaufneuf.L.	Fuga (refinería)	Propano, butano, nafta	6	1	

Tabla 3.1 (Continuación) Accidentes que involucran algunos derivados del petróleo, 1970 - 2000 (UNEP^c, 2001).

Fecha	País y situación	Origen del accidente	Productos involucrados	Número de		
				Muertos	Lesionados	Evacuados
1993	7.01	Corea del Sur, Chongju	Fuego	Gas LP	27	50
	6.08	China, Shenzhen	Explosión en una bodega	Sustancias químicas, gas	>12	168
	28.09	Venezuela, Tejerías	Explosión del alcantarillado	Gas	53	35
	11.10	China, Baohe	Explosión	Gas natural	70	
1994	30.03	*Francia, Courbevoie	Fuga	Gas	1	59
	7.12	Corea, Seoul	Explosión en el centro de la ciudad	Gas natural	7	50
	14.12	Mozambique, Palmeira	Accidente en el transporte	Gas	36	
	28.12	Venezuela	Explosión en una tubería		50	10
1995	28.04	Corea, Taegu	Construcción en transporte subterráneo	Gas LP	101	140
	24.10	*Indonesia, Cilacap	Fuego, explosión en una refinería	Gas		
1997	26.01	*EUA, Martínez	Fuego y explosión	Hidrocarburos	1	60
	22.06	*EUA, Deer Park	Explosión de una nube de vapor	Hidrocarburos		1
1998	14.02	Camerún, Yaoundi	Accidente en el transporte	Productos del petróleo	220	130
	00.00	Nigeria*, Jesse	Explosión en oleoducto (por ordeña)	Productos del petróleo	700	
2000	07.07	Rusia**, Omsk, Siberia	Incendio (estación de gas) y explosión	Gas, petróleo	3	85
	07.11	Nigeria*, Abuja	Explosión en oleoducto (por ordeña)	Productos del petróleo	250	

Lista última fechada en: Diciembre del 2000.

Fuentes:

OECD, MHIDAS, TNO, SEI, UBA-Handbuch Stoerfaelle, SIGMA, Press Reports, UNEP, BARPI. Work in progress (UNEP^c, 2001)

*<http://200.23.36.100/cgi-bin/hechos.sh/cgis/detalle?idcve=0x000335a4>

**<http://www.disaster.info.desastres/1%20Departamento%20de%20Izabal.htm>

***<http://www.hechos.tvazteca.com/cgi-bin/hechos.sh/cgis/detalle?idcve=0x0002b9c1>

Nota 1: Criterios de inclusión - 25 muertes o más; o

- 125 lesionados o más;

- 10,000 evacuados o más; o 10 mil personas o más privadas de agua;

- 10 millones de US\$ o más en daños a terceros.

Exclusiones de:

- Derrames de aceite en el mar desde los barcos;

- Accidentes mineros;

- Destrucción voluntaria de barcos y aeronaves;

- Daños causados por productos defectuosos.

Nota 2: Muchos de los eventos incluidos no cuentan con costos del mismo.

En forma particular, los accidentes ocasionados en México por gas LP, van desde fugas e incendios de pequeña magnitud, hasta explosiones que pueden dañar la estructura de casas habitación, comercios e industrias. Un registro de dichos accidentes se encuentra en las bases de datos ACQUIM (**A**ccidentes **Q**uímicos), que recopila los accidentes ocurridos en fuentes fijas y tuberías, y ACARMEX (**A**ccidentes **C**arreteros en **M**éxico); que contiene información sobre accidentes ocurridos en el transporte. Estos sistemas computacionales han sido elaborados en el Área de Riesgos Químicos de CENAPRED-SEGOB.

Los accidentes que involucran gas LP en México afectan tanto zonas industriales como habitacionales. El accidente puede consistir en fuga, incendio, explosión o la combinación de ellos. De acuerdo a los resultados de la base de datos ACQUIM (2000), los accidentes se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

En la tabla 3.2 y figura 3.2 se presentan los porcentajes del tipo de accidente en fuentes fijas. Más del 40% esta representada por fugas seguida por explosiones con 21.5%.

Tabla 3.2 Tipo de eventos en donde se involucra gas LP (ACQUIM, 2000).

Evento	%
Fuga	42.5
Combinaciones	23.5
Explosión	21.5
Incendio	6.0
Otros	6.5

Nota: Información de enero de 1995 a diciembre de 1999.

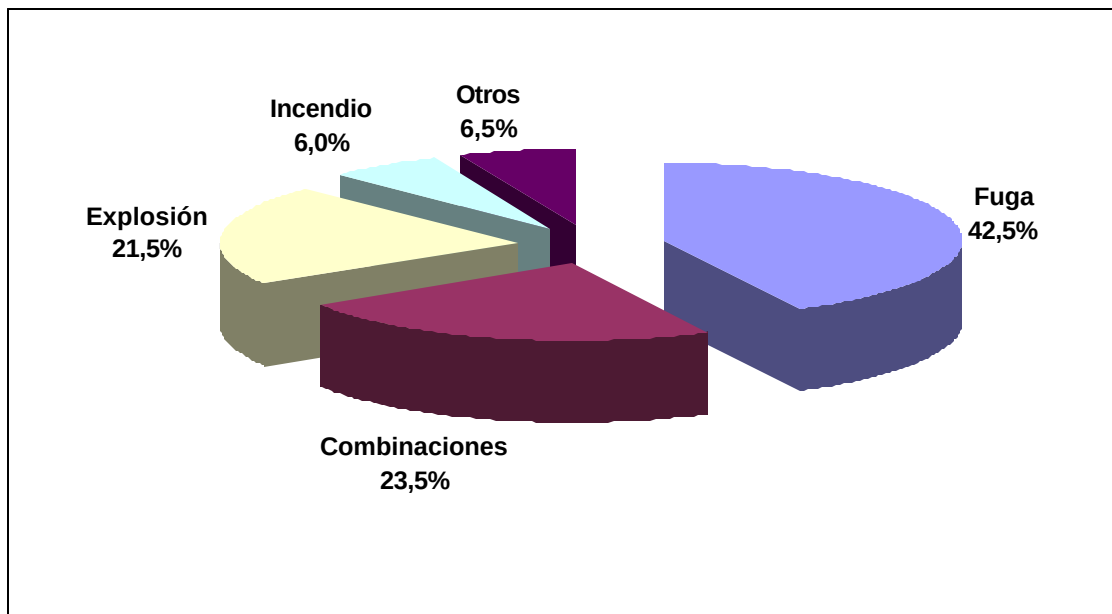
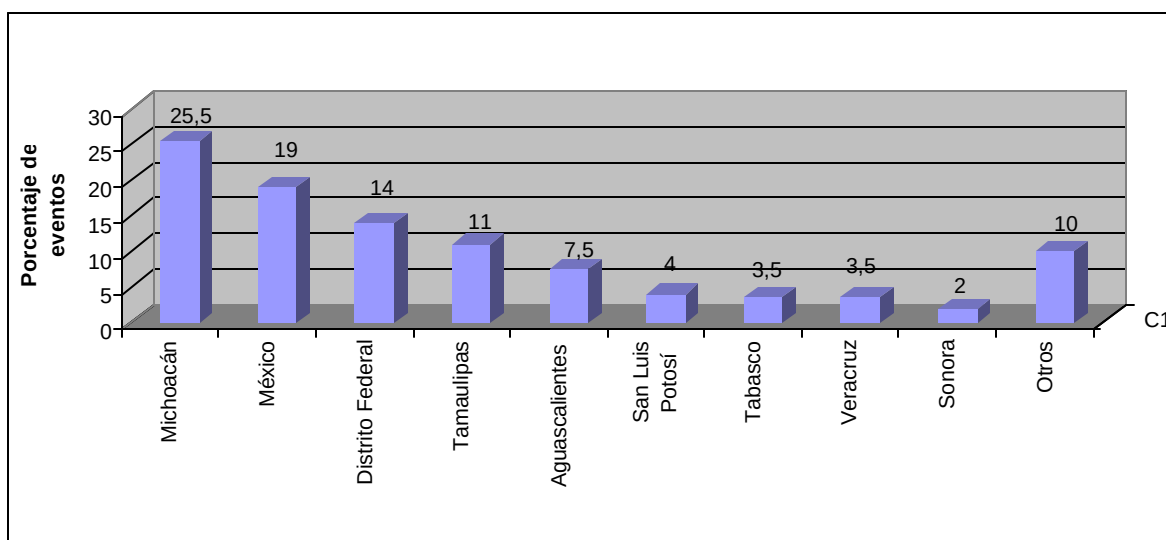


Figura 3.2 Distribución porcentual de tipo de eventos donde se involucra el gas LP.

En cuanto a la distribución de accidentes por estados se ha encontrado que Michoacán presenta el mayor porcentaje de eventos (25.5%), seguido por el Estado de México y el Distrito Federa con 19% y 14% respectivamente (Figura 3.3):



Nota: Otros incluye estados que presentan menos de 4 accidentes durante el período comprendido entre 1995 y 1999.

Figura 3.3 Distribución porcentual, por estado, de accidentes en fuentes fijas donde se involucra el gas LP (ACQUIM, 2000).

Como se observa, una parte importante de los eventos ocurre durante el transporte¹⁷ de materiales. Pueden ser de tipo carretero, ferroviario o marítimo (Tabla 3.1). Su magnitud y consecuencias dependen de factores tales como la cantidad, la forma de almacenamiento, las medidas de seguridad y la atención a la emergencia que se tenga contemplada con anterioridad, así como su cercanía a áreas habitacionales o centros donde se encuentre población que pueda ser afectada.

Especial atención merecen las medidas de seguridad que se deben observar en el transporte por carretera y caminos de México, ya que la mayor parte de la distribución de gas LP en zonas urbanas se lleva a cabo en camiones y autotanques, las cuales distribuyen cilindros de distintas capacidades, además de llenar los tanques estacionarios en casas habitación, industrias y comercios, respectivamente. En el caso particular del transporte carretero se cuenta con información sobre la distribución de accidentes que ocurren en cada estado del País (De la Cruz y Alcántara, 2000).

Las causas de ocurrencia de los accidentes se pueden deber a diversos factores. La correcta identificación de ellos permite planear y aplicar las medidas de prevención necesarias para disminuir el número de eventos que ocurren año con año. Entre las causas que han sido identificadas con mayor frecuencia, se encuentran las indicadas en la tabla 3.3 (ACARMEX, 2000). Asimismo en la gráfica 3.4 se muestra la distribución de accidentes por estado, en caminos y carreteras de México donde se encuentra involucrado el gas LP.

De acuerdo a los resultados registrados en la base de datos ACARMEX, una de las consecuencias después del choque entre vehículos, el impacto contra un objeto fijo o la salida del camino, es la fuga del material ya sea de los cilindros o de la pipa en la que va contenido. Es en este momento donde deben aplicarse las medidas de control de la emergencia por parte de los cuerpos de apoyo como son bomberos, brigadas de emergencia de las compañías involucradas en el evento y / o el personal de protección civil del área. Las causas principales por las que ocurren estos accidentes son por el exceso de velocidad (37.97%) con la cual son conducidos los vehículos así como por las fallas mecánicas (12.44%) de los mismos (ACARMEX, *op. cit.*).

¹⁷ En el caso del transporte, se considera como un accidente al que involucra la fuga o derrame de cantidades considerables de materiales o residuos peligrosos que pueden causar la afectación severa de la salud de la población y / o del ambiente (INE^a, 2001).

Tabla 3.3 Causas de accidentes en caminos y carreteras, en donde se involucra gas LP (ACARMEX, 2000).

Causa	Clave	%
Exceso de velocidad	EV	37.97
Fallas mecánicas	MEC	12.44
Causa desconocida	DES	11.62
Invasión de carril	IC	6.22
No reportado	NR	4.91
No ceder el paso	NCP	4.42
Choque	CHO	4.26
Perdida de control	PC	3.11
Distancia de seguridad	DS	2.62
Mala ejecución de vuelta	MEV	2.45
Cansancio	CAN	1.80
Explosión	EX	1.80
Peatón	P	1.64
Incendio	I	1.31
Camino	CAM	1.15
Estado de ebriedad	EBR	0.65
Falta de señalamiento	FS	0.65
Carga mal sujeta	CMS	0.33
Clima	CLI	0.33
Semoviente	SEM	0.33
Total		100

Respecto a la incidencia de accidentes carreteros en los estados (Figura 3.4) es el Estado de México el que presenta el mayor número de accidentes (14%), seguido de Michoacán, Puebla y Veracruz con 7%.

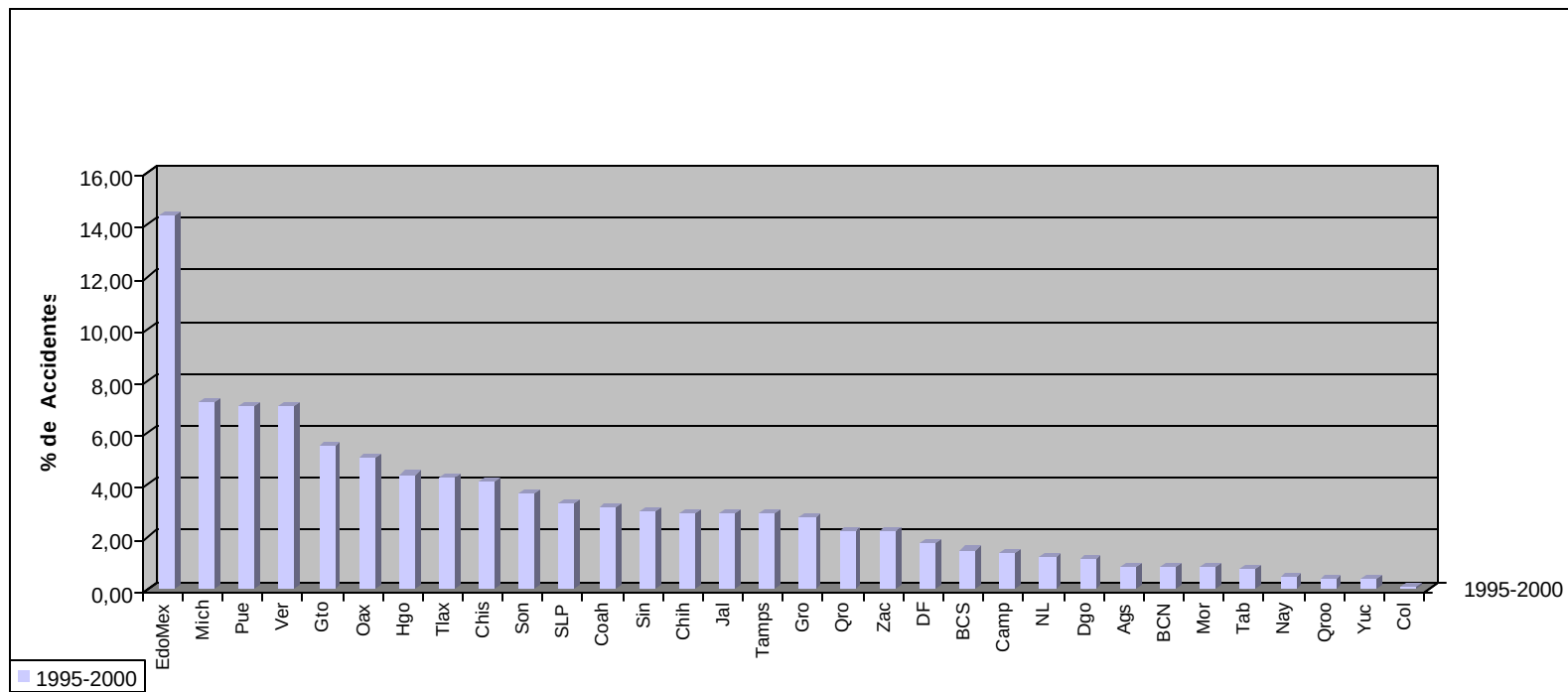


Figura 3.2 Distribución de accidentes en caminos y carreteras, en donde se involucra gas LP (ACARMEX, 2000).

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DEL RIESGO EN INSTALACIONES INDUSTRIALES

4.1 ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE RIESGOS

El análisis de la probabilidad de riesgos es un proceso de estimación basado en la ocurrencia de eventos que pueden causar daños al personal, a las instalaciones y a las comunidades. Matemáticamente el riesgo es función de la frecuencia probabilística, magnitud y costo, en términos de consecuencias económicas, a la salud, e incluso a los ecosistemas (Piccinini, 1998).

El riesgo se define como la probabilidad de que un evento adverso ocurra, y es función al menos de las variables probabilidad y consecuencia, tal y como se muestra en la ecuación 4.1 (Piccinini, *op. cit.*):

$$R = f(P, M) \quad (4.1)$$

donde:

- P Probabilidad que se verifique un evento
M Gravedad de las consecuencias o magnitud del evento

La evaluación del riesgo consiste en una evaluación técnica y científica de la naturaleza y magnitud del riesgo aplicando criterios objetivos para definir los efectos en la salud debido a la exposición de los individuos o poblaciones a contaminantes y situaciones peligrosas.

Para determinar una evaluación del riesgo usando la ecuación 4.1, es indispensable desarrollar tres actividades distintas de indagación:

- La primera de ellas es de tipo cualitativo (por ejemplo utilizando métodos de lista de verificación (check list o HAZOP¹⁸) en donde se identifican todos los posibles funcionamientos que causan consecuencias indeseables.
- La segunda actividad es usar los mal funcionamientos detectados o las consecuencias indeseables, para estimar mediante arboles lógicos (árbol de eventos o árbol de fallas, por ejemplo) la probabilidad de ocurrencia.
- La última actividad, evalúa para la misma serie de consecuencias su probabilidad (P).

Por lo anterior, se deben aplicar métodos que permitan describir el desarrollo de fenómenos físicos, tanto simples como complejos. De los análisis realizados se obtienen pares de datos [Probabilidad, Consecuencia] que representan la mejor estimación del riesgo asociado a un evento determinado. La relación 4.2 determina, de este modo, la consecuencia esperada del evento (o esperanza matemática):

$$(\text{Probabilidad de ocurrencia}) * (\text{Consecuencia del evento}) \quad (4.2)$$

Para una acción que pueda generar diversos resultados, el valor esperado se determina de la suma algebraica de los productos de cada resultado posible por su probabilidad. En un conjunto de n eventos, $\sum_{i=1}^n P_i * C_i$ es el valor medio de la consecuencia o valor medio de la distribución de densidad de la probabilidad de la magnitud del evento.

¹⁸ HAZOP: Hazard and Operability Studies / Análisis de riesgo y operabilidad.

Dado que para la mayor parte de los casos la probabilidad de que ocurra un evento debe ser estimada dentro de un intervalo de tiempo prefijado, la ecuación 4.1 puede representarse como:

$$R = f(F, M) \quad (4.3)$$

donde:

F Probabilidad que se verifique un evento dentro de un intervalo de tiempo determinado
M Magnitud del evento

Desde el punto de vista dimensional, la variable F se expresa como el inverso del tiempo por lo que muchos analistas la utilizan como frecuencia (Piccinini, 1998).

En el caso del riesgo tecnológico, los estudios de riesgo de seguridad de una planta deben considerar para cada evento importante no deseado, la cuantificación de las consecuencias del evento (magnitud, M) y la estimación de su probabilidad de ocurrencia (P). De esta manera, el valor calculado de R con la expresión 4.2 es el valor esperado de la pérdida.

Si se tiene en cuenta que la probabilidad de que ocurra un evento esta referido a un intervalo de tiempo, la expresión 4.2 toma la forma de la ecuación 4.4:

$$R = F * M \quad (4.4)$$

donde:

R riesgo tecnológico
F frecuencia
M magnitud

De acuerdo al intervalo de tiempo en el que puede ocurrir el evento, se puede realizar una clasificación como la mostrada en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Probabilidad de ocurrencia de eventos (UNEP^a, op. cit.).

Clase	Características
1. Improbable	Menos de uno en cada 1,000 años
2.	Uno entre 100 y 1,000 años
3. Poco probable	Uno entre 10 y 100 años
4.	Uno entre 1 y 10 años
5. Muy probable	Más de uno por año

La magnitud de las consecuencias, es decir las consecuencias de explosiones, difusión de nubes tóxicas o inflamables, e incendios, se expresan en términos del número de muertos, lesionados o evacuados, daños a las instalaciones y al medio ambiente (Tabla 3.1), así como, en algunos casos, pronósticos que se hacen a largo plazo sobre efectos predecibles, como daños por radiación, quemaduras o efectos crónicos por intoxicación.

La gravedad de las consecuencias ocasionadas por un accidente se estima en una escala, de 1 a 5, y de acuerdo a los efectos sobre el ser humano (en función del número de decesos y lesionados), al medio ambiente, a la propiedad y a la velocidad con que se propagan estos efectos (Zagal, 1996) (Tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5).

Tabla 4.2 Gravedad o consecuencias para la vida y la salud (Zagal, op. cit.).

Clase	Características
1. Poco importante	Incomodidad temporal
2. Limitado	Pocos lesionados, incomodidades por mucho tiempo
3. Grave	Lesionados e incomodidades graves
4. Muy grave	5-20 decesos, 20-100 heridos graves y hasta 500 personas evacuadas
5. Catastrófico	Más de 20 decesos, cientos de heridos graves y más de 500 personas evacuadas

Para casos de riesgo a la salud, se puede usar la siguiente expresión (Li Muller y Marsh, 1994):

$$\text{Riesgo} = \text{Severidad del evento (peligro)} * \text{Exposición}^{19}$$

La evaluación del riesgo a la salud humana implica conocer la probabilidad de las consecuencias adversas a la población humana debido a las perturbaciones en el ambiente. Generalmente se utilizan herramientas científicas, estadísticas y la modelación para analizar información relativa al riesgo. Los métodos utilizados en su evaluación tienen que ser biológicamente significativos (Li Muller y Marsh, 1994).

Los cuatro elementos principales que deben considerarse en la evaluación del riesgo a la salud son (Li Muller y Marsh, 1994):

- o Identificación del peligro,
- o Evaluación de la toxicidad,
- o Evaluación de la exposición, y
- o Caracterización del riesgo.

Dependiendo de la sustancia química involucrada, la evaluación del riesgo específico de un sitio o evento consiste en determinar la probabilidad de consecuencias adversas a la salud causadas por la presencia de ésta. Toma en consideración que varios contaminantes podrían estar presentes simultáneamente en el aire, suelo y/o en productos de consumo como alimentos, que alcanzan a los receptores a través de múltiples rutas de exposición (Li Muller y Marsh, 1994).

El primer paso en la caracterización del riesgo es determinar que poblaciones receptoras están presentes en o cerca del sitio así como medir el riesgo asociado con la presencia de sustancias químicas en los receptores identificados. El riesgo se estima mediante la

- o Evaluación de la toxicidad,
- o Evaluación de la exposición, y
- o Caracterización del riesgo.

La evaluación del riesgo por el manejo de materiales químicos considera la concentración y las características fisicoquímicas del contaminante en cada medio, las características ambientales y la presencia de receptores o blancos que puedan ser afectados.

¹⁹ Exposición: esta referida a factores como concentración y tiempo de exposición, así como la ruta de entrada al organismo.

Tabla 4.3 Gravedad o consecuencias para el medio ambiente (Zagal, op. cit.).

Clase	Características
1. Poco importante	Efectos localizados, sin contaminación
2. Limitado	Efectos localizados, con contaminación simple
3. Grave	Los efectos se propagan con contaminación simple
4. Muy grave	Efectos localizados con contaminación intensa
5. Catastrófico	Los efectos se propagan con contaminación muy intensa

Tabla 4.4 Gravedad o consecuencias para la propiedad (Zagal, op. cit.).

Clase	Características
1. Poco importante	Menos de 0.5
2. Limitado	Mayor a 0.5 y menor o igual a 1.0
3. Grave	Mayor a 1.0 y menor o igual a 5.0
4. Muy grave	Mayor a 5.0 y menor o igual a 20
5. Catastrófico	Más de 20

Tabla 4.5 Velocidad de propagación (Zagal, op. cit.).

Clase	Características
1. Se manifiesta clara y rápidamente (daños visibles en forma inmediata)	Efectos localizados y sin daños
2.	
3. Medianamente	Con alguna propagación y pequeños daños
4.	
5. No hay señales	Efectos con propagación rápida y efectos inmediatos (explosión)

Cada planta, por simple que sea, presenta diversos eventos potencialmente peligrosos, cada uno de ellos caracterizado por una magnitud (m_i) y una frecuencia estimada (f_i). Por lo tanto, el riesgo de la planta será la suma de los riesgos de todos los eventos:

$$R = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n m_i * f_i = \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i * f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \right] = M * F \quad (4.5)$$

donde:

R riesgo total de la planta
 r_i riesgo del evento i-ésimo
 m_i magnitud del evento i-ésimo
 f_i frecuencia del evento i-ésimo
F frecuencia total
M magnitud total

En el caso de contar con muchos eventos dentro del mismo campo de magnitud y frecuencia, se puede determinar una función matemática del tipo $F = F(M)$ y con esta, calcular la frecuencia acumulada de los eventos con una magnitud menor, igual o mayor que M. La ecuación 4.5 relativa a los eventos con magnitudes m_i , es la que se usa comúnmente.

4.1.1 Evaluación de las pérdidas causadas por los accidentes

Las pérdidas ocasionadas por un accidente pueden ser muy variadas y abarcan aspectos tan diversos como los siguientes:

- Pérdida de vidas humanas
- Daños físicos a las personas afectadas, ya sean de tipo temporal o permanente
- Daños psicológicos
- Aumento del nivel de estrés en los habitantes cercanos a la zona donde ocurre el accidente
- Daños materiales a las instalaciones industriales, al comercio o a la vivienda donde ocurrió el accidente
- Daños materiales a terceros ocasionados por las ondas de sobrepresión o incendio ocasionados por el accidente
- Daños al ambiente por incendio de zonas cercanas, emisión de materiales de combustión y/o la generación de ondas de calor.
- Daño moral de la empresa que almacena, distribuye y/o utiliza el gas LP, y que se ha visto involucrada de forma directa o indirecta en los accidentes, lo que puede reflejarse en una disminución del mercado que maneja
- Presiones sociales que implican una mejora en las medidas de seguridad de la empresa
- En casos extremos se puede llegar a hacer una reubicación de la empresa lejos de áreas habitacionales y/o comerciales

Una forma de realizar la evaluación de las pérdidas económicas es mediante ecuaciones numéricas que relacionan factores de probabilidad; éstas ecuaciones las usan, por ejemplo, las compañías de seguros para determinar la cobertura a la cual están sujetas las pólizas correspondientes. La llamada *cobertura de aseguramiento* es un modo racional para protegerse de los riesgos económicos implicados en el manejo de ciertos materiales. Una forma de evaluación mediante éste tipo de ecuaciones se indica a continuación (Piccinini, 1998):

1. Sea F la frecuencia de que suceda en un año un evento que pueda ocasionar un daño económico de magnitud M .
2. Si se llevan a cabo *obras de prevención* o mejoramiento en las medidas de seguridad establecidas, se espera que la disminución de la frecuencia sea de $F_i \rightarrow F_f$. De aquí, el riesgo resulta disminuido en $(F_i - F_f) * M_i$.
3. Si se realizan *obras de protección*, la magnitud del evento pasará de $M_i \rightarrow M_f$ y el riesgo disminuirá a $F_i * (M_i - M_f)$.
4. La cobertura de aseguramiento origina una recuperación, R , por lo que el valor de la magnitud (o pérdida económica) disminuye

De lo anterior resulta que al realizar obras de prevención y protección, además de usar la cobertura de aseguramiento, la disminución del riesgo económico puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$(F_i - F_f) * (M_i - R) + F_i * (M_i - M_f) \quad (4.6)$$

Al aplicar obras de mejoramiento se ocasionan inmovilizaciones de capital con una amortización anual (I) y un incremento (E) de los gastos de ejercicio (inspecciones, mantenimiento preventivo, entre otros). Por lo que respecta a las primas de seguros (A), ésta puede disminuir, en el caso de aplicar mejoras, $A_i \rightarrow A_f$.

Para determinar si es o no conveniente aplicar mejoras, puede compararse la disminución del riesgo económico con el incremento en gastos de ejercicio, amortización anual y disminución de las primas de seguros:

$$I + E - (A_i - A_f) = (F_i - F_f) * (M_i - R) + F_i * (M_i - M_f) \quad (4.7)$$

Nótese que la ecuación 4.7 es aplicable siempre y cuando la rentabilidad de la actividad industrial productiva evaluada permanezca dentro de un valor considerado como aceptable (Piccinini, 1998).

En lo que se refiere a las afectaciones de tipo físico y emocional en los individuos involucrados en un accidente también existen valores reportados, tanto por la Secretaría de Salud (SSa) como por las compañías aseguradoras. En muchos países se utiliza la unidad FAR (FAR = Fatal Accident Rate) que involucra a una víctima por 10^8 horas de trabajo, lo cuál equivale en la práctica a 1 víctima por cada 1,000 trabajadores expuestos al riesgo durante toda su vida laboral:

$$10^8 \text{ horas de trabajo} = 1,000 \text{ trabajadores} * 40 \text{ horas/semana} * 50 \text{ semana/año} * 50 \text{ años de trabajo}$$

Para calcular el impacto de un riesgo involucrado se requiere de bases probabilísticas obtenidas a través de la evaluación de parámetros y que se sustente en la determinación de falla a cada uno de los componentes de los sistemas involucrados en los procesos operativos, dividido entre el número de exposiciones al riesgo. Por lo que respecta a la severidad, ésta se determina por el número de personas afectadas, no necesariamente de consecuencias fatales.

Con estos dos elementos se determina el riesgo de las actividades peligrosas, tomando como punto de partida que el riesgo de muerte por causas naturales es del orden de $1.33 \cdot 10^{-2}$ / año (basado en el hecho de un promedio de vida cercano a los 75 años). En virtud de ello se ha determinado el riesgo como el número de daños causados a personas por año (Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Estimación del riesgo, considerando personas afectadas por año (Lees, 1991).

Accidente	Frecuencia (accidente/año)	Severidad (fatalidades / accidente)	Riesgo (fatalidad/año)
Fuga de amoníaco	1.369 E-4	200	2.738 E-1
Explosión por fuga de gas	1.920 E-4	70	1.340 E-2
Explosión de caldera	8.220 E-4	2	1.642 E-3
Fuga de cloro	1.000 E-4	200	2.000 E-6

Una vez que han sido definidos los tipos de frecuencia y severidad de la pérdida, es necesario establecer la clasificación de prioridades de los riesgos, de acuerdo a sus efectos adversos y a la necesidad de actuar preventivamente en caso de contingencia. Un ejemplo de aplicación, consiste en usar como elemento de evaluación las pérdidas económicas ocasionadas.

El costo implicado para cada una de las categorías se puede calcular en función del valor total de las instalaciones y los recursos perdidos por cada día de paro en el proceso de producción. De acuerdo al tipo de accidente causado, los accidentes se pueden clasificar en tres categorías (Lees, *op. cit.*):

Categoría 1 Son aquellos accidentes en los que de acuerdo con el estudio de seguridad y el análisis cuantitativo de riesgo, se prevea que tengan como única consecuencia daños materiales en la instalación accidentada, sin daños al exterior.

Categoría 2 Son aquellos accidentes en los que se determina que existan posibles víctimas y daños materiales a las instalaciones. Hay repercusiones exteriores pero estas se limitan a daños leves o efectos adversos sobre el ambiente en zonas limitadas.

Categoría 3. Son aquellos accidentes en los que se prevean consecuencias a posibles víctimas y daños materiales graves en la instalación y alteraciones leves o graves en el ambiente en zonas extensas en el exterior de las instalaciones.

De acuerdo con la clasificación anterior, los accidentes de categorías 2 y 3 son los considerados como mayores o catastróficos, mientras que los que reportan menor impacto son los de categoría 1 (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Prioridades calculadas con base en el monto monetario implicado en el evento (Lees, op. cit.).

Categoría	Frecuencia de Ocurrencia, %	Severidad de la pérdida, %	Costo estimado (millones de dólares)
3	5 - 6	21 al 100	4.8 a 14.4
2	1 - 4	4 al 20	0.11 a 4.81
1	Menor a 1	Menor a 4	0.003 a 0.10

En México, ninguna ley o norma establece niveles de aceptabilidad del riesgo en instalaciones industriales potencialmente peligrosas; la determinación del grado de riesgo lo llevan a cabo, en forma particular, las empresas interesadas, aunque existan valores recomendados. Para el caso del gas LP, el criterio de riesgo aceptable es de 10^{-7} para las personas que se encuentran expuestas en mayor medida, como son los trabajadores de la empresa.

En cuanto a los daños físicos ocasionados a las instalaciones, puede utilizarse el análisis de consecuencias que permite determinar tanto un factor de consecuencia del daño y un factor de salud. La categoría de consecuencia de daños se determina a partir de una combinación de siete elementos o subfactores que determinan los riesgos de explosión y/o fuego (Angelsen & Drake, 1999):

1. Probabilidad de ignición.
2. Cantidad que pueda escapar
3. Capacidad para pasar a fase vapor
4. Posibilidad de pasar de condiciones ligeras a serias
5. Existencia de equipos y personal de emergencia en el lugar del evento
6. Grado de exposición sufrida
7. Efectos del daño en la disminución de producción, revisiones y reparaciones.

Con el análisis de consecuencias se puede obtener una matriz de resultados que puede ayudar a identificar áreas y unidades de proceso que requieren una mayor inspección y/o la consecuente aplicación de modificaciones, como pueden ser prácticas más precisas de mantenimiento preventivo para lograr una disminución de los riesgos identificados.

4.2 MODELOS DE ANÁLISIS DE RIESGO INDUSTRIAL

El análisis de riesgo en las instalaciones industriales requiere tomar en consideración todas las variables que condicionan la operación de los procesos que en ellas se realizan, por lo que debe plantearse la probabilidad de las posibles variaciones o fallas que pueden ocurrir, y determinar las consecuencias de los eventos generados, lo que permite el desarrollo de un plan de emergencia que contemple la capacidad de respuesta de la instalación. Por esta razón, los objetivos y metodología para preparar un análisis de riesgos deben ser vistos en el contexto de un plan global.

La elaboración de planes de emergencia no es una tarea fácil ya que las causas y las consecuencias que se pueden ocasionar son muy variadas, por lo que es necesario evaluar una a una las diversas etapas de las cuales consta el proceso.

Al presentar los resultados es muy importante recordar que la finalidad de un análisis de riesgos es entregar la información lo más objetiva para tomar decisiones documentadas y justificables (Piccinini, 1998).

Las causas de los accidentes en plantas de proceso muestran que estas pueden clasificarse excluyendo causas naturales (tormentas, heladas, sismos, etc.) y eventos externos (proximidad a instalaciones peligrosas, incendios externos, etc.) en tres grupos (Piccinini, 1998):

1. Falla de componentes.
 - a) Diseño inapropiado a presión interna, fuerzas externas, corrosión del medio y temperatura.
 - b) Falla de equipos, como bombas, compresores, ventiladores, agitadores, etc.
 - c) Falla de los sistemas y/o equipos de control (sensores de presión, temperatura y nivel, reguladores de flujo, controladores de nivel, etc.)
 - d) Falla de los sistemas específicos de seguridad (válvulas, discos de ruptura, sistemas de alivio de presión, sistemas de enfriamiento o calentamiento, etc.).
 - e) Falla de juntas, bridas y conexiones.
2. Desviación de las condiciones normales de operación.
 - a) Alteraciones de las condiciones de operación (presión, temperatura, flujo, concentración, etc.), tanto de tipo automático como manual.
 - b) Errores en la adición manual de materiales químicos.
 - c) Errores en los servicios auxiliares, tales como agua de enfriamiento, vapor de calentamiento, aire de presión para instrumentos, falta de agentes inertizantes, entre otros.
 - d) Fallas en los procedimientos de arranque o paro de procesos.
 - e) Formación de productos, subproductos o residuos, que puedan originar reacciones colaterales indeseables.
3. Errores humanos y de organización.
 - a) Errores de operación.
 - b) Desconexión manual de sistemas de seguridad debido a la activación automática por falsas alarmas.
 - c) Confusión en la identificación y manejo de sustancias peligrosas.
 - d) Errores en los sistemas de comunicación interna de la planta.
 - e) Incorrecta reparación o mantenimiento de equipos y/o instalaciones.
 - f) Realización de trabajos no autorizados (soldadura de equipos, entrada en espacios confinados, sustitución de válvulas, sensores o sistemas de detección, etc.).

Respecto a los errores humanos y de organización, éstos suelen suceder debido a la falta de conocimiento de los riesgos que implican los procesos, a insuficiente capacitación y adiestramiento del trabajo que se realiza o cansancio mental y/o psíquico del personal.

Para decidir si un riesgo es o no aceptable, se requiere estimar de alguna forma su magnitud, lo que implica un estudio previo. El análisis de riesgos significa desarrollar una estimación cualitativa o cuantitativa del nivel del riesgo potencial de una actividad, referido tanto a personas, al ambiente y a propiedades, en términos de la magnitud del daño y la probabilidad de que tenga lugar.

Los resultados obtenidos se usan para la toma de decisiones (administración de riesgos), ya sea mediante la jerarquización de las estrategias de reducción de la probabilidad de que ocurra un evento, mediante la comparación con los niveles de riesgos fijados como objetivo en una determinada actividad.

De acuerdo con Montague (1990), se ha determinado una serie de factores que influyen en la selección de una técnica apropiada de análisis de riesgos, como son:

1. Objetivo de estudio (se escoge el peor caso)
2. La complejidad del proceso químico
3. La edad de la planta o proceso
4. Los datos requeridos en el estudio
5. Las fuentes disponibles para el estudio
6. El nivel de experiencia (o pericia) requerido en el uso de técnica
7. Consecuencias potenciales de accidentes

Para reducir los riesgos industriales, se hace un diagnóstico de seguridad de la planta o proceso industrial, utilizando una serie de preguntas mediante las que se determina cuáles son esos riesgos, su

magnitud, la aceptabilidad de los mismo y la forma en que pueden minimizarse, o incluso eliminarse. La respuesta a cada una de estas preguntas se puede satisfacer a través de la aplicación de un análisis de riesgos.

En la estimación del riesgo asociado a una actividad en particular, como en el caso de plantas de almacenamiento de gas LP, se debe evaluar la magnitud de las consecuencias y la probabilidad de ocurrencia. En dichas estimaciones, los efectos que asumen un rol importante son el grado de exposición (concentración de la sustancia), el tiempo de exposición, las características del agente de riesgo, las dimensiones de la superficie que pudiera resultar afectada, la presencia y / o cercanía de grupos de población, animales, plantas y bienes de propiedad y la naturaleza del efecto nocivo (Piccinini, 1998).

Asimismo, a nivel internacional se han desarrollado diversas metodologías y modelos para la evaluación y estimación de riesgos. En el área química, los elementos más comúnmente usados son (Cassidy, 1999):

- A) La identificación del uso de sustancias y su vía de entrada (y la importancia de la búsqueda de un peligro o riesgos en un sistema equivalente)
- B) Entre los métodos *clásicos* de evaluación de consecuencias, puede encontrarse a los siguientes:
 - a) Métodos comparativos:
 - Listas de verificación de procesos / sistemas
 - Revisión / Auditoria de seguridad
 - Valor de riesgo relativo (por ejemplo, los índices Mond y Dow)
 - Análisis preliminar de peligros
 - b) Métodos fundamentales:
 - Estudios de peligro y operabilidad
 - Análisis:
 - ⇒ ¿Qué pasa sí...? (What if...?)
 - ⇒ Falla de modo y efecto
 - ⇒ Falla de modo, efecto y condiciones críticas
 - ⇒ Fallas orientado a metas
 - c) Métodos de diagramas lógicos:
 - Análisis
 - ⇒ Árbol de fallas
 - ⇒ Árbol de eventos
 - ⇒ Causa - Consecuencia
 - ⇒ Confiabilidad humana
- C) En el control: la aplicación y reforzamiento de los estándares técnicos, operativos y legales.
 - a) Paquetes de información y descripción
 - b) Sistema de justificaciones descriptivas y analíticas
- D) En la mitigación: la planeación en el sitio de emergencia
 - a) Planeación de la atención de la emergencia
 - b) Información para aquellos que pueden ser afectados por los riesgos
 - c) Control sobre usos incompatibles de suelo
 - d) Control en sitio de las fuentes de riesgo

A continuación se revisan algunos de los métodos de análisis de riesgos que pueden ser aplicados para instalaciones que se dedican al almacenamiento y distribución de gas LP.

4.2.1 Listas de verificación (Check list)

Una de las herramientas más comunes en la identificación de riesgos son las listas de verificación. Estas se utilizan para comprobar el cumplimiento de las revisiones para detectar los puntos críticos en donde se pueden presentar fallas o peligros, dentro de empresas pequeñas que emplean tecnología muy conocida. En

empresas de mediano tamaño se puede utilizar para revisar el manejo de sistemas, en general, y de todas las etapas por las cuales pasa un proyecto. Obviamente para cada etapa del proyecto deben utilizarse listas de verificación particulares en donde se evalúen las propiedades básicas de los materiales, diseño detallado del proceso, operación y auditoria, entre otros elementos (PUMA, 1995).

Una lista de verificación debe ser utilizada para un fin particular y una etapa específica del proceso. La preparación de la lista debe llevarla a cabo un ingeniero experto y familiarizado con el funcionamiento de la planta del proceso y conocedor de los procedimientos con la finalidad de que se evalúen los puntos de seguridad de importancia crítica (PUMA, 1995).

Entre los elementos a evaluar por una lista de verificación, aplicable a una planta de gas LP, se encuentran los siguientes (ITSEMAP, 1995):

Inflamabilidad

- ❖ Temperatura de autoignición
- ❖ Temperatura de inflamación
- ❖ Agentes extintores
- ❖ Relación de concentración mezcla /combustible

Explosividad

- ❖ Límite inferior de explosividad (LIE)
- ❖ Límite superior de explosividad (LSE)

Toxicidad

- ❖ Valor Umbral Límite (TLV) (Threshold limit value).
- ❖ Concentración máxima permisible (MAC) (Maximum allowable concentration)
- ❖ Límite de Exposición a corto plazo (STEL) (Short term exposure limit).
- ❖ Equipo de protección personal

Corrosión / Compatibilidad

- ❖ Sustancias fuertemente ácidas / básicas
- ❖ Compatibilidad de materiales de contención
- ❖ Equipos de protección personal necesarios

Residuos

- ❖ Posibilidad de descarga de gases
- ❖ Descarga de líquidos
- ❖ Disponibilidad de suministro de gas inerte
- ❖ Detección de fugas

Almacenamiento

- ❖ Contención de vertidos
- ❖ Compatibilidad de materiales
- ❖ Estabilidad del almacenamiento

Electricidad estática

- ❖ Tierra física adecuada
- ❖ Conductividad de materiales

Reactividad

- ❖ Temperaturas críticas
- ❖ Efectos de impurezas

Su desventaja principal es que cualquier aspecto no incluido en la lista quedará sin analizar. Lo más conveniente es que las preguntas no sean contestadas sólo con un si o un no, sino que requieran pensar cuidadosamente en la respuesta.

4.2.2 Estudio de Riesgo y Operabilidad (HAZOP)

Un estudio complementario a la técnica de identificación de riesgos es la familia de técnicas conocida como “Estudios de Riesgos y Operabilidad” (*Hazard and Operability studies*, **HAZOP**). Este método desarrollado por la compañía ICI, en la década de los años sesenta, para su aplicación en el diseño de plantas de plaguicidas, con la finalidad de detectar situaciones de inseguridad (Lees, 1991).

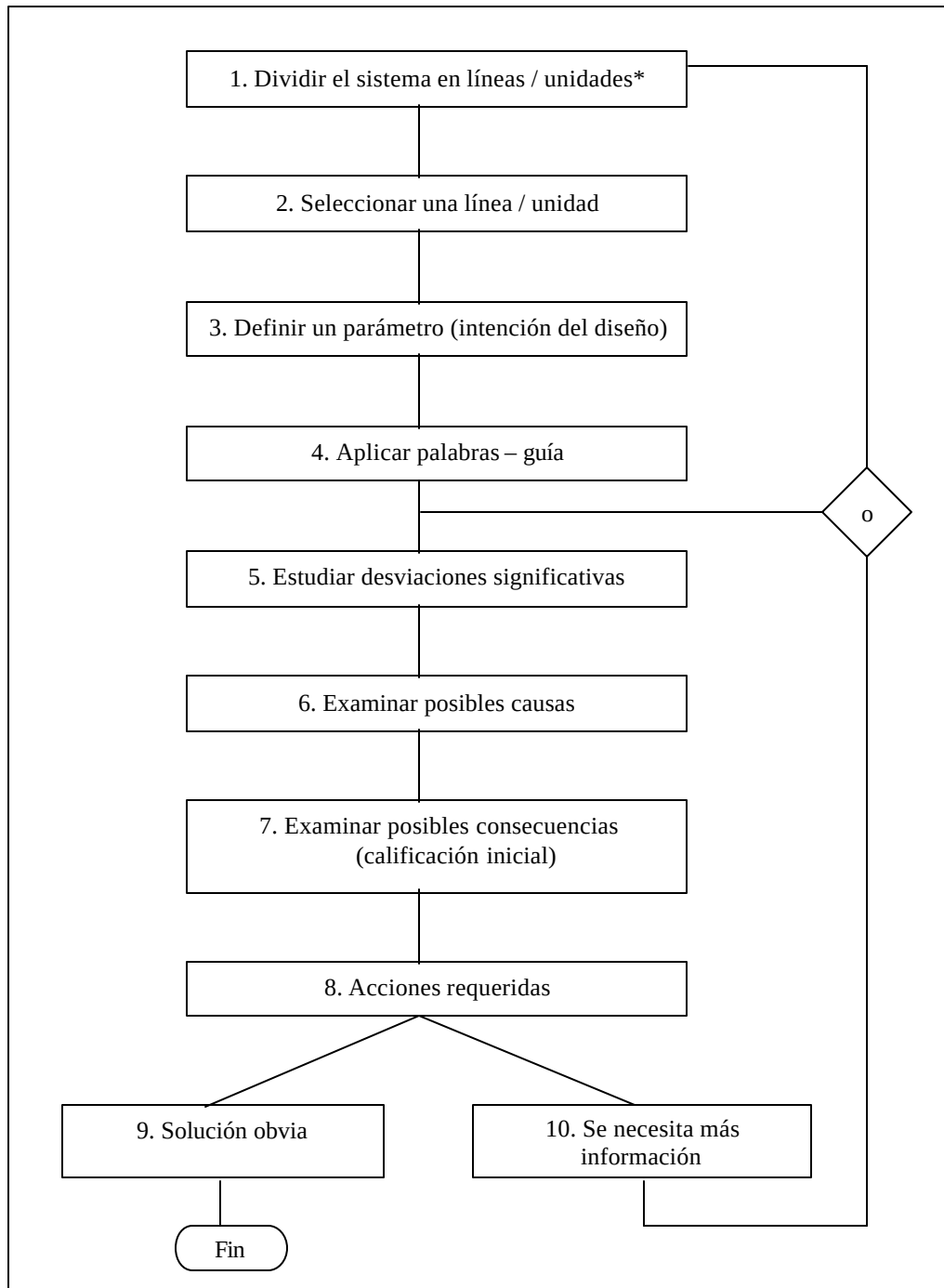
Los estudios deben ser llevados a cabo por un equipo multidisciplinario que revise cuidadosamente el proceso para detectar los riesgos potenciales y los problemas operacionales, logrando la identificación de eventos indeseables de alto riesgo a través del análisis de los mecanismos operativos de cada empresa, estimando la extensión, magnitud y probabilidad de los efectos. El nivel de detalle y la composición del equipo de trabajo debe realizarse de acuerdo a las características particulares del proceso y la instalación analizada.

Como información inicial para este estudio se pueden utilizar listas de verificación. Sin embargo, hacer uso de métodos cuantitativos sofisticados presenta la desventaja de que los resultados involucran una incertidumbre considerable.

El concepto básico del estudio HAZOP es realizar una descripción completa del proceso y analizar cada parte de éste para determinar las posibles desviaciones del proceso, las causas que los originan y las distintas consecuencias que pueden presentarse. Esto se realiza de forma sistemática aplicando una guía de palabras clave. Algunas de las más importantes son:

- 1) Intención
- 2) Desviaciones
- 3) Causas
- 4) Consecuencias
 - a) Riesgos
 - b) Dificultades de operación

El análisis de un sistema en particular se puede llevar a cabo usando el procedimiento indicado en la figura 4.1 (ITSEMAP, 1995).



* Línea /unidad: equipo o proceso en particular sujeto a análisis.

Figura 4.1 Sistema del análisis HAZOP (Modificado de ITSEMAP, 1995)

4.2.3 Índice Dow (Dow Chemical Company's Fire and Explosion Index).

Este indicador intenta cuantificar anticipadamente daños potenciales ocasionados por incendios y explosiones, identificando las causas y a los generadores, asignando a los riesgos potenciales una valoración económica que permite jerarquizar decisiones.

Fue creado por la compañía Dow Chemical, y su propósito original fue servir como guía para la selección de métodos de protección de incendio.

La cuarta edición publicada sobre el índice Dow contiene una evaluación del daño máximo probable a las propiedades (**Maximum Probable Property Damage**, (MPPD)), el cual es determinado de los **índices de incendio y explosión (I y E)**. Esta también introduce un **índice de toxicidad (IT)**, que se calcula en forma independiente.

El procedimiento para calcular el IyE y el MPPD se muestra en la siguiente figura:

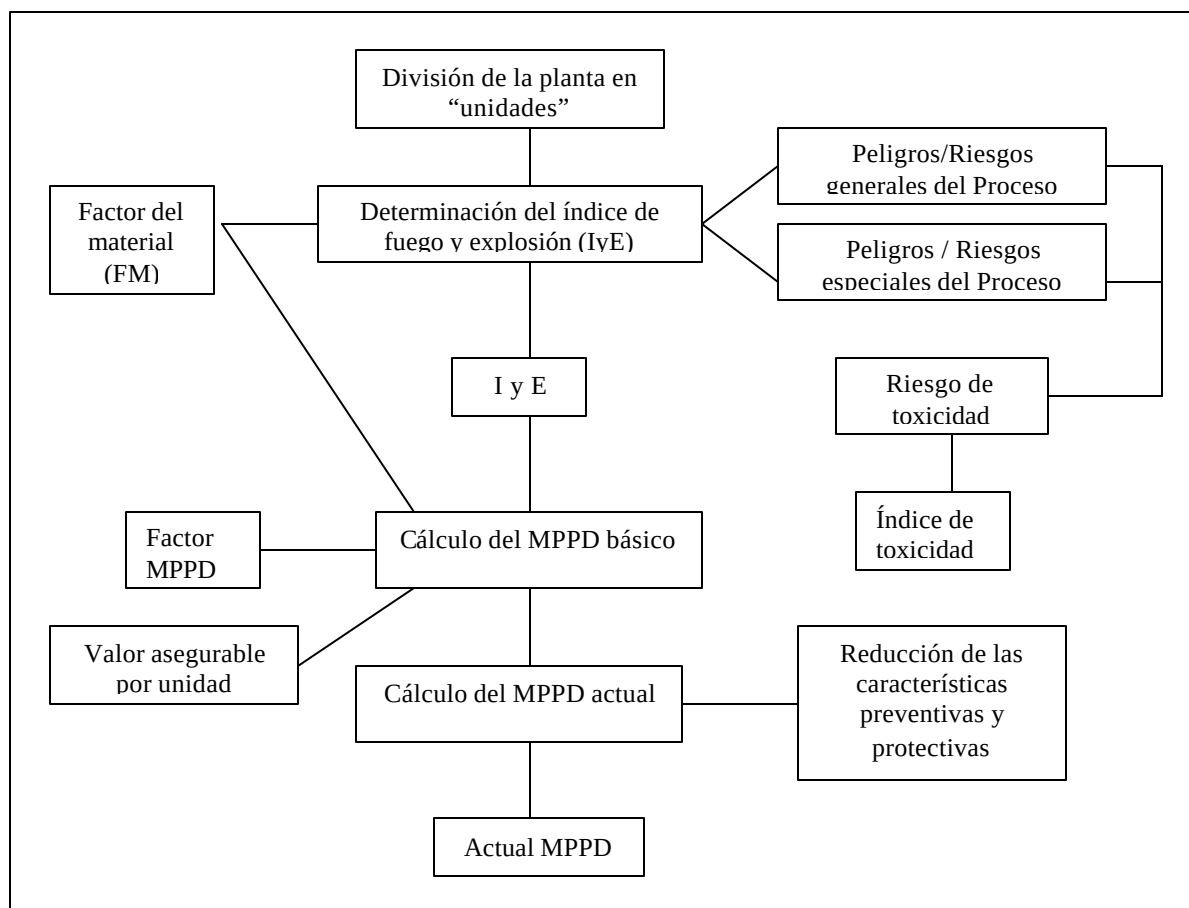


Figura 4.2 Procedimiento de cálculo del IyE y MPPD (Modificado de Dow Chemical Company) (Dow^a, 1976, Lees, 1991)

El IyE es un número que indica el manejo de fuego y/o explosión de una unidad particular. Los factores que se utilizan en el cálculo de este índice son (Aguilar, 1999).:

1) Factor del material.

Representa una medida de la energía potencial de los materiales más peligrosos o la mezcla de los materiales presentes en la unidad en la cantidad suficiente para ser considerados como riesgosos; es decir, es una medida de la intensidad de energía liberada por la sustancia o compuesto. Al factor del material (FM) se le asigna un valor entre 1 a 40 que se determina usando solamente dos propiedades: inflamabilidad y reactividad, ambas caracterizadas por la inestabilidad y la reactividad al agua de la sustancia química; se puede obtener de tablas o

mediante cálculo numérico. Este factor se debe determinar para todas las sustancias peligrosas que existan en la planta o proceso industrial sujeto a análisis.

- 2) Riesgos generales de proceso
- 3) Riesgos especiales del proceso

Este sistema separa cada proceso industrial en sectores específicos identificando materiales, actividades y propiedades termodinámicas relevantes, requiriendo un diseño preciso de la unidad industrial analizada, diagramas de flujo, información económica de costos y beneficios, y formatos sistematizados de reporte, entre otros elementos.

En este método, al igual que en el del índice Mond (el que se verá posteriormente), se asignan penalizaciones y bonificaciones dependiendo de las características de la planta. Las penalizaciones consideran condiciones de la unidad / planta que pueden contribuir a la aparición de un accidente, como son:

- características de la reacción,
- severidad de los parámetros de operación (presión, temperatura),
- cantidad de producto involucrado, y
- efecto dominó, entre otras.

Las bonificaciones se asignan dependiendo de las características de la unidad que pueden mitigar los posibles accidentes, como son:

- condiciones de seguridad de la unidad,
- sistemas de emergencias, control de emergencias,
- contención de derrames y/o fugas, y
- protección contra incendios, entre otras.

La organización de la información necesaria sobre la evaluación de los índices de toxicidad, incendio y explosión, es común utilizar hojas de datos prediseñadas (Tabla 4.8); algunos de los datos sobre propiedades físicas y químicas necesarios para su llenado son obtenidos de la Asociación Nacional de Protección contra Incendios de los Estados Unidos (National Fire Protection Association (NFPA)).

Tabla 4.8 Hoja de cálculo del índice Dow (Modificado de Dow^b, 1981).

INDICE DOW			
Nombre			Fecha
Localización			Número
Planta	Unidad	A cargo de	
MATERIAL Y PROCESOS			
Materiales		Disolventes	
FACTOR DEL MATERIAL			
RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (RGP)			
	Penalización	Penalización usada	
A. Reacciones exotérmicas	0.2 a 1.25		
B. Reacciones endotérmicas	0.2 a 0.4		
C. Transferencia y manejo de materiales	0.5 a 0.6		
D. Unidades de proceso cerradas	0.3 a 0.6		
Añádase RGP_{tot}			
FM * (1+ RGP_{tot})			

Tabla 4.8 (Continuación) Hoja de cálculo del índice Dow (Modificado de Dow^b, 1981).

INDICE DOW			
RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (REP)			
	Penalización	Penalización usada	
Temperatura del proceso			
G. Superior al punto de inflamación	0.25		
H. Superior al punto de ebullición	0.6		
I. Superior al punto de autoignición	0.75		
Presión baja (sub-atmosférica)			
J. Riesgo de formación de peróxido	0.5		
K. Sistema de acopio de hidrógeno	0.5		
L. Destilación al vacío (P>0.67 bar)			
Operación en o cerca de condiciones de inflamabilidad			
M. Líquidos inflamables y GLP almacenados en tanques en el exterior	0.5		
N. Confianza en instrumentos y/o N ₂ o purga de aire para quedar fuera del campo de inflamabilidad	0.75		
O. Siempre en condiciones de inflamabilidad	1.0		
P. Presión de servicio (P=presión)	0.435 log (P)		
Temperatura baja			
R. Entre -30 y 0°C	0.3		
S. Inferior a -30°C	0.5		
Cantidad de material inflamable			
T. En proceso	Y		
U. Almacenamiento	Y		
V. Corrosión y erosión	0.1 a 0.5		
W. Fugas por uniones y empaques	0.1 a 1.5		
Añádase RPE			
I y E = FM * (1+RGP _{tot}) * (1+REP _{tot})			
ÍNDICE DE TOXICIDAD			
T = (T _h + T _s)/100 * (1+RGP _{tot} + REP _{tot})			

En el cálculo de los Riesgos Generales de Proceso (RGP) también puede ser tomado en consideración lo siguiente (Dow, *op. cit.*):

- E. el acceso a equipos de emergencia (penalización 0.20 a 0.35), y
- F. el drenaje y control de derrames (penalización (0.25 a 0.50).

El valor del Riesgo General de Proceso (RGP) se calcula como (Dow, *op. cit.*):

$$RGP = 1 + (A + B + C + D + E + F) \quad (4.8)$$

Dentro de los Riesgos Especiales del Proceso (REP) se pueden considerar algunas características del proceso que pueden incrementar la magnitud de un probable incidente. En caso de que exista la presencia de dispositivos de presión (Q), éste debe ser incluido en el cálculo; el valor de penalización es de 0 a 1.0. Este valor se determina a partir de una gráfica, en función del ajuste del dispositivo de alivio, modificado en función de las características del fluido (Aguilar, 1999).

El factor de penalización para la cantidad de material inflamable (en proceso y/o en almacenamiento), determina por medio de gráficas, en función del calor total en BTU para líquidos y gases, y en función de la cantidad en libras para combustibles sólidos (en caso de existir) en almacenamiento.

El valor del Factor de Riesgos Especiales (REP) se determina como (Dow, *op. cit.*):

$$REP = 1 + (G + H + I + J + K + L + M + N + O + P + Q + R + S + T + U + V + W) \quad (4.9)$$

El **F**actor de **R**iesgo de la **U**nidad (**FRU**) es la medida de la magnitud del daño probable, debido a la exposición a la combinación de factores; tiene un valor entre 1 y 8, y se calcula en la siguiente forma (Dow, *op. cit.*):

$$FRU = RGP * REP \quad (4.10)$$

En cuanto al Factor de Daño, es un indicador de la magnitud del daño probable; se obtiene a partir de una gráfica en función del factor de riesgo de la unidad (FRU) y del factor de material (FM) (Dow, *op. cit.*).

Finalmente, el índice de fuego y explosión (IyE) , representa la probabilidad de daño por fuego o explosión en un área de cierto radio. Tal como se indica en la tabla 4.8, su forma de calcularlo es:

$$I y E = FM * (1+RGP_{tot}) * (1+REP_{tot}) \quad (4.11)$$

El diagrama de flujo para llevar a cabo el cálculo del índice Dow, y como complemento a la figura 4.2, se muestra en la figura 4.3.

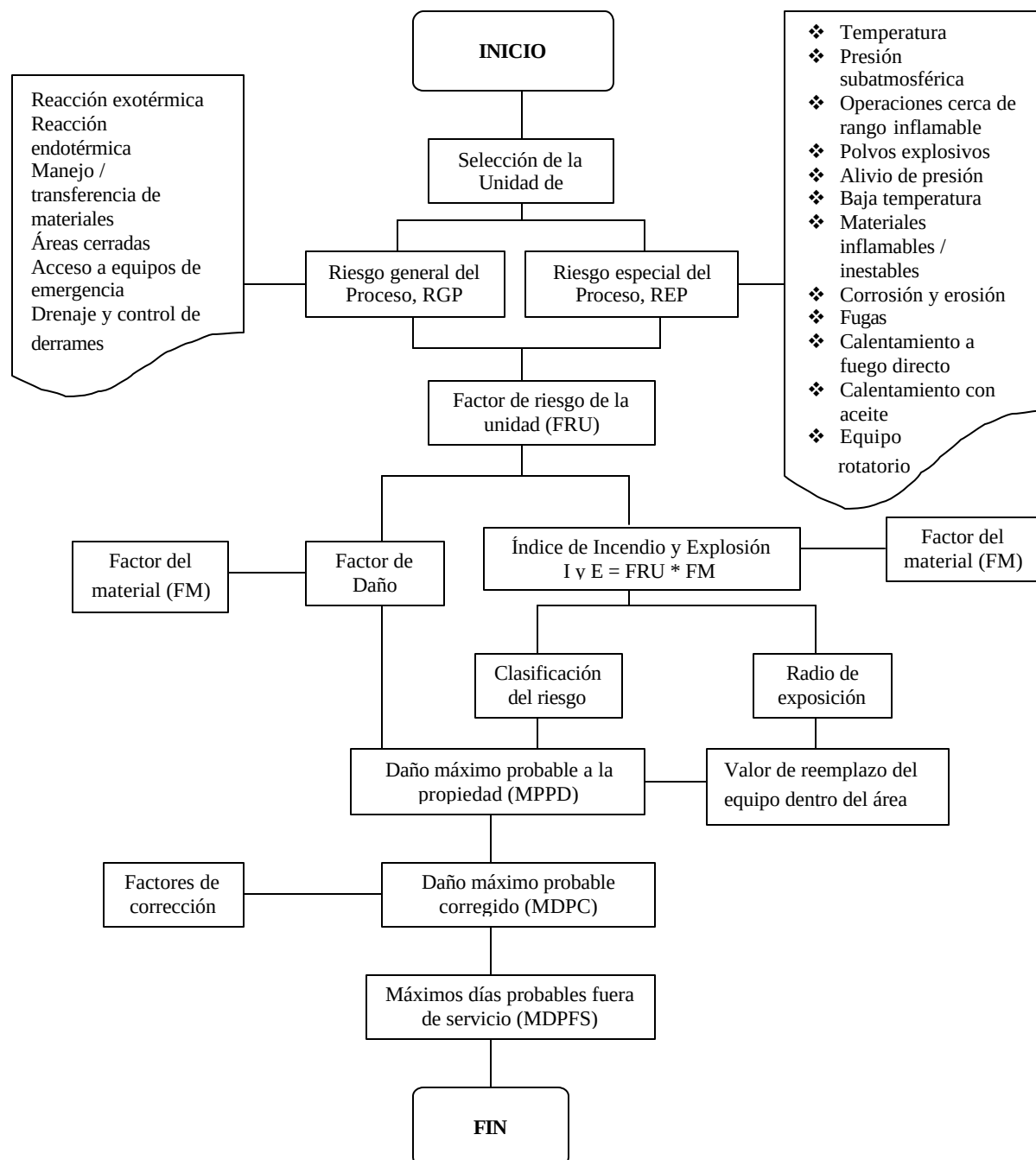


Figura 4.3 Diagrama de flujo para el cálculo del índice Dow (Aguilar, 1999).

De acuerdo a los índices de toxicidad, incendio y explosión obtenidos en el análisis Dow, se pueden establecer tres categorías. La categoría I agrupa a los elementos con el menor riesgo potencial y la III representa el mayor riesgo potencial (Tabla 4.9). Cuando en los resultados se obtienen valores de índices de diferentes categorías para Incendio, Explosión y Toxicidad, se toma en consideración el índice más alto (Dow^b, 1981).

Tabla 4.9 Clasificación de los riesgos según el valor del índice Dow (Dow^b, 1981).

Categoría	I y E	T
I	$F < 65$	$T < 6$
II	$65 \leq F < 95$	$6 \leq T < 10$
III	$F \geq 95$	$T \geq 10$

Así, el daño máximo probable a la propiedad (MPPD), propia de la instalación o externa a ella, se determina como:

$$\text{MPPD} = (\text{Valor de Reemplazo} + \text{Valor de Inventarios}) * \text{Factor de daño} \quad (4.12)$$

El Valor de Reemplazo (VR) se puede determinar como (Aguilar, 1999):

$$\text{VR} = \text{Costo original} * 0.82 * \text{Factor de escalación} \quad (4.13)$$

Donde 0.82 representa un factor de corrección por partes no sujetas a reemplazo, por ejemplo, la preparación del sitio, cimentación, ingeniería, líneas subterráneas, etc.

El Valor de Inventarios, en la ecuación 4.12, incluye productos, materiales y materia prima; considerando el 80% de la capacidad de los tanques de almacenamiento, 70% de la capacidad en bodegas y la capacidad de diseño de los recipientes y líneas de proceso.

4.2.4 Índice Mond

Este método se basa en el cálculo de la peligrosidad de los productos involucrados y en el carácter crítico de los procesos en función de sus antecedentes de operación en instalaciones similares. Permite obtener índices numéricos de riesgo para cada sección de las instalaciones industriales, en función de las características de las sustancias manejadas, de su cantidad, del tipo de proceso, y de las condiciones específicas de operación (Beltrán, 1996).

La información mínima requerida para realizar el estudio Mond y obtener los índices de fuego, explosión y toxicidad se presenta, en forma esquemática, en la tabla 4.10.

El material sujeto a análisis se selecciona de acuerdo al de mayor riesgo de la unidad, dependiendo del grado de inflamabilidad o energía potencial explosiva y de la cantidad requerida para ser considerada como peligrosa. Si hay más de un material, se deben hacer cálculos separados basados en cada uno de ellos y considerar el que ocasione consecuencias más severas (Aguilar, 1999).

Los factores a determinar para este estudio son los siguientes (Aguilar, 1999, Lees, 1991):

- ❖ Factor del material (B).
Es una medida del fuego, explosión o energía potencial liberada por el material, a una temperatura de 25°C a presión atmosférica, en estado sólido, líquido o gaseoso.
- ❖ Riesgos especiales de la sustancia (M).
Su propósito es tomar en consideración las propiedades específicas del material o cuando se mezcle con otros materiales como son catalizadores. Los factores de riesgo se asignan en función de las circunstancias del uso del material y no se definen por las propiedades del material aislado.
- ❖ Riesgo general del proceso (P).
Indica los cambios químicos que ocurren en el material así como el sitio en donde éstos suceden.
- ❖ Riesgo especial del proceso (S).
Sirve para determinar las condiciones físicas a las cuáles se encuentra sujeto el material. En este apartado se debe indicar la temperatura a la cual se desarrolla el proceso (en grados Kelvin).

- ❖ Riesgo de inventario (Q).
Indica el riesgo originado por la cantidad de material presente, incluyendo aquel que se encuentra en tuberías, tanques y recipientes de proceso.
- ❖ Riesgos por tipo de construcción y disposición (L) de los equipos e instalaciones.
En este rubro se incluye la altura (H) a la cual se encuentran los equipos, y la superficie de trabajo (N) ocupada por estos.
- ❖ Riesgo de toxicidad (T).

Tabla 4.10 Hoja de cálculo del índice Mond (PUMA, 1995).

ÍNDICE MOND DE INCENDIO, EXPLOSION Y TOXICIDAD				
Nombre			Fecha	
Localización			Número	
Planta	Unidad		A cargo de	
MATERIAL Y PROCESOS				
Sustancias		Productos		
Catalizadores		Presión (Bar)		
Productos intermedios		Temperatura (°C)		
Solventes		Reacciones		
II. FACTOR DEL MATERIAL				
Observaciones:				
Sustancia o Mezcla				
Calor de combustión, formación o reacción (Kcal/g)				
Total B=				
II. RIESGOS ESPECIALES DE LA SUSTANCIA				
	Factor sugerido	Factor usado	Letra del factor	Valor reducido
Sustancia oxidante	0 a 20			
Reacción con agua produce gas combustible	0 a 30			
Características de mezclado o polimerización	-60 a 60			
Sujeta a calentamiento espontáneo	30 a 250			
Sujeta a polimerización espontánea	25 a 75			
Sensibilidad a la ignición	-75 a 150			
Sujeta a descomposición explosiva	0 a 125			
Sujeta a detonación en fase gaseosa	0 a 150			
Riesgo de explosión en fase condensada	200 a -1500			
Otros riesgos	0 a 150			
Total M =				
III. RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (RGP)				
	Factor sugerido	Factor usado	Letra del factor	Valor reducido
Manipulación y cambios físicos	10 a 50			
Reacciones continuas simples	25 a 50			
Reacción batch simple	35 a 110			
Reacciones múltiples en un mismo equipo	35 a 185			
Transferencia de materiales	0 a 50			
Recipientes móviles o transportables	10 a 100			
Total P =				
IV. RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (REP)				
	Factor sugerido	Factor usado	Letra del factor	Valor reducido
Baja presión ($\leq 1 \text{ kg/cm}^2$)	0 a 100			
Alta presión				
Baja temperatura				
Acero al carbón -25 a 10°C	15			
Acero al carbón < -25°C	30 a 100			
Otros materiales	0 a 100			
Alta temperatura				
Sustancias inflamables	0 a 40			
Resistencia de los materiales	0 a 25			
Corrosión y erosión	0 a 150			

Tabla 4.10 (Continuación) Hoja de cálculo del índice Mond (PUMA, 1995).

INDICE MOND DE INCENDIO, EXPLOSION Y TOXICIDAD				
Nombre				Fecha
Localización				Número
Planta	Unidad	A cargo de		
	Factor sugerido	Factor usado	Letra del factor	Valor reducido
Fugas por juntas y empaques	0 a 60			
Vibración, cargas cíclicas, fatiga...	0 a 50			
Procesos o reacciones difíciles de controlar	20 a 300			
Operaciones en / cerca del rango de inflamabilidad	0 a 150			
Riesgo de explosión superior al promedio	40 a 100			
Riesgo de explosión en polvos o neblinas	30 a 70			
Uso de sustancias fuertemente oxidantes	0 a 300			
Sensibilidad del proceso a la ignición	0 a 75			
Riesgos electrostáticos	0 a 200			
Total S =				
Temperatura del proceso en K				
Total T =				
V. RIESGO DEL INVENTARIO				
Inventario Total		m ³		
Densidad		K (Ton) =		
Factor por inventario	1 a 1000	Q =		
Altura (m)	H =	Superficie de trabajo (m ²)	N =	
VI. RIESGOS POR TIPO DE CONSTRUCCIÓN Y DISPOSICIÓN				
	Factor sugerido	Factor usado	Letra del factor	Valor reducido
Diseño estructural	0 a 200			
Efecto dominó	0 a 250			
Instalaciones subterráneas	0 a 150			
Drenaje superficial	0 a 100			
Otros	0 a 250			
Total L =				
VII. RIESGOS DE TOXICIDAD				
	Factor sugerido	Factor usado	Letra del factor	Valor reducido
Valores TLV	0 a 300			
Forma del material	25 a 200			
Riesgos de exposición corta	100 a 150			
Absorción por la piel	0 a 300			
Factores físicos	0 a 50			
Total Tox =				
CÁLCULO DE INDICES DE RIESGO				
ÍNDICE				VALOR
General de riesgo	$D = B * (1+M/100) * (1+P/100) * (1 + (S + Q + L) / 100 + T / 400)$			
Carga de combustible	$F = (B * K) / N * 20500$ (BTU/ft ³)			
Índice de explosión	$E = 1 + (M + P + S) / 100$			
Índice de toxicidad de la unidad	$U = Tox / 100 * (1 + (M+P+S) / 100)$			
Índice de incidente mayor de toxicidad	$C = Q * U$			
Riesgo de explosión externa	$E = 1 + (M+P+S) / 100$			
Riesgo de explosión interna (aérea)	$A = (B*Q*H*E) * (1 + M / 100) * (T / 300) * ((1 + P) / 1000)$			
Índice total Mond	$R = D * \left(1 + \frac{\sqrt{F * U * E * A}}{1000} \right)$			

Cuando los factores de riesgo individual se reducen, el nuevo valor debe aparecer en la columna “Valor reducido” en la hoja de cálculo; una vez hechos los cambios individuales se puede calcular el valor del riesgo corregido por carga de combustible, índice de toxicidad, explosión y explosión aérea (Índice Total Mond (R)), donde:

B	factor del material (riesgo material)	F	factor de carga de fuego
U	índice de toxicidad de la unidad	C	índice del incidente de mayor toxicidad
E	índice de explosión	A	índice de explosión aérea

Descripción y cálculo de los índices

Cada uno de los índices mostrados en la tabla 4.10 deben calcularse tomando en cuenta una serie de factores, especialmente de operación y condiciones del proceso, para asignar el valor más cercano a la realidad. Una forma de realizar el cálculo es utilizando el diagramado mostrado en la figura 4.4.

El Índice General (**D**) indica el grado de riesgo global según valores previamente fijados (Tabla 4.11).

Tabla 4.11 Grado de riesgo según el método Mond (PUMA,1995).

Grado de riesgo	Intervalo del índice general (D)
Suave	0 – 20
Ligero	20 – 40
Moderado	40 – 60
Moderadamente alto	60 – 75
Alto	75 – 90
Extremo	90 – 115
Muy extremo	115 – 150
Potencialmente catastrófico	150 – 200
Muy catastrófico	Más de 200

El cálculo del índice de Explosión (**E**) representa una medida del riesgo de explosión interna de la planta, aunque no representa el único potencial de explosión del proceso. Al estudiar y analizar una cantidad considerable de sustancias inflamables que han dado lugar a nubes causantes de fuego por ignición (fireballs) o explosiones aéreas, se ha podido determinar el índice **A** de explosión aérea (Lewis, 1979); éste es usado para el cálculo del Índice Total Mond (**R**).

El índice de toxicidad de la unidad (**U**) representa la influencia de la toxicidad y consideraciones afines sobre el control y supervisión de la sección de la planta. Usando una combinación del Índice **U** y el factor de cantidad **Q**, se obtiene el índice de toxicidad máxima, **C**. La clasificación de peligro de estos índices se presentan en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Clasificación de peligro según el método Mond (mediante índices) (PUMA,1995).

Categoría	Índice de Explosión de la Sección (E)	Índice de Explosión Aérea (A)	Índice de Toxicidad de la Unidad (U)	Índice del incidente de mayor Toxicidad (C)
Ligero	0 - 1	0 – 10	0 – 1	0 – 20
Bajo	1 – 2.5	10 – 30	1 – 3	20 – 50
Moderado	2.5 – 4	30 – 100	3 – 6	50 – 200
Alto	4 – 6	100 – 500	6 – 10	200 – 500
Muy alto	Superior a 6	Superior a 500	Más de 10	Superior a 500

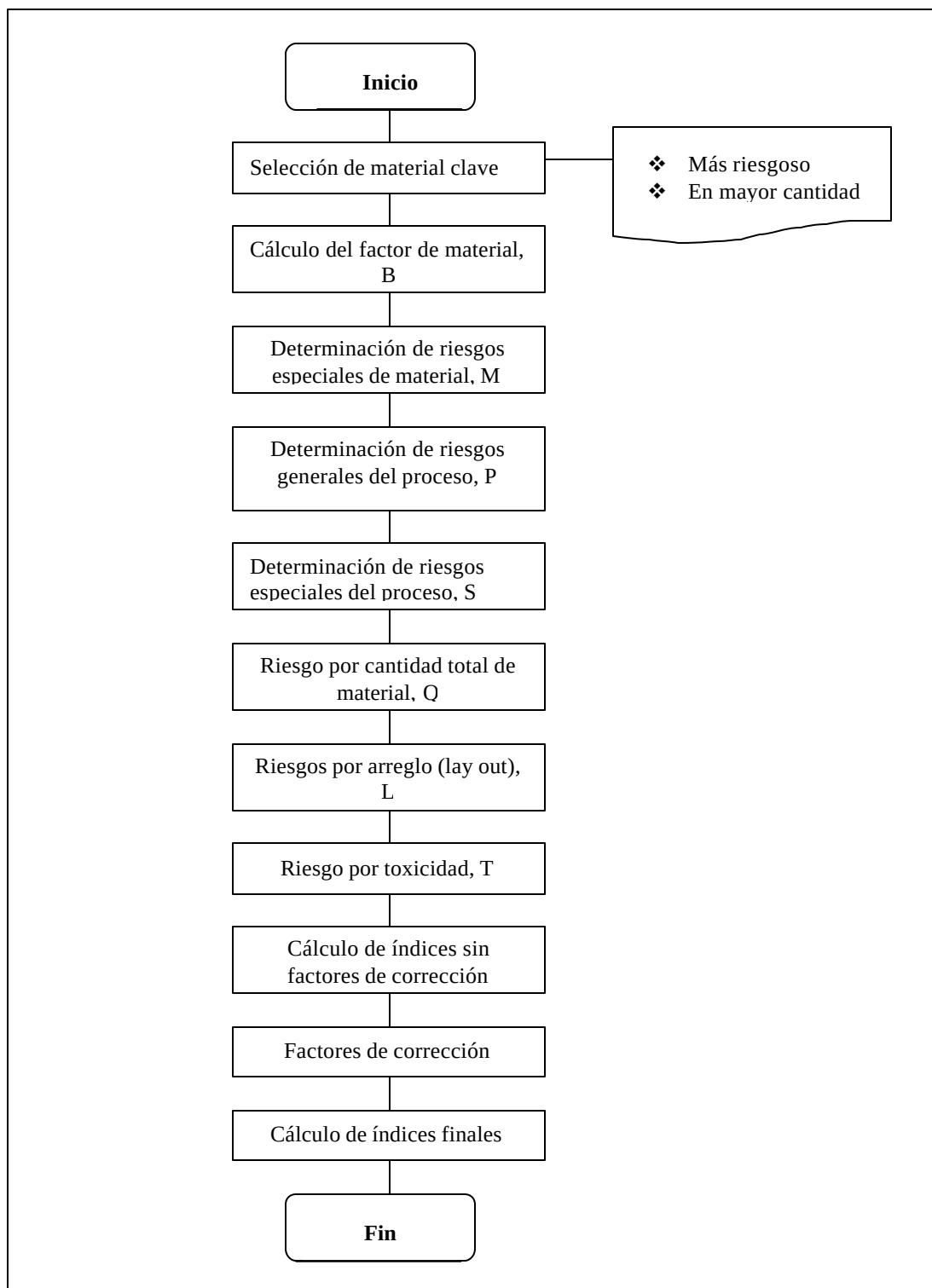


Figura 4.4 Diagrama de flujo para el cálculo del índice Mond (Aguilar, op. cit.).

El cálculo del potencial de fuego (F) permite estimar la duración del fuego en el caso de un incidente (Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Clasificación del riesgo (fuego y global) según el método Mond (factor global de riesgo) (PUMA, 1995).

Categoría del Riesgo Global	Factor de Carga de Fuego (F) (BTU/ ft ²) del área normal de trabajo (valores efectivos)	Rangos de la duración esperada del fuego - Horas	Índice Total Mond (R)
Ligero	0 – 50,000	0.25 – 0.50	0 – 20
Bajo	50,000 – 100,000	0.50 – 1.00	20 – 100
Moderado	100,000 – 200,000	1.00 – 2.00	100 – 500
Alto	200,000 – 400,000	2.00 – 4.00	500 – 1100
Muy alto	400,000 – 1,000,000	4.00 – 10.00	1100 – 2500
Intenso	1,000,000 – 2,000,000	10.00 – 20.00	2500 – 12500
Extremo	2,000,000 – 5,000,000	20.00 – 50.00	12500 – 65000
Muy extremo	5,000,000 – 10,000,000	50.00 – 100.00	Más de 65000

Tabla 4.14 Índice total Mond (Aguilar, 1999).

Categoría del Índice Total Mond	Factor global de riesgo (R)
Suave	0 – 20
Ligero	20 – 40
Moderado	40 – 60
Moderadamente alto	60 – 75
Alto	75 – 90
Extremo	90 – 115
Muy extremo	115 – 150
Potencialmente catastrófico	150 – 200
Muy catastrófico	Más de 200

4.2.5 Árbol de fallas

Es una técnica deductiva enfocada hacia un evento o accidente en particular. Su desarrollo se lleva a cabo mediante un modelo gráfico que considera las distintas combinaciones de fallas en los equipos o procedimientos que pueden ocasionar el accidente (Piccinini, 1998). Permite descomponer a un accidente en las posibles fallas que puedan ocasionarse, además de considerar los errores humanos básicos. Algunos autores (Aguilar, 1999) lo definen como un proceso interactivo, documentado, con un carácter sistemático que se lleva a cabo para identificar las fallas o errores básicos que ocurren, así como las causas y efectos de ellas determinando las medidas preventivas para reducir así la probabilidad de que un evento suceda.

Entre sus limitaciones más importantes se encuentra que la determinación de las fallas depende de la experiencia del evaluador y del conocimiento de éste sobre el proceso que está sujeto a análisis.

Los objetivos de este método de análisis involucran (Aguilar, 1999, Piccinini, 1998):

- ❖ Identificar las distintas posibles combinaciones de eventos que provocan un solo evento indeseable.
- ❖ Representar las combinaciones identificadas de manera gráfica.
- ❖ Identificar el evento final de interés no deseado, también llamado TOP EVENT.
- ❖ Identificar la confiabilidad, áreas críticas de seguridad y puntos de falla simple para llevar a cabo la revisión, mejoramiento y/o cambios de diseño, así como de la configuración de los sistemas de control.
- ❖ Evaluar la magnitud del potencial de fallas, particularmente las que afectan la seguridad,
- ❖ Identificar y establecer prioridades, de todos los posibles modos de falla y condiciones peligrosas, de forma que puedan formularse e instituirse medidas correctivas eficientes.

- ❖ Determinar la necesidad de duplicidad en el equipo de seguridad, diseño con falla segura, simplificación del diseño, partes y materiales más confiables.

Como se mencionó anteriormente, este método describe mediante diagramas la combinación de eventos que pueden conducir a un evento indeseable en el sistema estudiado. Este diagrama permite desarrollar los siguientes elementos (Aguilar, 1999):

- ❖ La elaboración de un diagrama lógico muy detallado, que sirve para describir las fallas básicas y las condiciones que pueden ocasionar una avería del sistema y/o riesgo al personal.
- ❖ Uso de técnicas para analizar fallas básicas, así como determinar y/o asignar la probabilidad de modo de fallas.
- ❖ La formulación de sugerencias correctivas, que puedan minimizar o inclusive eliminar fallas consideradas como críticas.

En forma práctica, el análisis se inicia con la detección de una consecuencia y se desarrolla buscando que lo ha provocado. Los eventos analizados se refieren, en muchos casos, a defectos relacionados con averías de equipos, errores humanos, problemas de software, etc., que conectados entre sí, pueden dar lugar a eventos indeseables (Aguilar, 1999). Las condiciones y las fallas básicas de un nivel dado se deben conectar, mediante operadores lógicos adecuados:

- “y” (AND),
- “o exclusivo” (OR exclusivo), y
- “o” (OR).

para dar lugar a eventos sucesivos.

El análisis se lleva a cabo hasta identificar el *evento básico o primario*. Generalmente, los eventos sujetos a análisis son en muchos casos independientes entre sí, pero al conectarse pueden ocasionar consecuencias de diferentes magnitudes. De los eventos más comunes se conoce su probabilidad, la cuál es necesaria para determinar el riesgo asociado al evento total.

En este tipo de análisis sólo se estudian casos particulares de ocurrencia, por lo que es necesario determinar cuál o cuáles son los eventos de mayor importancia.

La descripción de las etapas usadas en la aplicación de análisis del árbol de fallas se muestran en forma gráfica en la figura 4.5.

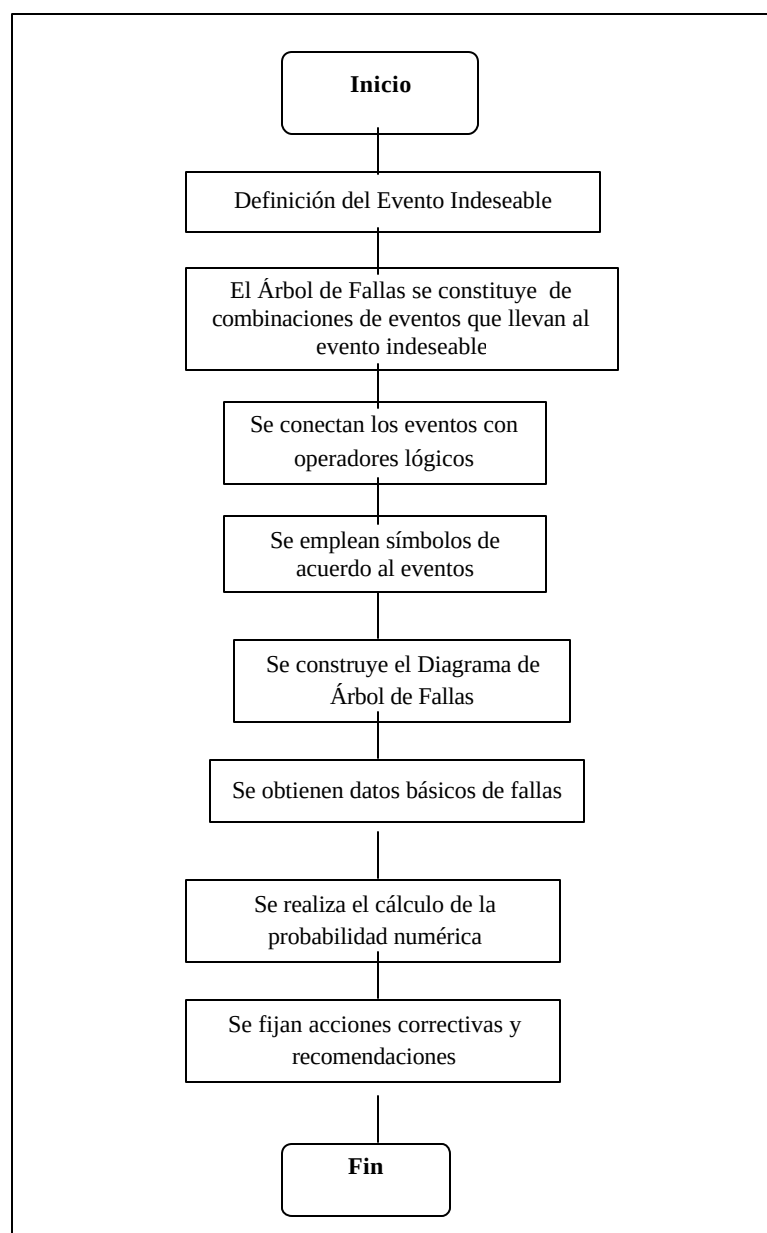
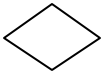
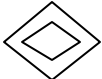
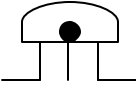
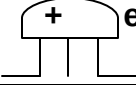
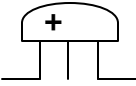


Figura 4.5 Etapas de desarrollo empleadas en el análisis del árbol de fallas (Aguilar, 1999).

Los símbolos utilizados para este análisis son las indicadas en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Simbología relativa al árbol de fallas (Piccinini, 1998, modificado de Aguilar, 1999).

Símbolo	Significado del símbolo
	Representación del evento (consecuencia o intermedio) resultante de la combinación de otros eventos, mediante una compuerta lógica.
	Evento básico o primario, se considera como la causa principal.
	Evento sin desarrollar. Representación de un evento que podría ser dividido en eventos básicos, pero del cual no se cuenta con información suficiente o de utilidad.
	Evento cuyas causas se especifican en forma posterior.
	Evento básico que ocurre normalmente mientras el sistema está operando.
	Puerta Y (AND)
	Puerta O exclusivo (OR exclusivo)
	Puerta O (OR)

Los resultados que se obtienen del análisis de árbol de fallas son los siguientes:

- ❖ Diagrama lógico detallado que describe todas las fallas básicas y condiciones indeseables que pueden ocurrir y ocasionar condiciones peligrosas,
- ❖ Determinación numérica de la probabilidad de ocurrencia de cada una de las condiciones peligrosas detectadas
- ❖ Una matriz de las fallas detectadas, que describe en forma detallada todas las fallas básicas, sus probabilidades de ocurrencia y condiciones críticas, así como las medidas preventivas o cambios sugeridos que deben aplicarse para minimizar o, inclusive, eliminar los efectos indeseables que podrían producirse.

4.2.6 Análisis “Qué pasa sí...? (“What - If”)

La aplicación de ésta técnica no requiere de métodos cuantitativos especiales ni una planeación extensiva; utiliza información específica de un proceso para generar una serie de preguntas que son pertinentes durante el tiempo de vida de una instalación, así como cuando se introducen cambios al proceso o a los procedimientos de operación. Es un método de tipo cualitativo que consiste en definir tendencias, formular preguntas, desarrollar respuestas y evaluarlas, incluyendo la más amplia gama de consecuencias posibles, con el objetivo básico de identificar posibles accidentes; es decir, riesgos, consecuencias y posibles métodos y/o formas de minimizarlos. Para su aplicación se requiere contar con documentación detallada de la planta, los procesos, procedimientos de operación y en ocasiones, de entrevistas directas con el personal (PUMA, 1995, Piccinini, 1998).

Como resultado de éste análisis se obtiene una lista de escenarios de accidentes potenciales, así como las formas de reducir las consecuencias de los mismos, sin establecer una escala cuantitativa de ellos.

El método empezó a utilizarse frecuentemente por grupos de revisión, los cuáles con base en su experiencia, aplicaban la pregunta ¿Qué pasa si...? (What - if...?), en cada etapa del proceso, determinando el efecto de las fallas de los equipos o errores de operación. Puede aplicarse para examinar posibles desviaciones en el diseño, construcción, operación o modificaciones de la planta o de algún proceso (PUMA, 1995).

Se enfatiza la revisión de factores no detectables a través de verificaciones visuales, con el fin de identificar los riesgos potenciales con base en sus conocimientos y experiencias, así como para establecer las medidas de control que se consideren más adecuadas. Este es un método apropiado, únicamente, si el equipo humano asignado es especializado ya que es una metodología basada en la experiencia donde no se tienen garantías de poder detectar todas las posibles fallas y suele darse el caso de que las medidas de corrección se tomen después de que ha ocurrido un evento indeseable (Montague, 1990).

4.3 MANEJO DEL RIESGO

El manejo del riesgo es un proceso mediante el cual se desarrollan y establecen las estrategias para controlar, mitigar o manejar el riesgo. En este proceso se comparan los méritos de una alternativa con las de otras y se selecciona la más apropiada para su aplicación. El manejo del riesgo integra los resultados obtenidos a partir de la evaluación del riesgo con información sobre aspectos técnicos, socioeconómicos y políticos, y las acciones de control para tomar una decisión (Li-Muller y Marsh, 1994).

El manejo del riesgo debe considerar la fuente y naturaleza del efecto adverso, las medidas de control usadas para eliminar o reducir el efecto adverso a niveles aceptables, las partes responsables de monitoreo y mantenimiento de las medidas adoptadas y el programa de dichas actividades, los fondos disponibles para llevar a cabo las medidas correctivas y las medidas de contingencia (MOEE, 1995).

4.4 PROCESO APELL²⁰

A raíz de una serie de accidentes de gran magnitud ocurridos en todo el mundo a partir de 1986, el director ejecutivo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), sugirió una serie de medidas con la finalidad de reducir la frecuencia y la gravedad de los accidentes tecnológicos.

Entre esas medidas se desarrolló el proceso APELL, instituido a partir de 1988 por la Oficina para la Industria y el Medio Ambiente (OIMA) del PNUMA. Este proceso está enfocado a los riesgos generados dentro de la planta, incluyendo el transporte de materiales peligrosos dentro de la comunidad mediante el programa TRANS-APELL. En el programa participan: las autoridades, la industria y los grupos de interés local.

APELL es un proceso de respuesta a accidentes tecnológicos y su objetivo principal es proteger a la comunidad de toda pérdida humana y material, así como evitar daños al ambiente. Estos objetivos se pueden lograr al: (UNEP^a, 1990)

- ❖ Concientizar a la comunidad y a los encargados de la seguridad sobre los posibles peligros de accidentes industriales dentro una zona dada.
- ❖ Desarrollar un plan que responda a las emergencias de esta naturaleza evitando que se transformen en catástrofes de graves consecuencias.
- ❖ Capacitar a la comunidad local para reaccionar adecuadamente ante situaciones de emergencias.

²⁰ APELL: Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level / Concientización y preparación para emergencias a nivel local.

En la aplicación del proceso APELL es posible que participen personas y comunidades que rebasen las fronteras locales, regionales o nacionales. Dichas personas formaran lo que se denomina el Comité de Coordinación para trabajar continuamente a favor del bienestar, de la seguridad y de las propiedades de la comunidad, para desarrollar un enfoque unificado y coordinado que permita planificar la respuesta ante una emergencia así como establecer vías de comunicación con la comunidad. El PNUMA propone el siguiente esquema de trabajo para los participantes de este programa (Tabla 4.16):

Tabla 4.16 Esquema del vínculo de responsabilidad para aplicar el APELL (UNEP^a, 1990).

Responsabilidad de la industria	Acciones del Grupo de Coordinación	Responsabilidades del gobierno local
1. Establecer procesos seguros de operación 2. Garantizar la seguridad personal de los trabajadores 3. Establecer programas de seguridad 4. Coordinar al personal de la planta en caso de emergencia 5. Desarrollar planes y procedimientos de respuesta en emergencias 6. Proporcionar condiciones y equipo de seguridad, entrenamiento e información sobre riesgos químicos	1. Abrir líneas de comunicación 2. Compartir la información 3. Coordinar planes y procedimientos de emergencia 4. Interactuar con otros organismos de respuesta ante emergencias 5. Educación y entrenamiento conjunto 6. Proporcionar asistencia para la ayuda mutua	1. Propiciar una comunidad segura 2. Garantizar la seguridad y el bienestar de todos 3. Establecer programas de seguridad pública 4. Proteger las vidas así como las propiedades 5. Coordinar equipos de respuesta a emergencias 6. Desarrollar planes y procedimientos para responder en caso de emergencia 7. Dirigir entrenamientos y ejercicios de simulacro 8. Mantener canales de comunicación con los gobiernos nacionales

En este esquema, todas las instalaciones industriales tienen la responsabilidad de establecer y poner en marcha un plan de respuesta ante una emergencia dentro de la planta. Este plan está basado en una revisión de la seguridad de funcionamiento de las instalaciones, por lo que se deben examinar detalladamente todos sus elementos.

Para establecer el proceso APELL se recomienda seguir una estrategia de diez pasos, a fin de lograr un plan de respuesta (UNEP^a, 1990):

1. Identificar a los participantes de la respuesta a una emergencia y definir sus funciones, recursos y responsabilidades.
2. Evaluar los peligros y riesgos que pueden provocar una situación de emergencia de la comunidad.
 Para llevar a cabo estas acciones, se sugiere:
 - ❖ A partir de las especialidades de los participantes del grupo de Coordinación, se elabore una lista de los riesgos posibles que pueden provocar una situación de emergencia en la comunidad, tomando en cuenta:
 - ✓ Plantas petroquímicas
 - ✓ Instalaciones nucleares
 - ✓ Desastres naturales (sismos, huracanes, heladas, inundaciones, deslizamientos de tierra, entre otros)
 - ✓ Instalaciones industriales
 - ✓ Actividades de transporte

- ❖ Definir la magnitud del riesgo y la posible gravedad del impacto de acuerdo a factores como:
 - ✓ Amplitud de la zona de impacto
 - ✓ Número de personas en peligro
 - ✓ Tipo de peligro (intoxicación, daño crónico o lesión)
 - ✓ Impacto a largo plazo
 - ✓ Impactos en áreas ambientales sensibles
 - ❖ Determinar la probabilidad de un incidente, definiendo si es suficiente un enfoque cualitativo o si resultaría útil una evaluación de riesgos cuantitativa, tomando en cuenta los siguientes factores:
 - ✓ Probabilidad de incidentes aislados
 - ✓ Probabilidad de incidentes simultáneos
 - ✓ Complicaciones causadas por factores ambientales especiales, como un terreno difícil o una zona que se inunda con frecuencia, entre otros.
 - ❖ Preparar una lista de posibles escenarios que podrían presentarse.
3. Hacer que los participantes revisen su propio plan de emergencia para adecuarlo a la respuesta coordinada.
 4. Identificar las tareas de respuesta necesarias que no han sido cubiertas por los planes existentes.
 5. Armonizar estas tareas con los recursos existente disponibles de cada uno de los participantes.
 6. Realizar los cambios necesarios para mejorar los planes existentes, integrarlos al plan global de la comunidad y buscar un consenso.
 7. Poner por escrito el plan integrado de la comunidad y buscar la aprobación de las autoridades locales.
 8. Informar a todos los grupos participantes sobre el plan integrado y asegurarse de que todos los encargados de responder a una emergencia estén debidamente entrenados.
 9. Definir procedimientos para probar, revisar y actualizar el plan de manera periódica.
 10. Informar y entrenar a la comunidad en su conjunto en la utilización del plan integrado.

Para determinar la peligrosidad de una zona (tal como se indica en el punto 2), el PNUMA propone una metodología (UNEP^b, 1992) donde se deben identificar los objetivos que se persiguen, la identificación, evaluación, clasificación y gravedad, y la jerarquización de los riesgos que es posible que ocurran, tal y como se detalla a continuación:

Los **OBJETIVOS PRINCIPALES** del proceso APELL se pueden dividir en (UNEP^b, 1992):

- a) Identificar a los participantes y establecer los canales de comunicación para tener la información necesaria.
- b) Evaluar los riesgos y peligros de una comunidad, en que pueda presentarse una emergencia:

Los requisitos para realizar la evaluación indicada son (UNEP^b, 1992):

- i) Mapas con información geográfica, etnográfica, agrícola, industrial, de servicios médicos y de emergencia, etc., de la zona.
- ii) Lista de fuentes de peligro que operen en el área.
- iii) Información del número de trabajadores y habitantes que se encuentren en el área.
- iv) Conocimientos de los planes de emergencia que existen.
- v) Modelos que ayuden a evaluar el área máxima de daño.

En lo que respecta a la **INFORMACIÓN** que debe ser recopilada, ésta consta de los siguientes puntos (UNEP^b, 1992):

- A) Identificación
 - a.1 Objeto (¿Qué objeto de riesgo está siendo analizado?)
 - a.2 Operación (¿Qué actividad se lleva a cabo?)
 - a.3 Peligro (¿Qué daño involucra esta actividad [cantidad de material, inflamable, tóxico o de otro tipo que participa en el evento]?)
- B) Evaluación
 - b.1 Tipo de riesgo (¿Qué tipo de riesgo o situación peligrosa puede causar el material?. Este sería el punto final del análisis si el riesgo fuera despreciable).
 - b.2 Zona amenazada (¿Cuál es la zona vulnerable?).
 - b.3 Consecuencias (¿Cómo sería la afectación? ¿Cuáles serían las consecuencias? ¿Cuáles serían las zonas de peligro?. Este sería el final del análisis si no existe una zona importante de peligro).
- C) Clasificación y gravedad
 - c.1 Vida (Grado de afectación de las personas que viven en el lugar).
 - c.2 Ambiente (¿Qué impacto tiene en la atmósfera, suelo y cuerpos de agua?).
 - c.3 Propiedad (¿Cuáles pueden ser los costos en caso de accidente en terminos de hospitalización, limpieza del ambiente, pérdida de la propiedad,...?)
 - c.4 Velocidad (¿Qué tan rápido se desarrolla el accidente?)
- D) Jerarquización
 - d.1 Probabilidad (¿Cuál es la probabilidad de que este evento ocurra, qué tan frecuentemente ocurre?)
 - d.2 Prioridad (¿Qué prioridad tiene este evento dependiendo de las consecuencias del mismo?)
 - d.3 Comentarios (Considerar el peor de los casos y la dimensión del daño estimado).

La probabilidad de que ocurra un accidente debe tomar en cuenta todas las fuentes de riesgo para un evento. La utilización de información estadística de accidentes e incidentes es la forma de estimarla. Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de un evento se ve afectada por muchos factores que varían para cada caso (la forma de la instalación, el método de operación de los objetos de riesgo, entre otros elementos) (Beltrán, 1996).

La probabilidad de que un riesgo dado cause un accidente puede clasificarse de uno a cinco, estimando la frecuencia con la que se espera que ocurra (UNEP^a, 1990), tal como se muestra en la tabla 4.1. Esta estimación se basa principalmente en la experiencia de los miembros del Grupo de Coordinación junto con estadísticas e información de accidentes e incidentes en retrospectiva (UNEP^a, 1990).

Tabla 4.17 Jerarquización de los accidentes dependiendo de la frecuencia de ocurrencia (UNEP^a, 1990²¹).

Clase	Frecuencia
1. Improbable	Menos de una vez en 1000 años
2.	Una vez de 100 a 1000 años
3.	Una vez de 10 a 100 años
4.	Una vez de 1 a 10 años
5. Muy probable	Más de una vez al año

²¹ Esta tabla también se encuentra indicada en la sección 4.1 de este documento.

Las consecuencias se evalúan tomando en cuenta el carácter del riesgo en particular y los objetos que pudieran resultar afectados. El alcance del daño producido dependerá de la toxicidad y cantidad de las sustancias químicas, de la energía almacenada y/o del tipo de accidente causado.

CAPÍTULO 5

ELEMENTOS DE RIESGO EN LA INDUSTRIA DEL GAS LP

5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INDUSTRIA PROCESADORA Y DISTRIBUIDORA DE GAS EN MÉXICO

Los riesgos potenciales asociados con el proceso, transporte y operaciones petroquímicas de la industria de gas y petróleo son los relativos al fuego, explosión y fuga de materiales tóxicos (Lees, 1991). Además se tienen las pérdidas económicas asociadas con la interrupción de las operaciones y la limpieza del medio ambiente que sea necesario llevar a cabo después del incidente (Angelsen & Drake, 1999). De los tres riesgos señalados, el fuego es el más común, pero la explosión es particularmente importante con relación al número de muertes ocasionadas y daños materiales causados. Respecto al escape de gas LP, este puede ocasionar intoxicación a los habitantes cercanos a la zona, pero difícilmente provocará pérdidas humanas, excepto cuando las concentraciones se encuentran muy por arriba de las dosis letales, conocidas como DL₅₀.

El factor más importante que determina la escala del riesgo a la cuál esta sometida una instalación es la cantidad de material que se maneja, aunque éste no es único factor de debe tomarse en consideración (Lees, 1991). Por esta razón, al momento de determinar y evaluar los riesgos a los cuáles esta sometida una instalación es necesario conocer su capacidad de almacenamiento y los inventarios máximo y mínimo de los materiales considerados como riesgosos que se manejan en todo momento.

En México existen plantas productoras, de almacenamiento y distribución con muy diferentes capacidades. Conociendo la capacidad de almacenamiento de ellas, se puede determinar, en forma general, las áreas que resultarían afectadas en caso de que se presentaran efectos como los ya mencionados.

5.1.1 Producción nacional e internacional de gas natural y gas licuado de petróleo

En nuestro país, la producción de gas LP ha venido aumentado en los últimos quince años a un ritmo del 3.5% anual (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Producción de gas licuado (SE^b,1999).

Año	Producción (miles de barriles diarios)
1985	167.1
1986	183.3
1987	192.6
1988	206.8
1989	217.9
1990	242.9
1991	250.3
1992	244.1
1993	251.2
1994	267.0
1995	256.7
1996	248.8
1997	215.1
1998	224.7
1999*	254.9

*Cifras preliminares

5.1.2 Instalaciones para la Producción

El proceso de producción de gas LP, utiliza varias etapas (PEMEX^d, 2001):

1. PEMEX Exploración y Producción provee el gas amargo húmedo y líquidos asociados con el gas a PEMEX Gas y Petroquímica Básica. Este gas está constituido por metano, etano, propano, butano e hidrocarburos más pesados, así como por impurezas como el azufre.
2. El gas amargo pasa a través de las plantas endulzadoras de gas en las cuales elimina el azufre y lo separan en gas ácido y gas dulce
3. El gas ácido se envía a las plantas de azufre, y el gas dulce a las plantas criogénicas donde se separan los líquidos y se obtiene una corriente de gas seco
4. Los líquidos continúan hacia las plantas fraccionadoras donde se realiza la separación de los productos en una planta criogénica. Mediante enfriamiento y expansiones sucesivas se obtienen dos corrientes, una gaseosa básicamente formada por metano (gas residual) y la otra líquida (licuable) (SE^a, 1999.).
5. En un proceso posterior de fraccionamiento, la fase líquida se separa en distintos componentes. Los productos obtenidos son: gas licuado, gas natural seco, etano, gasolinas naturales y azufre.

La producción nacional de gas licuado se concentra en el sureste del país, principalmente en los complejos procesadores de gas: Nuevo PEMEX, Cactus, Morelos y Cangrejera. Fuera de esta área, la producción de este energético se localiza en Matapionche, Poza Rica y Reynosa; el complemento proviene de las refinerías de Salina Cruz, Tula, Salamanca, Madero y Cadereyta (Figura 5.2).

En Ciudad Juárez, al norte del país, se encuentra el ducto Hobbs - Méndez con una longitud de 35 km, donde se conecta con la red de ductos de los Estados Unidos, lo que representa un acceso directo a los sistemas de producción y almacenamiento en el centro de ese país, y ofrece a PEMEX Gas una fuente alterna de suministro a través de un sistema de transporte seguro y confiable.



Figura 5.1 Centro procesador de gas en Cactus, Chis. (PEMEX⁵, 2001).

5.1.3 Instalaciones para la Distribución de Gas LP

Una vez obtenido el gas LP, éste se almacena en grandes esferas, a partir de las cuáles inicia el proceso de distribución, por medio de tuberías, hacia otros complejos de PEMEX, a industrias que hacen uso de él en sus procesos o a compañías que lo distribuyen a los usuarios del sector comercial, doméstico y del transporte.

Alrededor del 26% del consumo nacional se cubre mediante importaciones terrestres a través de la frontera con Estados Unidos, además de importaciones hechas a través de los puertos de Pajaritos, Ver. y de Rosarito, BCN (PEMEX^b, 1998).

El transporte y distribución de gas LP esta constituido por 16 terminales de distribución y 1,822 km de ductos (4" y 24") con capacidad de bombeo de 220 mbd (PEMEX^c, 2001). Para mover este producto se cuenta con 5 estaciones de bombeo, 3 puntos de inyección, 11 estaciones de medición y regulación, 13 trampas de diablos, 60 válvulas de seccionamiento y 5 puntos de distribución (Paz, 1998).

En la figura 5.2 se muestra la infraestructura de transporte con que cuenta PEMEX:

- 22 terminales de distribución
- 4 terminales marítimas (Pajaritos, Salina Cruz, Topolobampo y Rosarito) (Figura 5.3).
- Aproximadamente 1,822 Km de red de transporte (Tabla 5.2)

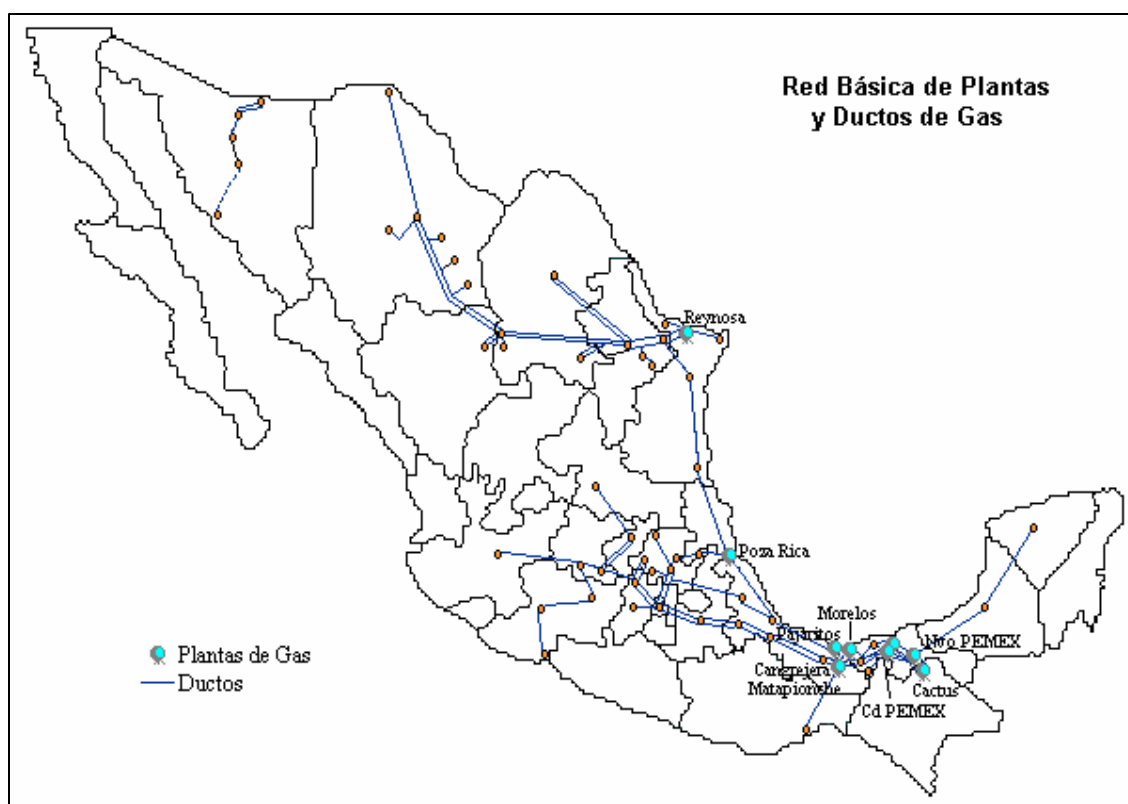


Figura 5.2 Red básica de gas natural en México (elaborado en función del Anuario Estadístico de PEMEX, 1997).

Tabla 5.2 Red principal de transporte de gas LP (PEMEX^b, 1998).

Tramo	Volumen transportado (MBD)	Longitud (km)	% transportado*
Cactus – Guadalajara	179.35	1231	85
Venta de Carpio – Poza Rica	-----	209	**
Hobbs – Méndez	18.99	35	9
Jáltipan – Salina Cruz	12.66	233	6
Total	211.00	1708	100

* Tomando como base un volumen de 211 MBD

** El gas LP de este ducto se toma del tramo Cactus – Guadalajara.

Más del 75% de la producción nacional de gas licuado se genera en los centros productores de la zona sureste; debido a esta situación se hace necesario la distribución por medio de tuberías hacia otras regiones del país, la cual ha demostrado ser la forma más económica y segura de llevarlo a cabo (Ibarra, 1997).

En cuanto a la zona noreste, al no contar con la infraestructura necesaria para distribuir el gas mediante tubería, el abastecimiento se llevaba a cabo principalmente por cabotaje a las terminales de Topolobampo, Sin. y Rosarito, BCN, partiendo desde la Terminal Refrigerada de Pajaritos, Ver., vía Canal de Panamá, aunando a esto los altos costos y riesgos implicados. Por esta razón se construyó el tramo Jáltipan – Salina Cruz con tubería de 12" dn²² (Figura 5.3), para facilitar el cabotaje del producto a los puertos ya mencionados, reduciendo en forma importante los problemas de tráfico marítimo en el Canal de Panamá, para brindar mayores facilidades para el comercio internacional del gas LP, y disminuir los costos de transporte para la zona norte, aprovechando la infraestructura portuaria y las tuberías ya existentes. La tubería mencionada sirve, además, para transportar la producción de gas licuado desde la refinería de Salina Cruz hacia las terminales terrestre y refrigerada del mismo puerto (Ibarra, 1997).

Figura 5.3 Terminales marítimas y ducto de gas LP de 12" dn Jáltipan – Salina Cruz (Ibarra, 1997).



Hay que resaltar que el 90% de la demanda de gas licuado se realiza en el centro y norte de la República. Para atenderla, PEMEX Gas cuenta con una red de distribución de ductos de 1,822 Km, que permiten conectar los principales centros de producción del sureste con la región del Altiplano y el norte del estado de Veracruz. El abasto al noroeste del país se realiza a través del puerto de Salina Cruz, Oaxaca, reduciendo los costos en el transporte del producto a las terminales de distribución de gas licuado de Topolobampo y Rosarito.

La distribución de plantas de gas IP en México se muestra en la tabla 5.3 y en la figura 5.4 (SE^c, 2000). En lo que se refiere a la capacidad de almacenamiento conjunta de las instalaciones, ésta se muestra en la figura 5.5 (SE^c, 2000) (Figura 5.6). Como puede observarse, una parte considerable de los centros de distribución se encuentran localizados en la parte norte y centro de México, mientras que su lugar de producción es la región sureste (tal como se mencionó en el apartado 5.1.2), lo que implica que el transporte de este material se realiza cruzando prácticamente todo el país.

²² dn: diámetro nominal.

Tabla 5.3 Centros de distribución de gas LP (SE^c, 2000).

Estado	Condición				Total
	En construcción	En operación	Clausurada	Fuera de Servicio	
Tamaulipas	3	75	2	1	81
Nuevo León	7	62	1	1	71
Chihuahua	4	57	4	3	68
Veracruz	8	52	5	2	67
Edo. de México	4	57			61
Jalisco	7	52	1	1	61
Coahuila	5	51	1	2	59
Guanajuato	4	42	2	1	49
Sonora	5	31	4		40
Michoacán	2	37			39
Puebla	5	27			32
Hidalgo	2	27	1	1	31
Zacatecas	4	26	1		31
San Luis Potosí	3	22			25
Durango	2	20			22
Sinaloa		22			22
Guerrero	2	16	3		21
Oaxaca	1	18			19
Chiapas		16			16
Baja California	2	10	1	1	14
Tabasco	1	12	1		14
Yucatán	2	8	4		14
Querétaro	1	12			13
Quintana Roo	2	6	2	3	13
Aguascalientes	1	8			9
México, D.F.	2	6	1		9
Morelos	1	8			9
Nayarit	2	7			9
Baja California Sur		7			7
Tlaxcala		6			6
Campeche	1	3			4
Colima	1	3			4

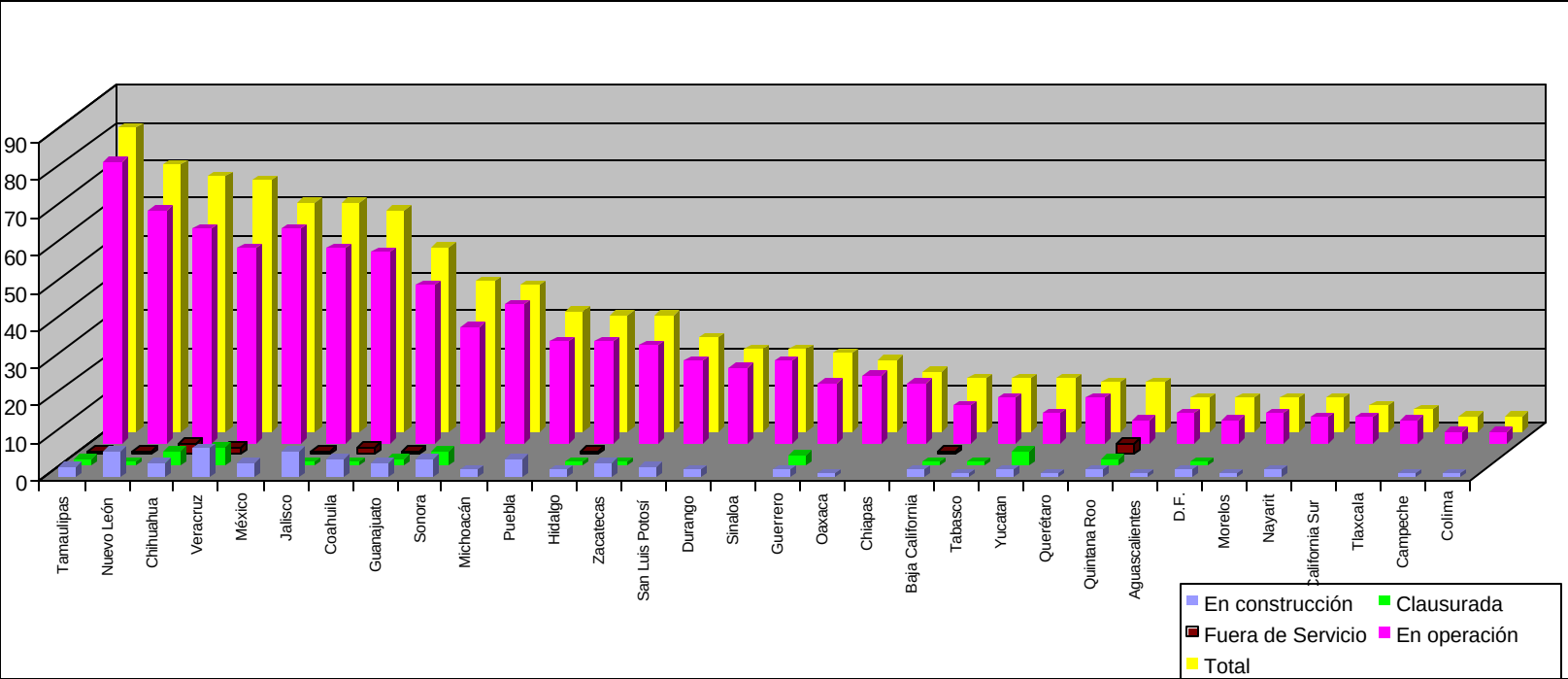


Figura 5.4 Distribución de plantas de gas LP en México (SE^c, 2000).

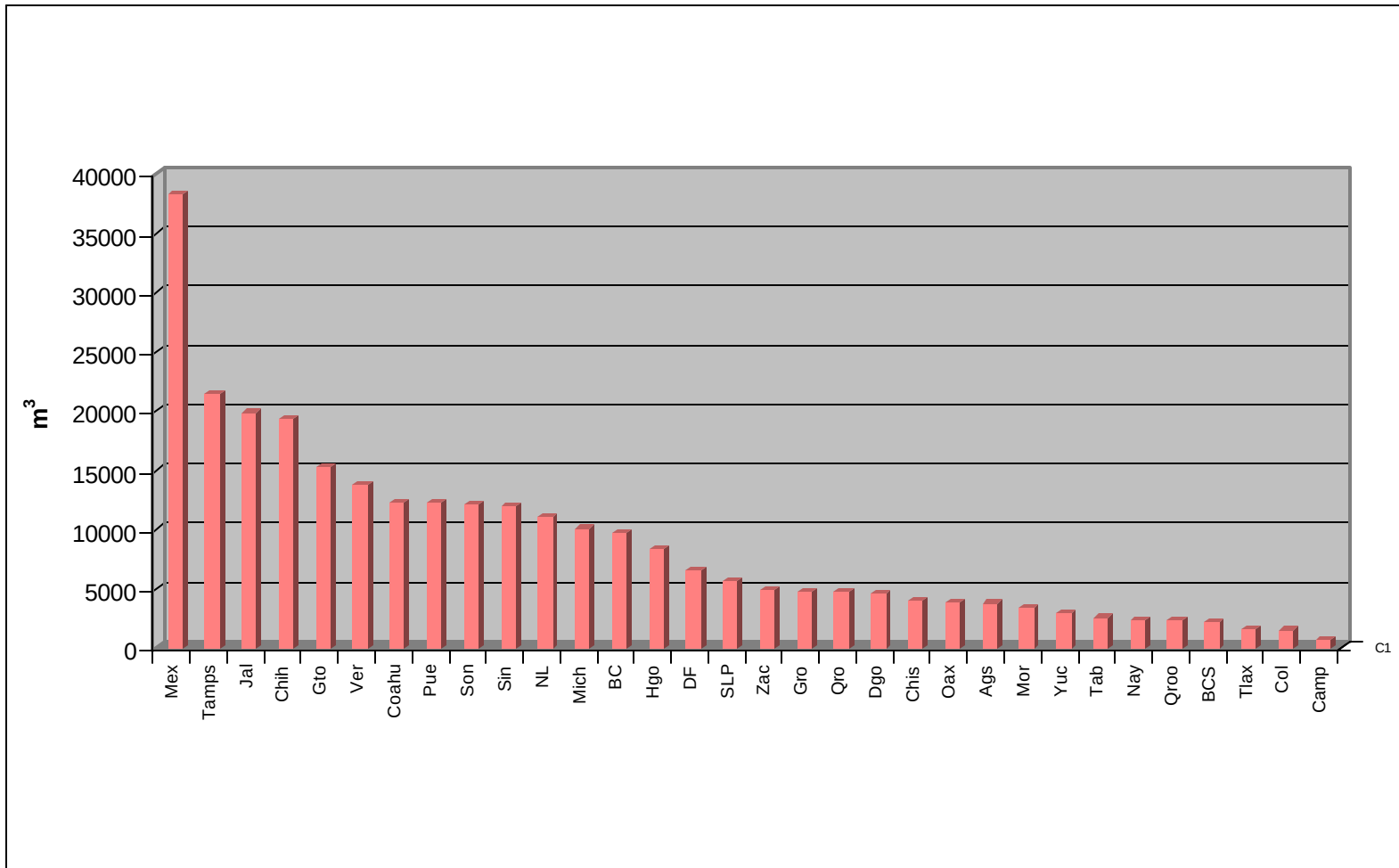


Figura 5.5 Capacidad de almacenamiento de gas LP en México (SE^c, 2000).

La razón principal por la cuál la mayor parte de las compañías distribuidoras se encuentra concentrada en la parte norte y centro de México, radica que en ellas esta ubicada una parte muy importante de las industrias y de la población (Tabla 5.4).

Tabla 5.4 Distribución de población y Parques Industriales en México.

Estado	Población		Parques Industriales	
	Número	%	Número	%
México	13,083,359	13.43	21	7.32
Distrito Federal	8,591,309	8.82	1	0.35
Veracruz	6,901,111	7.09	4	1.39
Jalisco	6,321,278	6.49	7	2.44
Puebla	5,070,346	5.21	7	2.44
Guanajuato	4,656,761	4.78	6	2.09
Michoacán	3,979,177	4.09	5	1.74
Chiapas	3,920,515	4.03	2	0.70
Nuevo León	3,826,240	3.93	35	12.20
Oaxaca	3,432,180	3.53	3	1.05
Guerrero	3,075,083	3.16	1	0.35
Chihuahua	3,047,867	3.13	25	8.71
Tamaulipas	2,747,114	2.82	16	5.57
Sinaloa	2,534,835	2.60	6	2.09
Baja California	2,487,700	2.56	49	17.07
Coahuila	2,295,808	2.36	25	8.71
San Luis Potosí	2,296,363	2.36	5	1.74
Hidalgo	2,231,392	2.29	4	1.39
Sonora	2,213,370	2.27	25	8.71
Tabasco	1,889,367	1.94	2	0.70
Yucatán	1,655,707	1.70	3	1.05
Morelos	1,552,878	1.59	3	1.05
Durango	1,445,922	1.49	4	1.39
Querétaro	1,402,010	1.44	10	3.48
Zacatecas	1,351,207	1.39	2	0.70
Tlaxcala	961,912	0.99	5	1.74
Aguascalientes	943,506	0.97	3	1.05
Nayarit	919,739	0.94	1	0.35
Quintana Roo	873,804	0.90	3	1.05
Campeche	689,656	0.71	2	0.70
Colima	540,679	0.56	1	0.35
Baja California Sur	423,516	0.43	1	0.35
Total	97,361,711	100 %	287	100 %

Fuente: INEGI, 2000, SIEM, 2000.



Figura 5.6 Terminal de almacenamiento de gas licuado, Tepeji del Río, Qro. (PEMEX^e, 2001).

5.1.4 Acciones de Prevención contra Accidentes

Como una medida para disminuir el riesgo al cual la población se encuentra expuesta por el uso de gas LP, particularmente en el uso de cilindros portátiles, en los últimos cinco años se han invertido 128 millones de dólares en el Programa Integral de Modernización de Distribución de gas LP, sustituyendo 8 millones de cilindros portátiles por envases nuevos, como parte de este programa (TV Azteca, 2001).

Diariamente se destruyen los cilindros inservibles para evitar que sean reutilizados para el mercado informal. Los distribuidores de gas LP tienen en la Ciudad de México un centro de destrucción de cilindros portátiles creado en septiembre de 1996, ubicado en Tecamác, Estado de México (TV Azteca, 2001).



Figura 5.7 Cilindros de gas LP destruidos

CAPÍTULO 6

DETERMINACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD

6.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD

Una estimación del área geográfica potencialmente afectada por la liberación accidental de una sustancia peligrosa en un nivel tal que pueda causar daños agudos a la salud o muerte de individuos humanos es prioritario en estudios de riesgo y prevención. Dependiendo de las características particulares de cada sustancia, las áreas pueden ser afectadas por:

- las sustancias tóxicas que se liberan al aire,
- por ondas de calor producidas por un incendio,
- por una explosión de materiales inflamables, o
- por ondas de sobrepresión ocasionadas por una explosión.

En los procesos que se desarrollan en una planta industrial, los elementos de mayor importancia están representados por la seguridad del personal y las pérdidas económicas ocasionadas al salir de operación. El punto central de la seguridad que debe observarse se encuentra en las unidades y procesos que manejan o almacenan volúmenes importantes de materiales inflamables y/o tóxicos, como es el caso del gas LP (Angelsen & Drake, 1999).

Para evaluar estos aspectos de seguridad se emplean diferentes métodos de análisis de riesgo (ver capítulo 4), especialmente los que son de tipo cuantitativo (Análisis de Riesgo Cuantitativo o Quantitative Risk Analysis, QRA).

Parte del análisis utilizado rutinariamente en el diseño de los procesos, se aplica para actualizar de forma continua el proceso de operación y realizar los ajustes necesarios. La información obtenida se puede transferir a una inspección basada en riesgos (Risk Based Inspection (RBI)) en forma de valores potenciales de pérdidas humanas (Potencial Loss of Life (PLL-values)) dependiendo de la magnitud de la fuga y la extensión del escenario en el que se simula el accidente (Angelsen & Drake, 1999).

Para la planificación de acciones de emergencia se requiere conocer con anticipación la zona más probable donde se pueden presentar los mayores niveles de afectación, y por lo tanto la extensión de ésta, para tomar así la mejor decisión en caso de que se requieran llevar a cabo acciones de primera atención de emergencia e inclusive, en caso necesario, la evacuación de la población aledaña.

En general, el cálculo de la extensión del área de vulnerabilidad depende de diversos factores, algunos de ellos con mayor peso que otros en los cálculos numéricos. Entre dichos factores destacan los siguientes :

- la cantidad de material liberado,
- la velocidad de liberación,
- las condiciones existentes para la dispersión y la consecuente concentración de la sustancia,
- las características toxicológicas particulares de la sustancia emitida,
- la topografía y características físicas del sitio donde ocurre la liberación, y
- la estabilidad atmosférica al momento del accidente,

entre otros factores (U.S.EPA, 1995).

La metodología de análisis de riesgo cuantitativo facilita la modelación matemática de fugas, dispersiones, igniciones, incendios y explosiones, en una forma correcta del inicio de otros incidentes similares en otras secciones del proceso (Angelsen & Drake, 1999).

Cuando no se usa la metodología de análisis de riesgos puede desarrollarse también un análisis de consecuencias aproximado, por ejemplo mediante la metodología simplificada de API BRD. Esta se encuentra basada en el uso de un árbol de fallas, con la pre-simulación de escenarios de consecuencias. Las cinco categorías de eventos que se pueden simular son (Figura 6.1): (Angelsen & Drake, 1999)

- Inflamabilidad (fuego / explosión)
- Fuga de materiales tóxicos
- Riesgos ambientales (costos de limpieza)
- Interrupción de producción (perdidas o paro de producción)
- Costos de reparación de daños

Algunos de estos eventos pueden ser determinados de una forma más o menos precisa a partir de datos bibliográficos y/o registros de la misma empresa; como es el caso de los costos por pérdida o disminución de la producción y las reparaciones a las instalaciones.

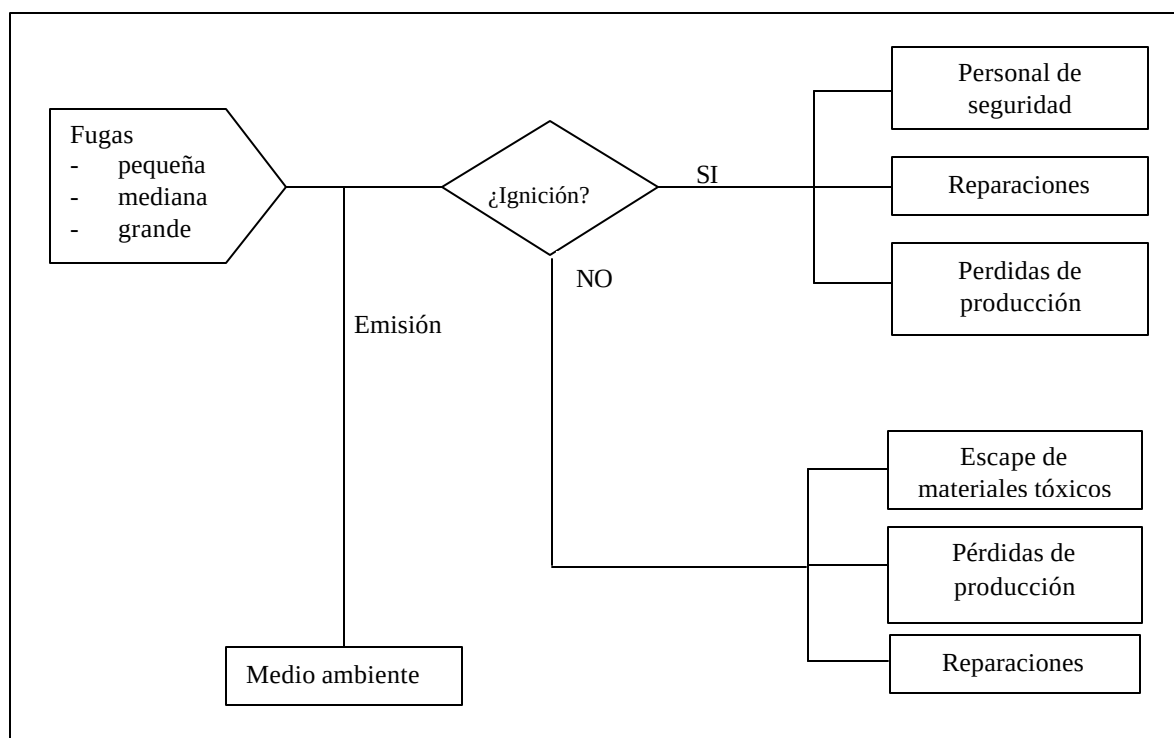


Figura 6.1 Árbol de consecuencias originadas por fuga de materiales (Angelsen & Drake, 1999).

Existen diversos paquetes y programas de cómputo para la simulación de efectos causados por diversos eventos. Permiten determinar la zona de riesgo y su forma; el cálculo de una u otra de las formas (plumas, círculos o pétalos) depende de la cantidad de datos con los cuáles se cuenta para hacer la modelación matemática correspondiente.

Asimismo el área de la zona vulnerable depende de la distancia que recorrerá la sustancia en el aire antes de dispersarse y diluirse a una concentración menor al “nivel de afectación” para producir efectos agudos a la salud o la muerte de las poblaciones (Beltrán, 1996).

La información requerida para el análisis de la zona vulnerable debe incluir planos con la siguiente información (Zagal, 1996):

- ✓ Carreteras, vías de ferrocarril, aeropuertos,
- ✓ Edificios.
- ✓ Centros comerciales y almacenes.
- ✓ Industrias, y de ser posible materiales manejados y en qué cantidades
- ✓ Muelles.
- ✓ Líneas de alta tensión.
- ✓ Plantas de tratamiento de agua residual.
- ✓ Gasoductos y oleoductos.
- ✓ Presas, lagos y ríos.
- ✓ Minas.
- ✓ Áreas altas y bajas.
- ✓ Escuelas.
- ✓ Hospitales.

Con la finalidad de determinar las posibles consecuencias a las que se vería expuesta la población, es de gran utilidad contar con información, al menos estimativa, del número de habitantes del área, incluyendo las horas en que se presenta la mayor concentración, por ejemplo, en las escuelas, hospitales, centros comerciales, templos o centros de reunión social. Cuando se lleva a cabo el análisis de accidentes, resulta útil contar con el registro de accidentes que han ocurrido con anterioridad en la zona, las causas y consecuencias de ellos (Zagal, 1996)

Se recomienda, que con base en la información recabada se realice un recorrido por el sitio, llevando a cabo una verificación visual sobre la topografía, ubicación y cantidad de población presente. Además, en ésta misma verificación se podrán conocer los elementos de mayor riesgo, como son los mostrados en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Objetos de riesgo (Zagal, 1996).

Objeto de riesgo	Peligros
Muelles	Cantidades variables de muchos materiales peligrosos. Grúas, vehículos
Almacenes	Cantidades variables de muchos materiales peligrosos, vehículos.
Barcos	Mercancías peligrosas (cloro, gas LP, amoníaco, sosa cáustica, etc.)
Ferrocarriles	Mercancías peligrosas (cloro, gas LP, amoníaco, sosa cáustica, etc.)
Canales	Mercancías peligrosas
Aeropuertos y aviones	Combustibles almacenados, mercancías peligrosas en tránsito, vehículos de carga
Industrias de Proceso: Refinerías, petroquímicas, química inorgánica, pinturas, farmacéutica, metalurgia, papel, textiles.	Recipientes a presión, tanques de almacenamiento, equipo de proceso, materiales peligrosos, catalizadores, residuos peligrosos, alto voltaje.
Otras industrias: Plásticos, Hule, Madera	Recipientes a presión, tanques de almacenamiento, materiales peligrosos.
Hidroeléctricas	Alto voltaje, agua embalsada
Termoeléctricas	Sustancias inflamables, recipientes sujetos a presión, vapor de agua, agua caliente, alto voltaje.
Gasoductos	Gas inflamable y a presión
Tuberías	Materiales inflamables, venenosos y peligrosos al ambiente, tuberías a presión
Terminales de PEMEX	Materiales inflamables, venenosos y peligrosos al ambiente
Tiendas departamentales	Materiales combustibles y venenosos, aerosoles
Tiendas de materiales para construcción	Gran cantidad de madera, materiales combustibles y venenosos
Tapalerías	Materiales combustibles y explosivos
Plantas de tratamiento de agua, albercas	Materiales peligrosos, como cloro
Hospitales	Materiales infecciosos y químicos peligrosos / venenosos
Escuelas	Materiales químicos peligrosos
Hoteles	Combustibles, recipientes sujetos a presión
Silos	Polvos combustibles
Canteras, túneles	Rocas inestables, agua contaminada, gases venenosos, maquinaria pesada
Carreteras	Vehículos, mercancías peligrosas

En el siguiente paso se deben evaluar los posibles daños que pueden sufrir tanto la comunidad, los recursos naturales y la propiedad. Entre las afectaciones más características se encuentran las indicadas en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Tipo de afectaciones sufridas por accidentes tecnológicos (Zagal, 1996).

Objeto de riesgo	Peligros
Población	
Trabajadores, visitantes, vecinos, personal de servicios, niños, ancianos.	Ansiedad, lesiones, decesos
Medio ambiente	
Cuerpos de agua superficiales (mar, lagos, ríos, canales)	Colisiones de embarcaciones, ahogados, derrames de materiales peligrosos
Agua potable	Contaminación, mal sabor, sabotaje.
Áreas recreativas	Derrames de materiales peligrosos, incendios
Reservas naturales	Derrames de materiales peligrosos
Tierras de cultivo	Derrames de materiales peligrosos
Bosques	Incendios
Propiedad	
Aeropuertos	Desde pequeños daños hasta la destrucción total
Estaciones de trenes	Colisiones, desde daños pequeños hasta destrucción total
Túneles para vehículos y trenes	Colisiones, desde daños pequeños hasta destrucción total
Muelles	Colisiones, derrames de material peligrosos y daños, desde menores hasta la destrucción total
Hospitales, escuelas, hoteles, teatros, estudios y cines	Desde daños menores hasta la destrucción total
Industrias	Explosiones, incendios, derrames y fugas de materiales peligrosos, desde daños menores hasta la destrucción total

Como se manifestó en la tabla 3.1 (Accidentes seleccionados que involucran gas, gas natural o sus componentes) del capítulo 3, de este documento, existen los llamados *accidentes mayores o catastróficos*, los cuáles conviene caracterizarlos de acuerdo al nivel de emisiones (temperatura, presión o sustancia tóxica) que puedan producir. De esta forma, se puede considerar como un *accidente mayor o catastrófico* a: (INE^b, 2001)

- Cualquier liberación de una sustancia peligrosa, en la que la cantidad total liberada sea mayor a la que se haya fijado como umbral o límite (cantidad reportada o de control).
- Cualquier fuego mayor que de lugar a la elevación de radiación térmica en el lugar o límite de la planta o instalación, que excede los 5 kw/m² por varios segundos.
- Cualquier explosión de vapor o gas que pueda ocasionar ondas de sobrepresión iguales o mayores de 1 lb/plg².
- Cualquier explosión de una sustancia reactiva o explosiva que pueda afectar a edificios o plantas, en la vecindad inmediata, tanto como para dañarlos o volverlos inoperantes por algún tiempo.
- Cualquier liberación de sustancias tóxicas, en la que la cantidad liberada sea suficiente para alcanzar una concentración mayor o igual al *nivel que representa un peligro inmediato para la vida o la salud humana* (IDLH²³ por sus siglas en inglés), en áreas aledañas a la fuente emisora.

Estas definiciones son aplicables al caso de transporte de materiales peligrosos, y para este caso particular del transporte de gas LP, en cualquiera de sus modalidades (carretero, ferroviario y / o marítimo).

²³ IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health.

6.2 MODELO DE DISPERSIÓN DE UNA NUBE TÓXICA

Cuando se libera un líquido o un gas a la atmósfera, como consecuencia de la evaporación de la sustancia al mezclarse con el aire, puede formarse una nube de vapor. Dicha nube puede viajar por efecto del viento y ser diluida al mezclarse con mayores cantidades de aire. De manera eventual la nube de vapor puede extenderse hasta niveles en los cuales no se superen los valores de toxicidad que puedan dañar a las poblaciones. En este caso, son de especial importancia las características de la nube que se forma (longitud, ancho, altura y cobertura) (U.S.EPA^b, 1997).

Para determinar el tamaño potencial de una nube tóxica se requiere conocer un conjunto de variables, entre las cuales se encuentran las siguientes (Lees, 1991):

- Cantidad y tipo del fluido liberado.
- Condiciones de presión y temperatura de la sustancia.
- Porcentaje del líquido que pasa a la fase vapor.
- Formación de aerosol.
- Degradación de un derrame confinado.
- Condiciones climáticas en el momento en que se produce el escape.
- Condiciones topográficas locales.

La generación del vapor que puede dar lugar a la nube puede provenir de múltiples fuentes, dependiendo de las fases del material que se escapa. Para poder llevar a cabo la modelación, tanto de su formación como de la dispersión del material, es determinante conocer la velocidad a la cuál el vapor escapa a la atmósfera

Por medio de la modelación numérica de la dispersión atmosférica se trata de simular el comportamiento de una sustancia emitida al ambiente. Existen distintos algoritmos de modelación, pero en general se resuelve la ecuación general de transporte del contaminante (Lees, 1991).

Dos de los elementos considerados en la modelación numérica son las variaciones debidas al tipo de fuente y las condiciones atmosféricas que pueden estar presentes en el momento de la emisión (Lees, 1991).

Por lo que respecta al tipo de **fuentes**, ésta se puede considerar de dos tipos: (U.S.EPA^b, 1997)

- a) Fuente instantánea: el contaminante se libera a la atmósfera en su totalidad en un lapso de tiempo muy corto o en forma inmediata (desde algunos pocos segundos a un minuto).
- b) Fuente continúa: el contaminante se libera a una velocidad que permite asumir un modelo estacionario por un largo período de tiempo, y produce plumas de gas o vapor cuya forma depende de las condiciones de estabilidad atmosférica que imperen en el momento de la liberación del material.

Generalmente, las liberaciones reales de sustancias no corresponden, en forma, a ninguna de estas dos consideraciones. Normalmente se acercan en mayor medida a alguno de los modelos, aunque sin perder características del otro.

En cuanto a las condiciones de **estabilidad atmosférica**, éstas juegan un papel esencial en la forma y dirección en que se dispersará el contaminante en un área determinada. Se consideran como un indicador de la turbulencia del aire; a mayor turbulencia atmosférica, más rápida será la dispersión.

El esquema característico de estabilidad atmosférica fue desarrollado por F. Pasquill y modificado por F.A. Gifford (U.S.EPA^b, 1997). Para muchos modelos de simulación, se usan condiciones que van desde una atmósfera muy inestable (tipo A) hasta una atmósfera muy estable (tipo F), tal y como se muestra en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Categorías de estabilidad atmosférica (EPA^b, 1997).

Estabilidad	Categoría	Características
A, B	Inestable	Implica una mayor turbulencia y dispersión más rápida. La dispersión de contaminantes se produce por convección y mezcla forzada (las parcelas de aire se mueven libremente hacia arriba o hacia abajo). Es la situación típica de los días soleados, especialmente cuando la velocidad del viento y la humedad son bajas), y también cuando masas de aire caliente fluyen sobre superficies frías.
C	Neutral	El cambio de velocidad ambiental es aproximadamente igual al cambio de velocidad seca adiabática, la convección y la mezcla de las capas de aire se lleva a cabo sin forzar. Se relaciona con cielos nublados y velocidades del viento moderadamente fuertes.
D	Estable	Se presenta menor turbulencia y dispersión más lenta. El cambio de velocidad atmosférica es subadiabática (menor que la adiabática), la dispersión de los contaminantes se da por convección y mezcla forzada. Físicamente, este tipo de condiciones se da en días que tienen alturas de mezclado relativamente bajas, no hay fuentes de calor y la velocidad del viento es baja.
E, F	Muy estable	Se presenta una temperatura de inversión, es decir, la superficie de la tierra y la superficie próxima al aire se enfría rápidamente y la temperatura aumenta con la altura. Es común que se presente por la noche con cielos bajos y claros (radiación inversa).

De acuerdo a Pasquill (U.S.EPA^b, 1997), la estabilidad puede determinarse a partir de la velocidad del viento y las condiciones de insolación (durante el día) o nubosidad (por las noches). En la tabla 6.4 se indican los valores de ambos factores para determinar la categoría atmosférica.

Tabla 6.4 Categorías de estabilidad de Pasquill (Lees, 1991).

Velocidad del viento (m/s) a una altura de 10 m	Insolación			Noche	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Ligeramente nublado o $\geq 4/8$ de nubosidad	$\geq 3/8$ nubosidad
< 2	A	A – B	B	----	----
2- 3	A – B	B	C	E	F
3 –5	B	B – C	C	D	E
5 –6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

La *noche* se refiere al período comprendido una hora después de la puesta de sol hasta una hora antes del amanecer. El termino de *insolación fuerte* se refiere a un mediodía soleado de verano (en Inglaterra) y el termino *insolación ligera* se refiere a condiciones similares en un día de invierno. Si durante el día o la noche se presenta nubosidad, se debe asumir que la condición de estabilidad atmosférica es D sin importar las condiciones de viento que se presenten.

En muchos de los modelos de simulación es necesario determinar en forma numérica el valor del coeficiente de estabilidad para lo cual se pueden usar las ecuaciones desarrolladas por Martín (1976) (ecuaciones 6.1 y 6.2). Los valores de constantes asociadas a ellas se pueden obtener de la tabla 6.5, o usar las ecuaciones recomendadas por Briggs (1973) (Tabla 6.6), el cual utilizó el experimento de McElroy y Pooler para desarrollar ecuaciones de frecuencias σ_y y σ_z como función de la distancia para un rango de $10^2 < x < 10^4$ metros (U.S.EPA^b, 1997). El tamaño del factor, describe como afecta la turbulencia a la nube dispersa.

La σ_y indica ancho y σ_z la altura de la dispersión.

$$s_y = a x^{0.894} \quad (6.1)$$

$$s_z = c x^d + f \quad (6.2)$$

Tabla 6.5 Relaciones numéricas para obtener los coeficientes de dispersión s_y y s_z (x = distancia bajo el viento) (Martín, 1976).

Estabilidad	$x \leq 1 \text{ km}$				$x \geq 1 \text{ km}$		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2
C	104	61	0.911	0	61	0.911	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34
F	34	14.35	0.74	-0.35	62.6	0.18	-48.6

Tabla 6.6 Ecuaciones de Briggs para obtener los coeficientes de dispersión s_y y s_z (x = distancia bajo el viento) (EPA^b, 1997)

Estabilidad	s_y	s_z
A, B	$0.32 \bullet x (1+0.0004 \bullet x)^{-1/2}$	$0.24 \bullet x (1+0.001 \bullet x)^{1/2}$
C	$0.22 \bullet x (1+0.0004 \bullet x)^{-1/2}$	$0.20 \bullet x$
D	$0.16 \bullet x (1+0.0004 \bullet x)^{-1/2}$	$0.14 \bullet x (1+0.0003 \bullet x)^{-1/2}$
E, F	$0.11 \bullet x (1+0.0004 \bullet x)^{-1/2}$	$0.08 \bullet x (1+0.00015 \bullet x)^{-1/2}$

Para aquellos casos en que la fuga de material se lleva a una altura superior a 10 m, la velocidad de dispersión se puede calcular mediante la ecuación 6.3 (Masters, 1990):

$$u_1 / u_2 = (z_1 / z_2)^p \quad (6.3)$$

donde

- u_1, u_2 velocidad del viento a la mayor y menor altura, respectivamente
- z_1, z_2 mayor y menor altura, respectivamente
- p parámetro adimensional que varía con la estabilidad atmosférica

El valor del parámetro p , puede ser obtenido a partir de valores recomendados por EPA para superficies rugosas en las cercanías del anemómetro. Para superficies con terrenos suaves o planos, o sobre cuerpos de agua, los valores de p deben ser escalados por un factor de 0.6 (Lees, 1991). La estabilidad atmosférica corresponde a la indicada en la tabla 6.7.

Tabla 6.7 Valor del exponente “p” de acuerdo a los perfiles de viento, en terrenos rugosos (Peterson, 1978)

Estabilidad	Descripción	Exponente “p”
A	Muy inestable	0.15
B	Moderadamente inestable	0.15
C	Ligeramente inestable	0.20
D	Neutral	0.25
E	Ligeramente estable	0.40
F	Estable	0.60

De acuerdo a algunas investigaciones, en el caso de un gas más pesado que el aire, como lo es el gas LP, el coeficiente de dispersión σ_z (de acuerdo a las ecuaciones de Pasquill – Gifford), tiende a ser la mitad del valor del coeficiente de dispersión horizontal σ_y . Por otro parte, el Bureau of Mines (de los Estados

Unidos) indica que para gases pesados es conveniente utilizar la relación indicada en la ecuación 6.4 (Lees, 1991).

$$\sigma_z = 0.2 \sigma_y \quad (6.4)$$

Asimismo, para determinar la dimensión alcanzada por una fuga de gas LP puede considerarse que existe flujo sónico durante el escape del gas y no tomar en cuenta los cambios de presión y temperatura, así como la condición de choque que presenta el gas con el aire al escapar. Estos factores se consideran para un evento máximo (Lees, 1991).

Sin embargo, la descarga instantánea de un gas licuado inflamable puede dar lugar a una nube inflamable o potencialmente explosiva, 25% mayor en su ancho máximo que en su longitud, bajo condiciones atmosféricas neutrales cuando los vientos tienen una velocidad moderada. Bajo condiciones atmosféricas más estables con menores velocidades de viento, el ancho máximo de la nube puede ser hasta aproximadamente el 80% de su longitud. Bajo combinaciones específicas, especialmente para fugas de gran magnitud, el ancho de las nubes puede llegar a ser hasta el 150% de su longitud (U.S.EPA^b, 1997).

En el caso de fugas de gases o vapores pesados de tipo continuo, bajo condiciones de neutralidad atmosférica, el ancho de la pluma que se forma se encuentra en el rango del 30 al 60% de su longitud cuando los vientos tienen velocidad moderada. Bajo condiciones estables, el ancho de la nube puede variar del 75 al 90% de su longitud (U.S.EPA^b, 1997).

6.3 FORMACIÓN DE NUBES INFLAMABLES Y NUBES EXPLOSIVAS

6.3.1 Nubes Inflamables

Uno de los factores básicos a calcular durante una fuga de gas LP, es la concentración en el tiempo, a partir del punto de escape, que se alcanza a distintas distancias. Para determinar este parámetro, se pueden usar las ecuaciones 6.5 y 6.6, dependiendo si se trata de un escape de chorro (o escape jet) o de la formación de la pluma de dispersión (ambas consideran consideraciones de estabilidad atmosférica neutral) (Lees, 1991):

a) Para escape de chorro

$$c(z,r) = \left(\frac{k_1 d_0}{z} \right) \left(\frac{M_O T_a}{M_a T_O} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{M}}{M_O} \right) \exp \left[- \left(\frac{k_2 r}{z} \right)^2 \right] \quad (6.5)$$

donde

c	concentración (fracción volumen)
d ₀	diámetro efectivo de la descarga (m)
M _O	peso molecular del material descargado
M _a	peso molecular del aire
$\bar{M}$	peso molecular promedio de la mezcla de gas a la distancia axial z
r	distancia radial desde el punto de fuga (m)
T _O	temperatura absoluta del material descargado (K)
T _a	temperatura absoluta del aire (K)
z	longitud axial o altura vertical (m)
k ₁ , k ₂	constantes

Se considera como diámetro efectivo de la descarga, d₀, el diámetro del orificio después de que el chorro se ha expandido a presión atmosférica, pero antes de que cualquier entrampamiento ocurra. Puede considerarse como el diámetro del orificio de venteo, mientras que para una falla de la instalación, éste se puede referir al tamaño y presión de escape en el “agujero” efectivo que se forma.

b) Para la pluma de dispersión

La expresión para determinar la concentración es:

$$c(z, r) = \frac{k_3 v_o^{2/3}}{z^{5/3} g^{1/3}} \left(\frac{M_a T_o}{M_a T_o - M_o T_a} \right)^{1/3} \exp \left[- \left(\frac{k_4 r}{z} \right)^2 \right] \quad (6.6)$$

donde

g fuerza de gravedad (m/s²)
 v_o flujo volumétrico del material descargado (m³/s)
 T_o temperatura del material descargado (K)
 k₃, k₄ constantes

Para determinar la distancia a la cuál ocurre la transición entre escape de chorro a pluma de dispersión, se usan las ecuaciones 6.7 y 6.8 (Lees, 1991).

$$z_{tr} = \frac{k_5 w_o d_o}{(g' d_o)^{1/2}} \quad (6.7)$$

$$\text{con } g' = g \left(\frac{M_a T_o - M_o T_a}{M_a T_o} \right)$$

donde

z_{tr} distancia de transición (m)
 w_o velocidad del material descargado (m/s)
 k₅ constantes
 g' fuerza de gravedad (m/s²) ajustada a condiciones de peso y temperatura del aire y material involucrado.

Las ecuaciones 6.5 y 6.6 permiten determinar la longitud axial del evento, así como ser integradas al volumen y cantidad del material inflamable. De esta forma se pueden obtener las ecuaciones 6.8 a 6.10 aplicables a un escape de chorro y las ecuaciones 6.11 a 6.13 aplicables una pluma de dispersión:

a) Para escape de chorro²⁴

$$z_L = \frac{k_1 d_o}{c_L} \left(\frac{M_a T_a}{M_o T_o} \right)^{1/2} \quad (6.8)$$

$$v_{FL} = \frac{\pi k_1^3}{9 k_2^2} \left(\frac{M_a T_a}{M_o T_o} \right)^{3/2} d_o^3 \left(\frac{1}{c_L^3} - \frac{1}{c_U^3} \right) \quad (6.9)$$

²⁴ Las ecuaciones de los incisos a) han sido estudiadas por Marshall, el cual a su vez se basa en trabajo de Long (1963), en las ecuaciones de chorro de Morton, Taylor y Turner (1956), Yih (1951) y Rouse (Lees, 1991).

$$Q_{FL} = \frac{\pi k_1^3}{6k_2^2} \left(\frac{273.15}{22.4} \right) \left(\frac{M_a}{T_o} \right)^{3/2} \left(\frac{T_a}{M_o} \right)^{1/2} d_o^3 \left(\frac{1}{c_L^2} - \frac{1}{c_U^2} \right) \quad (6.10)$$

donde

z_L distancia a la que la concentración del material alcanza el límite de inflamabilidad menor (m)

Q_{FL} masa del material inflamable en la nube, que está entre los límites de inflamabilidad (kg)

V_{FL} volumen de la nube entre los límites de inflamabilidad (m^3)

c_L volumen de la nube entre los límites de inflamabilidad (m^3)

c_U volumen de la nube entre los límites de inflamabilidad (m^3)

Nota: El subíndice L se refiere al límite menor de inflamabilidad y U al límite superior de inflamabilidad.

b) Para pluma de dispersión, las expresiones para z_L , Q_{FL} y V_{FL} son:

$$z_L = \frac{k_3^{3/5} v_o^{2/5}}{g^{1/5} c_L^{3/5}} \left(\frac{M_a T_o}{M_a T_o - M_o T_a} \right)^{1/5} \quad (6.11)$$

$$V_{FL} = \frac{5\pi k_3^{9/5} v_o^{6/5}}{27k_4^2 g^{3/5}} \left(\frac{M_a T_o}{M_a T_o - M_o T_a} \right)^{3/5} \left(\frac{1}{c_L^{9/5}} - \frac{1}{c_U^{9/5}} \right) \quad (6.12)$$

$$Q_{FL} = \frac{5\pi M_o k_3^{9/5} v_o^{6/5}}{12T_a k_4^2 g^{3/5}} \left(\frac{273.15}{22.4} \right) \left(\frac{M_a T_o}{M_a T_o - M_o T_a} \right)^{3/5} \left(\frac{1}{c_L^{4/5}} - \frac{1}{c_U^{4/5}} \right) \quad (6.13)$$

Sin embargo, la dispersión es afectada por tres diferentes aspectos de condiciones atmosféricas relacionados entre sí y dependientes, uno de otro, como son (Lees, 1991):

- el grado de turbulencia,
- la velocidad del viento y
- las condiciones de estabilidad atmosférica.

La altura de pluma de gas ($z_{m\acute{a}x}$), se puede determinar utilizando la ecuación de Marshall (1977) (ecuación 6.14), la cual se basa en los trabajos de Morton *et. al.* (1956):

$$z_{m\acute{a}x} = \frac{k_6 v_o^{1/4}}{G^{3/7}} \left(\frac{M_a T_o - M_o T_a}{M_a T_o} \right) \quad (6.14)$$

Donde el parámetro G indica el gradiente de temperatura con respecto a la altura, el cual puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

$$G = \frac{g}{T_a} \left(\frac{dT_a}{dZ} + \Gamma \right) \quad (6.15)$$

donde

T_a

Γ constante adiabático ($0.0098 \text{ } ^\circ\text{C/m}$)

$\frac{dT_a}{dZ}$ el gradiente de temperatura

Un valor para el gradiente de temperatura (dT_a/dz) se encuentra entre $[0 - 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}]$. Los valores para el parámetro G se indican en la tabla 6.8.

Tabla 6.8 Gradiente de temperatura con respecto a la altura²⁵ (Lees, 1991)

$\frac{dT_a}{dz} \text{ (} ^\circ\text{C/m)}$	$G \text{ (s}^{-2}\text{)}$
0 (isotérmica)	0.000334
0.01	0.000674
0.1	0.00374

La ecuación 6.14 establece un límite en la altura de la pluma para condiciones de estabilidad donde la temperatura se incrementa con la altura. La altura calculada de la pluma ($z_{\text{máx}}$) puede compararse con la altura z_L a la cual la concentración alcanza el límite menor de inflamabilidad (Ecuación 6.8). Si $z_{\text{máx}}$ es menor que z_L , la pluma no alcanza la suficiente altura para diluirse debajo del límite menor de inflamabilidad.

Los valores recomendados para las constantes k_1 a k_6 en la tabla 6.9 (Lees, 1991):

Tabla 6.9 Valor de constantes para calcular la concentración de nubes de gases inflamables (Lees, 1991)

Constante	Valor recomendado	Fuente
k_1	9	Long (1963), Marshall (1977)
K_2	12.7	Marshall (1977)
K_3	17	Long (1963), Marshall (Lees, 1991)
K_4	13	Long (1963)
K_5	1.55	Marshall (1977)
K_6	6.65	Morton, Taylor y Turner (1956)

6.3.2 Nubes Explosivas

Con los resultados del estudio de riesgo se puede evaluar la exposición del personal, instalaciones y la comunidad en su conjunto. De acuerdo con lo anterior, el diseño del espaciamiento entre plantas y edificios, se debe cumplir con los siguientes criterios (Butrón, 1996):

- La nube explosiva originada en el área de tanques, no deberá alcanzar ninguna parte de los edificios mayores ni planta(s) vecina(s).
- Los edificios y equipos mayores deberán quedar fuera del círculo de una onda expansiva de 3.0 psi producida por una explosión originada en otra área.
- Los edificios y equipos mayores que puedan ser afectados por una onda expansiva entre 1.0 y 3.0 psi, se diseñarán para resistir una onda de al menos 2.0 psi.
- Las instalaciones que quedan dentro de la circunferencia de una onda expansiva de 1.0 psi o menor, se pueden considerar fuera del área peligrosa.

Las ondas expansivas se expresan en lb/in^2 o kg/m^2 , y van desde 0.5 psi hasta 30 psi. La extensión de los daños se puede mostrar en un diagrama de pétalos.

²⁵ Los valores de gradiente de temperatura son asignados por Marshall (Lees, 1991) como característicos del Reino Unido, y por tanto se deben ajustar en la modelación tomando en consideración las condiciones del sitio donde ocurre la descarga.

A los riesgos inherentes de una onda expansiva se deben agregar los riesgos debidos al efecto dominó con otras instalaciones. En el caso de compañías almacenadoras y distribuidoras de gas LP, el riesgo de este tipo se presenta en los distintos tanques de almacenamiento así como en los autotanques dedicados a la distribución en comercios y domicilios. Esto es importante pues, como se señaló anteriormente, se sabe que dentro de la circunferencia de una onda explosiva de 5 psi la destrucción originada es *total*.

La evaluación del Daño Máximo Posible (DMP) también puede tener en cuenta los daños causados a los sistemas de tuberías de proceso, rociadores, válvulas de control, tuberías protegidas, sistema de agua contra incendio, etc.

Para el Daño Catastrófico Posible (DCP), no se requiere tomar en cuenta ninguna instalación, ya que por definición, la planta quedará totalmente destruida.

Las tablas 6.10 y 6.11, proporcionan algunos criterios que servirán como guías para la toma de decisiones.

Tabla 6.10 Diámetro de las ondas expansivas (metros)

Diámetro	Presión de la Onda para el caso Daño Máximo Posible (psi)								
	30	20	10	7	5	3	2	1	0.5
ft	88	110	150	180	210	290	350	590	860
m	27	33.5	45.75	55	64	88.5	106.75	180	262
Diámetro	Presión de la Onda para Daño Catastrófico Probable (psi)								
	30	20	10	7	5	3	2	1	0.5
ft	150	200	240	300	360	490	690	980	1700
m	45.75	61	73.2	91.5	109.8	149.5	189	299	518.5

Tabla 6.11 Análisis de nubes explosivas

Planta						Área / Depto					
Equipo											
Material											
Capacidad Calorífica					Peso molecular			M			
Temp.	C _p	Temp	C _p	Presión del sistema			P	psi			
T _a (T ₁)				Presión de vapor a T ₁			P _v	psi			
				Temperatura del proceso			T ₁	°C			
				Punto de ebullición a 1 atm			T ₂	°C			
		T _n (T ₂)		Densidad a T ₁			ρ	g/ml			
$\bar{C}_p = \sqrt[n]{C_{pa} * C_{pb} * ... C_{pn}}$				Factor de compresibilidad			C				
$\bar{C}_p$	Cal / g °C			(Gases) Volumen en condic normales			V _G	ft ³			
				(Líquidos) Volumen en proceso			V _L	gal			
				Calor de vaporización líquido a T ₂			ΔH _v	Cal/g			
				Límite inferior de explosividad			LEL	%			
				Límite superior de explosividad			UEL	%			
				Altura de la nube			h	(10) ft			
				Calor de combustión			ΔH _c	BTU / lb			
1. Cálculo del Peso del Material en el Sistema											
a) Gases			WG = 0.002785 MV _G				W _G	lb			
b) Líquidos			WL = 8.35 * ρ * V _L				W _L	lb			
Si T ₂ < 21.1 °C			W = W _G = W _L								
Si T ₂ > 21.1 °C			$W = W_L \frac{\bar{C}_p(T_1 - T_2)}{\Delta H_v}$				W	lb			
2. Cálculo de la Magnitud de la Nube											
Fracción del material en la nube $v = \frac{LEL(\%) + UEL(\%)}{2 * 100\%}$							v				
Diámetro de la nube $D_c = 7.017 \sqrt{\frac{W}{M_v}}$ si h > 10 ft $D_c = 22.19 \sqrt{\frac{W}{h * M_v}}$							D _c	ft			
							(D _c)	m			
2. Cálculo del Daño Probable											
a) Daño Máximo Probable						b) Daño Catastrófico Probable					
Energía desprendida		W _{e1}	Ton TNT	Energía desprendida		W _{e2}	Ton TNT				
$W_e = \frac{W \Delta H_c}{2 * 10^8}$				$W_e = \frac{W \Delta H_c}{4 * 10^7}$							
Ondas expansivas						Ondas expansivas					
10 psi	7 psi	5 psi	3 psi	2 psi	1 psi	10 psi	7 psi	5 psi	3 psi	2 psi	1 psi
ft	ft	ft	ft	ft	ft	ft	ft	ft	ft	ft	ft
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Extensión del daño						Extensión del daño					

Es importante recordar que al producirse una onda de sobrepresión se ocasiona una gran cantidad de afectaciones al personal de la planta, debido a los objetos proyectados a gran velocidad, como son vidrios rotos, bardas y techos que se desprenden, etc., por lo que al diseñar las instalaciones es conveniente emplear recomendaciones de construcción segura.

En varios estudios sobre las características de los materiales que provocaron nubes de vapor no confinadas (UVCE²⁶) se ha determinado que los vapores de productos inflamables que contienen entre 2 y 6 átomos de carbono han sido responsables de prácticamente todos los casos de procesos explosivos con preponderancia de los hidrocarburos con 3 y 4 átomos de carbono, el cual da la composición del gas LP que se maneja en México (Butrón, 1995).

Una excepción significativa es el metano. Aunque este material, en forma de gas natural, se extrae y maneja en grandes cantidades en todo el mundo, sólo se ha reportado un incidente explosivo de nubes de vapor no confinadas, y aún en este caso la explosión no fue muy severa. La razón más probable de por que las fugas de metano no provoquen, en general, nubes explosivas puede deberse a la baja reactividad relativa de este compuesto, respecto a otros vapores de hidrocarburos, como evidencia, entre otras características físicas, su baja velocidad de combustión (por ejemplo, 0.40 m/s contra 0.65 m/s para el etileno), lo que permite su rápida difusión en la atmósfera. Se ha encontrado, asimismo, que el gas natural es causante solamente 10% de las fugas cuando se compara con los provocados por el gas LP por unidad de energía usada (Butrón, 1995).

En la evaluación de nubes explosivas, es posible hacer las siguientes suposiciones (Butrón, 1995):

1. La fuga del material es instantánea y no se considera el caso de un escape paulatino, excepto en fugas de tuberías de gran capacidad y con material transportado desde instalaciones alejadas.
2. El material emitido se vaporiza instantáneamente y la nube se forma de inmediato. Las condiciones de inflamabilidad de la nube se estimarán por medio de las propiedades fisicoquímicas y las condiciones termodinámicas del vapor o líquido inmediatamente anteriores a la fuga.
3. La forma de la nube es cilíndrica y la altura corresponde a su eje vertical. Para evitar complicaciones de cálculo, en el modelo no se admiten distorsiones ocasionadas por el viento y / o estructuras que se localicen en las cercanías del lugar del escape.
4. La composición de la nube se considera uniforme y la concentración del material inflamable, con respecto al aire, corresponde al punto medio de los límites inferior y superior de explosividad (LIE y LSE respectivamente).
5. El calor de combustión del material de referencia, en este caso TNT²⁷, se tomará como 2000 BTU/lb. Con este valor se podrá calcular la cantidad de vapor inflamable equivalente al peso del TNT.
6. La temperatura ambiente se considera constante a 21°C (70 °F).
7. Para fines de cálculo, la cantidad de material inflamable en la nube explosiva quedará entre los límites de 10 a 45 Ton. En este sentido, se debe tener en cuenta que los materiales más reactivos o que presenten una mayor velocidad de combustión pueden producir una transición más rápida hacia una nubes de vapor no confinadas para una cantidad determinada.
8. Aunque la definición de UVCE es la de Explosión de Nubes de Vapor no Confinadas, en la práctica se ha encontrado que se requiere una cierta cantidad de obstáculos y / o confinamiento para ayudar a la transición de un fenómeno de combustión simple, por ejemplo una flama hacia una deflagración. Este fenómeno está ligado con las flamas de difusión.
9. De acuerdo a los resultados de los incidentes investigados se debe considerar *siempre* que los vapores de compuestos orgánicos *deflagran* y nunca (o casi nunca) *detonan*. La diferencia entre dos fenómenos es fundamental, pues en la *deflagración* se producen ondas de sobrepresión, cuya velocidad es menor a la del sonido, la sobrepresión máxima está en el orden de 15 psi o menos y la

²⁶ UVCE: Unconfined Vapor Cloud Explosion.

²⁷ TNT: Trinitrotolueno.

duración de la fase positiva es de 20 a 100 ms; en tanto que en la *detonación* las ondas de choque producidas rebasan con mucho la velocidad del sonido.

10. Las casas habitación, edificios y áreas de alta concentración de personal, deben quedar fuera del círculo de una onda expansiva de 3.0 psi (0.20 kg/cm^2) producida por una explosión de nubes de vapor no confinadas (Área de Afectación).
11. El área de amortiguamiento quedará comprendida entre las ondas de sobrepresión de 3.0 psi a 1.0 psi (0.20 a 0.07 kg/cm^2), considerando un factor de eficiencia $f = 0.2$.
12. Las áreas que se encuentran limitadas por la circunferencia de la onda expansiva de 0.5 psi (0.035 kg/cm^2) o menor pueden considerarse como fuera del área de peligro.

6.3.3 Incendios

Una vez que se produce el escape de gas LP, y el material encuentra una fuente de ignición se producirá una flama cuya magnitud depende de diversos factores entre los cuáles se encuentra la cantidad de material que se escapa al ambiente y la acumulación del mismo o su dispersión de acuerdo a las condiciones atmosféricas presentes.



Figura 6.2 Incendio de gas LP en esferas de almacenamiento en San Juan Ixhuatepec, México, el 19 de noviembre de 1984 (Tudelft, 2001).

La longitud de la flama puede determinarse a partir de la siguiente ecuación (Jost, 1946):

$$L = \frac{ud^2}{4D} \quad (6.16)$$

donde

d diámetro de la tubería (m)
D coeficiente de difusión (m²/s)
u velocidad de escape del combustible (m/s)

En condiciones de estabilidad atmosférica (regimen laminar) el coeficiente de difusión (D) puede usarse como el coeficiente de difusión molecular (D_m), el cuál es un valor constante. Para este tipo de condiciones, la longitud de la flama es proporcional a la velocidad (Lees, 1991).

Cuando se tienen condiciones de inestabilidad atmosférica (regimen turbulento) el valor de D puede considerarse como el coeficiente de difusión de Eddy (D_e), el cuál es proporcional a la velocidad, *u*. En este regimen, la longitud de la flama (L) es independiente de la velocidad y puede calcularse de acuerdo a la ecuación (6.17) (Lees, 1991).

$$L = \frac{5.3 d}{C_t} \left[\frac{T_f}{\alpha_t T_n} \left(C_t + (1 - C_t) \frac{M_s}{M_n} \right) \right]^{1/2} \quad (6.17)$$

donde

C_t concentración del combustible en la mezcla estequiométrica (fracción mol)
d diámetro de la tubería (m)
M_n peso molecular del combustible
M_s peso molecular del fluido circundante (regularmente aire)
T_f temperatura de la flama adiabática (K)
T_n temperatura del combustible en la tubería (K)
α_t relación de número de moles del gas consumido y sin consumir en la mezcla estequiométrica

En lo que respecta al diámetro de la flama, puede ser determinada a partir de las ecuaciones 6.18 y 6.19:

$$Z = 0.29 \cdot x \cdot \left[\ln \frac{L}{x} \right]^{1/2} \quad (6.18)$$

$$Z_{\text{máx}} = 0.12 L \dots \text{con } x = 0.61 L \quad (6.19)$$

donde

Z diámetro de la flama (m)
x distancia axial (m)

Tabla 6.12 Temperatura de flama adiabática para distintas sustancias en aire (Lees,1991)

Sustancia	Temperatura de flama adiabática (°C)
Metano	1875
Etano	1895
Propano	1925
Butano	1895

Fuente: Lewis y von Elbe, 1961

Para una flama que proviene de un gas licuado inflamable se puede calcular el flujo del combustible (q) mediante la siguiente ecuación (Lees, 1991):

$$q = 0.0006785 L^{2.5} \quad (6.20)$$

donde

L longitud de la flama (m)
q flujo del combustible (kg / s)

Por lo que se refiere a la velocidad de la flama, ésta alcanza su velocidad máxima cuando se tienen concentraciones (gas – combustible) con valores de concentración estequiométrica o cerca de ella, es decir la mezcla en la cual todo el gas solo reacciona con el oxígeno disponible (AIChE, 1994).

Para evaluar los niveles de radiación térmica generados por un incendio, es conveniente emplear el procedimiento descrito en el manual "Guidelines for chemical process quantitative risk analysis" realizado en el concepto de Pool Fire, por la American Institut of Chemical Engineers (AIChE, 1994). Este procedimiento se resume en la tabla 6.13:

Tabla 6.13 Hoja de cálculo para la estimación de daño a causa de una sustancia inflamable (AIChE, 1994)

Hoja de cálculo para la estimación de un incendio									
Planta:									
Sustancia:									
Volumen del derrame:									m ³
Calor de combustión		ΔHc							KJ/kg
Tasa de combustión vertical Se asume una combustión cte.		Mb							kg/m ² s
Área de derrame		A							m ²
Diámetro equivalente		Deq							m
Temperatura ambiente		Ta							°C
Humedad relativa		%Hr							%
Presión de vapor del agua		Pw							Pa
Densidad del aire		Da							kg/m ³
Gravedad		G						9.81	m/s ²
Altura visible de la flama: $H = Deq * \frac{42Mb}{[Da(G * Deq)^{0.5}]^{0.61}}$								Calor total emitido: $Q = Mb * \Delta Hc * A$	_____
								Calor aceptado por el cuerpo receptor: $Q_r = 0.35 Q$	_____
Cálculo del factor de exposición $F_p = \frac{1}{4\pi X^2}$					Transmisividad atmosférica: X=distancia en metros entre la fuente y el receptor. $T = 2.02(Pw * X)^{-0.09}$				
Cálculo del flujo térmico recibido por un receptor: $Q_x = T * Q_r * F_p$									
X (m)	10	15	25	50	75	100	150	200	500
Fp									
T									
Qx									

En el cálculo del factor de explosión se asume que la radiación generada es puntual y que el receptor esta orientado en forma perpendicular a este punto. La transmisividad atmosférica se refiere al efecto de absorción o reflexión de la radiación térmica por el aire (PUMA, 1995).

Para evaluar los efectos producidos por los niveles de la radiación, debe consultarse la tabla 6.14.

Tabla 6.14 Daños en caso de incendio de acuerdo a la intensidad (Lees, 1991)

Intensidad KW/m²	Efecto observado
35.5	Daño al equipo de proceso.
25.0	Energía mínima requerida para prender madera expuesta infinitamente sin fuente de ignición directa.
12.5	Energía mínima requerida para incendiar la madera con fuente directa de ignición.
9.5	Daño mínimo de piel expuesta hasta 8 segundos, quemaduras de segundo grado después de 20 segundos de exposición.
4.0	Este nivel de radiación térmica es suficiente para causar daño al personal si no se protege en 20 segundos, se pueden sufrir quemaduras hasta de segundo grado si no hay protección.
1.58	Radiación máxima a la que se puede someter al ser humano sin daños graves debidos a exposiciones prolongadas.
1.20	Flujo térmico equivalente al sol en verano al medio día.

6.4 FLASH FIRE

Una forma de reacción química del gas LP que escapa es la formación de un evento denominado *flash fire*. La modelación numérica de este evento tiene especial importancia sobre todo en lo que se refiere al contacto directo con la flama y la radiación térmica. Depende de factores como el volumen de la nube de gas que se forma, el área que cubre y la emisión de calor producido. El tamaño de la nube depende parcialmente de las condiciones del escape del material y de la dispersión. Los efectos que se sufren de la radiación térmica dependen de la distancia de la flama, su altura, el poder emisor, las condiciones de transmisividad atmosférica y el tamaño de la nube (AIChE, 1994).

Para la nube de vapor formada se considera que esta tiene forma de una media elipse con un volumen V_r y un área A_r , lo cual puede determinarse a partir de las ecuaciones 6.21 y 6.22:

$$V_r = \frac{2\pi}{3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z (r_l^3 - r_u^3) \quad (6.21)$$

$$A_r = \frac{2\pi}{3} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) (r_l^2 + r_u^2) \quad (6.22)$$

con

$$r_l = \left[2 \ln \left(\frac{2m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z k_l} \right) \right]^{1/2} \quad (6.23)$$

$$r_u = \left[2 \ln \left(\frac{2m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z k_u} \right) \right]^{1/2} \quad (6.24)$$

donde

- V_r volumen de la capa de gas caliente (m^3)
 A_r área de radiación de la capa de gas caliente (m^2)
 k_l concentración del límite inferior de explosividad (kg / m^3)
 k_u concentración del límite superior de explosividad (kg / m^3)
 m masa total del vapor emitido (kg)
 r_l parámetro de explosividad de la nube al valor inferior
 r_u parámetro de explosividad de la nube al valor superior
 $\sigma_x \sigma_y \sigma_z$ coeficientes de la pluma de dispersión en las direcciones x, y, z (m)

Ya que la pérdida de energía (calor) predominantemente es por radiación, ésta se puede aproximar de acuerdo a la ecuación 6.25:

$$q_{rad} \cong A_r \sigma (\epsilon_g T_g^4 - \epsilon_a T_a^4) \quad (6.25)$$

donde

- q_{rad} calor perdido por radiación (W)
 T_a temperatura absoluta del medio ambiente (K)
 T_g temperatura absoluta del gas caliente (K)
 ϵ_a emisividad del medio ambiente
 ϵ_g emisividad del gas caliente
 σ constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

Si la capa de gas radiante tiene un espesor de hasta algunos cientos de metros, se observa que la emisividad del gas no cambia demasiado con el grosor o la temperatura, asignándole un valor de 0.5. Tomando en cuenta esta consideración, la ecuación 6.25 se puede transformar en la ecuación 6.26, en la cual el valor unitario de emisividad incluye distintos modos de transferencia de calor (Lees, 1991).

$$q_{rad} \cong A_r \sigma (T_g^4 - T_a^4) \quad (6.26)$$

Otra forma de determinar la pérdida de calor puede realizarse usando una aproximación de la ecuación 6.26:

$$q_{rad} = -c_p \rho V_t \frac{dT_g}{dt} \quad (6.27)$$

donde

- c_p calor específico de la capa de gas caliente (J/kg K)
 t tiempo (s)
 ρ densidad de la capa de gas caliente (kg/m^3) (Su valor es bastante cercano al del aire)

La intensidad de la radiación térmica efectiva (I_r) emitida, puede calcularse utilizando la ecuación 6.28 (Lees, 1991):

$$I_r = \sigma (T_g^4 - T_a^4) \quad (6.28)$$

donde

- I_r intensidad de la radiación térmica efectiva (W/m^2)

El tiempo efectivo (t_{efe}) de duración del *flash fire* puede ser determinado mediante la ecuación 6.29 (Lees, 1991):

$$t_{efe} = \frac{3}{2kT_a^3} \left[\tan^{-1} \frac{1}{\beta} - \tan^{-1} \left(\frac{2}{\beta+1} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\beta+1}{\beta+3} \right) \right] \quad (6.29)$$

$$\text{con } \beta = \frac{T_{gi}}{T_a}$$

donde

T_{gi} valor inicial de la temperatura absoluta del gas caliente (K), considerada a temperatura adiabática de la flama.

6.5 EXPLOSIÓN DE VAPOR EXPANDIDO POR LÍQUIDO EN EBULLICIÓN (BLEVE) Y BOLA DE FUEGO (FIREBALL)

6.5.1 Explosión de vapor expandido por líquido en ebullición (BLEVE)

BLEVE²⁸ o explosión de vapor expandido por líquido en ebullición dentro de un tanque cerrado, es un tipo de explosión producido por la fuga a presión que ocurre cuando gases licuados que se almacenan en contenedores a temperaturas por encima de su punto de ebullición, se exponen a condiciones atmosféricas, lo que causa una rápida vaporización que sucede, generalmente, cuando el contenedor sufre rupturas.. De acuerdo a condiciones como la resistencia mecánica y condiciones físicas del tanque, las condiciones térmicas a las que se encuentra sometido éste y al tipo de material almacenado, entre otros factores, la ruptura del tanque, escape y consecuente ignición del material liberado, puede suceder a distintas velocidades (Figuras 6.3 y 6.4) (Birk, 2000). Un BLEVE normalmente es acompañado de una bola de fuego si el líquido fugado es inflamable y su escape del recipiente lo ocasiona un fuego externo. La energía que se produce con este evento puede producir una onda de choque de dimensiones considerables (AIChE, 1994).

Un BLEVE puede ocurrir por diversas causas. Se pueden mencionar, entre otras, las siguientes: (AIChE, 1994)

- Una flama incide sobre la cubierta del tanque en uno o varios puntos encima del nivel del líquido
- Impacto mecánico sobre el recipiente
- Corrosión
- Presión interna excesiva
- Falla metalúrgica o de manufactura

El calor causa debilitamiento del metal el cual falla cuando la presión interna se incrementa, y la expansión de líquido a vapor proporciona la energía necesaria para romper el contenedor, provocando que sus piezas sean lanzadas lejos. La onda de choque y los efectos de fragmentación (número, forma y trayectoria de los fragmentos) del recipiente, dependen en forma directa de la energía interna generada en el recipiente. Esto es, los efectos son una función de las propiedades termodinámicas y la masa del material implicado en el evento (AIChE, 1994).

²⁸ BLEVE: **B**oiling **L**iquid **E**xpanding **V**apor **E**xplosion.

Figura 6.3 BLEVE (lento en dos pasos) en un tanque de gas LP (Birk, 2000).



Figura 6.4 BLEVE (lento en un paso) en un tanque de gas LP (Birk,2000).

6.5.2 Bola de Fuego (Fire Ball)

El resultado de la mezcla de vapor y aire ocasiona la formación de una bola de fuego (*fireball*), la cual sucede cuando a la nube de vapor la alcanza una fuente de ignición. Puede suceder durante este proceso que las válvulas de relevo funcionen, creando una columna vertical de gas. El escape y posterior incendio de gas LP provoca flamas que pueden llegar a alcanzar 30 ó más metros de altura ocasionando gran brillantez en la noche, cuya magnitud depende de la cantidad de gas incendiado (NFPA, 2001).

Las bolas de fuego, pueden llegar a afectar áreas importantes por los efectos de radiación térmica emitida. La parte interna de la nube esta constituida totalmente por combustible, mientras que la capa externa

(donde la ignición ocurre) esta formada por una mezcla aire-combustible. Como la capacidad de flotación se incrementa por el calor en el gas, la nube incendiada tiende a elevarse, extenderse y tomar una forma esférica (AIChE, 1994).



Figura 6.5 Bola de fuego (fireball) originada a partir del escape de gas LP de un tanque de almacenamiento (Birk, 2000).

Algunos elementos importantes considerados a evaluar son: (AIChE, 1994)

- el tamaño de la bola de fuego, indicado como diámetro, en metros, más probable (D), y
- el tiempo de duración (t),

Estos parámetros pueden ser evaluados mediante las ecuaciones 6.30 y 6.31: (AIChE, 1994)

$$D = 5.8 m_c^{1/3} \quad (\text{m}) \quad (6.30)$$

$$\begin{aligned} t &= 0.45 m_c^{1/3} \quad (\text{seg}) \quad \text{cuando } mc < 30,000 \text{ kg} \\ t &= 2.6 m_c^{1/6} \quad (\text{seg}) \quad \text{cuando } mc > 30,000 \text{ kg} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} (6.31)$$

donde

m_c masa total del combustible (kg)

Por lo que respecta a la cantidad de radiación emitida por un combustible al incendiarse, existen distintos modelos. Entre ellos destacan el de *punto de emisión* y el de *flama de sólidos* que permiten calcular la cantidad de radiación emitida por unidad de área y unidad de tiempo (AIChE, 1994). El primer modelo considera que una fracción del calor de combustión se emite como radiación en todas direcciones; la cantidad de radiación recibida por el receptor (q) a una distancia dada (x) desde el punto de emisión, se calcula por la relación 6.32.

$$q_{\text{rad}} = \frac{f m_c H_c \tau_a}{4\pi x^2} \quad (6.32)$$

donde

m_c velocidad de combustión (kg/s)
 H_c calor de combustión por unidad de masa (J/kg)
 τ_a atenuación atmosférica de la radiación térmica (transmisividad)

La fracción de energía de combustión disipada como radiación térmica (f) es el parámetro desconocido para este modelo que depende del tipo de combustible y las dimensiones de la flama. Algunos investigadores han determinado valores que van de 0.15 a 0.34 para metano, y para butano, de 0.20 a 0.27. En la ecuación 6.32 se considera que la velocidad de combustión depende de la cantidad fugada de material. La velocidad de combustión (m_c) se puede calcular con la relación empírica mostrada en la ecuación 6.33²⁹ (AIChE, 1994).

$$m_c = \frac{0.001 H_c A}{H_v + C_v(T_b - T_a)} \quad (6.33)$$

donde

H_v calor de vaporización (J/kg)
 C_v calor específico del combustible (J/kg/K)
 A área de la alberca (donde se encuentra el material fugado) (m²)
 T_b temperatura de ebullición (K)
 T_a temperatura ambiente (K)
0.0010 constante (kg/S/m²)

El modelo de flama de sólidos, puede ser usada para salvar algunas inexactitudes del modelo de punto de emisión. Este modelo considera que el fuego se puede representar por un cuerpo sólido con forma geométrica simple y que toda la radiación térmica se emite por su superficie. La radiación incidente (Q) por unidad de área y tiempo, puede expresarse por la ecuación (6.34) (AIChE, 1994):

$$Q = FE\tau_a \quad (W/m^2) \quad (6.34)$$

donde

F factor de observación (adimensional)
 E poder emisivo del fuego por unidad de superficie (W/m²)
 τ_a factor de atenuación atmosférica (transmisividad) (adimensional)

El factor de observación (F) es la fracción de radiación que incide directamente en el receptor. Este factor depende del tipo de evento (BLEVE, fire ball, jet fire, etc.), de la forma del fuego y el receptor, así como de la distancia que existe entre ambos.

El poder emisivo es la cantidad total de radiación que deja la superficie del fuego por unidad de área por unidad de tiempo. Este valor puede ser calculado usando la ley de Stefan (teoría del cuerpo negro). Otra forma de calcular su valor es mediante la ecuación 6.35 propuesta por Duiser (1989), la que determina el poder de emisión a partir de la combustión y el combustible fugado. Como un valor estimativo, Duiser usa una fracción de radiación (f) de 0.35, y propone la siguiente ecuación para determinar el poder emisivo de una alberca de fuego:

$$E = \frac{0.35 m_c H_c}{1 + 4 \frac{h_f}{d_f}} \quad (6.35)$$

²⁹ Esta relación se recomienda cuando se forma una alberca de fuego con un punto de ebullición (boiling point) (T_b) superior a la temperatura ambiente (T_a) (AIChE, 1994).

donde

E	poder emisivo (W/m^2)
m_c	velocidad de combustión por unidad de área ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)
H_c	calor de combustión (J/kg)
h_f	altura de la flama (m)
d_f	diámetro de la flama (m)
0.35	fracción de radiación (adimensional)

El poder emisivo superficial de una alberca de fuego de propano calculada por este método da como resultado 98 kW/m^2 ($31,000 \text{ BTU/hr/ft}^2$). El poder de emisión superficial de un BLEVE se sugiere que sea el doble del calculado para una alberca de fuego. Con lo que respecta al poder emisivo superficial de las bolas de fuego (fire ball), éste depende en gran medida de los valores de cantidad y presión (de escape) de material, justo antes de su emisión, alcanzando valores de hasta de $320 - 350 \text{ kW/m}^2$ ($100,000 - 110,000 \text{ BTU/hr/ft}^2$) para masas de gas de 1000 a 2000 kg de butano o propano (Johnson *et. al.*, 1990).

Severidad de la explosión

Los parámetros de *severidad de explosión* describen el potencial destructivo o la violencia para un material dado. La presión máxima de explosión, $P_{\text{máx}}$, es el valor más alto de presión producido por la explosión. La severidad de la explosión es comúnmente expresada por los índices $P_{\text{máx}}$ y el índice K_G (para gases como en el caso de gas LP) o el índice K_{St} (para polvos), el cuál se obtiene del valor máximo de presión alcanzada $(dP/dt)_{\text{máx}}$. Experimentalmente, el máximo valor de presión que se obtiene en una tubería cerrada depende del volumen, V , de la tubería; por esta razón, la máxima presión, $(dP/dt)_{\text{máx}}$, ha sido normalizada con respecto al volumen (TuDelf (b), 2001).

La extensión del daño producido, por una nube explosiva, se puede evaluar mediante los efectos producidos por dicho evento. Como se muestra en la tabla 6.15, la información se basa en los efectos ocasionados por la presión de las ondas expansivas, pero se deben adicionar los efectos de los posibles incendios y/o explosiones subsecuentes. Este riesgo es importante ya que dentro del radio de afectación de la onda expansiva de 5 psi existe la certeza de la destrucción de tuberías. En el caso de que las tuberías transportaran alguna sustancia inflamable (como es el caso del gas LP) se añadiría al daño total dentro de la circunferencia (Beltrán, 1996).

Tabla 6.15 Efectos de una explosión a diferentes sobrepresiones (Lees, 1991).

Sobrepresión (psi)	Efectos
0.02	Sonido molesto (137 dB) si es de baja frecuencia (10 a 15 Hz)
0.04	Ruido fuerte y fractura de vidrio
0.1	Fractura de ventanas y pequeños vidrios bajo esfuerzo
0.15	Presión típica de fractura de vidrios
0.3	Distancia segura (por ejemplo, probabilidad de 0.95 de no recibir daño grave) Daño de techos de tejas Límite de alcance de proyectiles producto de la explosión Torre de enfriamiento: falla de las mamparas.
0.4	Daño estructural menor y limitado
0.15-1.0	Ventanas grandes y pequeñas completamente estrelladas Daño a los marcos de las ventanas
0.7	Daño menor a la estructura de casas
1.0	Destrucción parcial de casas, quedan inhabitables
1 - 2	Asbesto corrugado completamente estrellado, paneles de aluminio o acero corrugado deformados Paneles de madera elevados
1.3	Marco estructural de acero de edificios ligeramente deformados
2	Colapso parcial de paredes y techos de las casas Calentador: fracturas de ladrillos. Reactor químico: rotura de ventanas y medidores. Filtros: falla de paredes de concreto.
2 - 3	Fractura de paredes de ladrillo
2.3	Daño estructural serio
2.5	Destrucción del 50% de paredes de ladrillo
3	Pocos daños en maquinaria pesada en edificios industriales Tanque de almacenamiento (techo cónico): el equipo se levanta (50% llenado).
3 - 4	Demolición de edificios de estructura de acero Ruptura de tanques de almacenamiento de combustible
4	Reactor químico: partes internas dañadas.
5	Postes de madera segados Ligero daño en maquinaria industrial pesada Calentador: unidad destruida. Regenerador: marcos colapsados. Ventilador: carnaza y cajas dañadas.
5 - 7	Destrucción casi completa de casa
6	Cubículo de instrumentos: unidad destruida. Recipiente horizontal a presión: marcos deformados, el equipo se mueve y las tuberías se rompen. Regulador de gas: el equipo se mueve y la tubería se rompe.
6.5	Tanques de almacenamiento (techo cónico): equipo levantado (90% llenado). Columna de extracción: el equipo se mueve y la tubería se rompe.
7	Volcamiento de vagones de tren cargados Reactor catalítico: partes internas dañadas. Columna fraccionadora: unidad destruida.
7.5	Regenerador: unidad destruida. Transformador eléctrico: líneas de fuerza dañadas. Turbina de vapor: el equipo se mueve y la tubería se rompe. Cambiador de calor: el equipo se mueve y la tubería se rompe.
7 - 8	Paredes de ladrillo completamente destruidas
8	Tanque de almacenamiento (esférico): el equipo se mueve y la tubería se rompe.
9	Destrucción total de vagones de ferrocarril cargados Reactor químico: unidad destruida. Motor eléctrico: líneas de fuerza dañadas. Recipiente horizontal a presión: unidad destruida. Cambiador de calor unidad destruida.
9.5	Filtro: la unidad se mueve de sus cimientos.

Tabla 6.15 (Continuación) Efectos de una explosión a diferentes sobrepresiones (Lees, 1991).

Sobrepresión (psi)	Efectos
10	Destrucción total de edificios Daño severo a maquinaria pesada Cuarto de control (techo de concreto): unidad destruida. Transformador eléctrico: unidad destruida. Ventilador: unidad destruida. Regulador de gas: controles dañados, carcasa y caja dañadas. Columna de extracción: la unidad se mueve de sus cimientos.
12	Filtro: unidad destruida. Reactor catalítico: unidad destruida. Columna de extracción: unidad destruida. Turbina de vapor: controles dañados. Recipiente vertical a presión: el equipo se mueve y la tubería se rompe. Bomba; líneas de fuerza dañadas.
14	Turbina de vapor: tubería rota. Tanque de almacenamiento (esféricos): falla de abrazaderas y soportes. Recipiente vertical a presión: unidad destruida.
16	Tanque de almacenamiento (esférico): unidad destruida. Bomba: unidad se mueve de sus cimientos.
20	Tanque de almacenamiento (techo flotante): colapso del techo.
> 20	Motor eléctrico: la unidad se mueve de sus cimientos. Turbina de vapor: la unidad se mueve de sus cimientos.
300	Limite del cráter

6.6 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

Debido a que la posibilidad de un sitio para operar depende de la aceptación de los resultados del “reporte de seguridad” por parte de la autoridad competente, la modelación numérica juega un papel significativo. Decisiones importantes son hechas con base a los resultados de dichos modelos, como es la formulación de los planes de seguridad que son aplicables a una empresa. El usuario de un modelo necesita ser capaz de demostrar que el uso de modelos es aplicable a la situación particular que se estudia, y que éste ha sido probado con observaciones de situaciones relevantes.

Los aspectos relativos a la calidad del modelo y uso apropiado de modelos técnicos complejos ha permitido desarrollar el concepto de modelo científico de evaluación, el cual se puede resumir en los siguientes tres elementos (Daish *et al.*, 1999):

- Evaluación científica:** análisis objetivo de los aspectos científicos y usos prácticos de un modelo,
- Verificación:** confirmación de que la implementación en la computadora es una traducción exacta del modelo matemático
- Validación:** comparación de los resultados del modelo contra las observaciones experimentales.

En general, la calibración de un modelo se dificulta por los complejos procesos involucrados, especialmente los efectos meteorológicos. La mayoría de los experimentos para probar experimentalmente los modelos numéricos, se realizan en menores escalas que las liberaciones catastróficas, y por tanto, aún no quedan claros algunos de los fenómenos producidos (Daish *et al.*, 1999).

Dentro de los factores atmosféricos debe recordarse que el esquema típico de Pasquill - Gifford y el coeficiente de Briggs son empíricos, y se basan en datos experimentales para liberaciones de 1 min. a 1 hora.; esto es, usando los esquemas de Pasquill, Gifford y Briggs, las liberaciones están calculadas para duraciones menores a 1 hr.

Aún cuando se cuente con reportes históricos de las condiciones atmosféricas, como son la velocidad y dirección del viento (reportadas de la estación meteorológica o aeropuerto más próximo al sitio de interés), los

datos usados pueden no reflejar las condiciones imperantes del viento en el momento del derrame, debido a efectos locales. Por esta razón, los observadores de éste tipo de eventos se pueden ver obligados a estimar de forma empírica ciertos datos, como son la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica.

En general, el modelo Gaussiano es demasiado simplista para muchas liberaciones; sin embargo su evaluación proporciona una aproximación rápida. En el caso de necesitarse mayor precisión, el modelo será más complejo y se requiere mayor cantidad de información. Generalmente, en este tipo de modelos se asume que en el sitio donde ocurre el accidente el terreno es plano y libre de obstáculos, lo cuál no sucede en la mayoría de los casos.

En ciertos casos, debe considerarse que la vaporización procedente de un derrame, está fuertemente influenciada por el área de la alberca de líquido que se forma, y para todos los casos se supone una profundidad constante (1 cm), lo que puede ocasionar errores importantes en el área estimada si la fuente se encuentra en una cuesta o en una zanja, donde ocurran acumulaciones del material.

Algunas sustancias forman nuevos compuestos químicos al intervenir en procesos químicos como la combustión, por esta razón, el material dispersado bajo el viento puede ser distinto a la sustancia que se liberó. El peso molecular puede cambiar substancialmente, y las reacciones pueden cambiar la densidad y temperatura de la nube ocasionando que los efectos tóxicos pueden ser diferentes a los que se esperaban inicialmente.

CONCLUSIONES

Una forma de proteger a los miembros de la comunidad ubicada en la cercanía de sitios de almacenamiento de gas LP, es tener un adecuado control del uso del suelo en lo que se refiere a las restricciones en los permisos de construcción para obras de tipo habitacional y comercial, siendo estas distancias indicadas en los Planes y Programas de Desarrollo Urbano de cada uno de los estados del País, así como en las normas emitidas por la Secretaría de Energía.

Cuando existen asentamientos humanos en zonas aledañas a instalaciones industriales que manejan sustancias consideradas como de alto riesgo, el uso de los modelos numéricos es indispensable para determinar las áreas que pueden resultar afectadas por liberaciones indeseadas de materia y/o energía. Esta simulación numérica debe llevarse a cabo en forma cuidadosa, considerando todos los elementos que permiten que los resultados se apeguen más a la realidad (ver capítulo 6). Se recomienda que la determinación numérica de los radios de afectación se lleve a cabo en períodos de operación normal de las instalaciones, con la finalidad de definir con anticipación las rutas de evacuación (tanto para el personal de la planta como para la población asentada en la zona aledaña), identificar y coordinar los recursos humanos, servicios de emergencia, de atención médica y hospitalaria, de seguridad pública, entre otros, con los cuáles se puede contar en caso de emergencia, determinando el tiempo de respuesta y haciendo los ajustes necesarios para minimizar las pérdidas producidas.

Ya que las afectaciones que se pueden ocasionar a la población, al ambiente y a la propiedad, debido a la fuga de gas LP de sus diversos depósitos, pueden ser variadas, de acuerdo a los efectos posteriores que se produzcan (formación de nube tóxica, BLEVE, bolas de fuego o nubes explosivas). Debe evaluarse con detalle cuáles son las áreas de afectación más probables, la cantidad de personas afectadas y la magnitud de los daños a los recursos naturales y propiedades.

La selección del modelo numérico a usar para la simulación de los radios de afectación debe tomar en cuenta la información con la cuál se cuenta: cantidad de material, condiciones fisicoquímicas y tipo de almacenamiento, condiciones ambientales (temperatura, humedad, estabilidad atmosférica, dirección y velocidad del viento predominante, etc.), condiciones geográficas del sitio (espacios abiertos o con presencia de depresiones o elevaciones), localización y distribución de construcciones cercanas, entre otros factores. La falta de esta información o la suposición incorrecta de datos dará por resultado que las áreas de afectación resulten muy distintas a las que realmente se producen en un evento real.

El uso de modelos de tipo Gaussiano es útil para obtener una aproximación rápida de los radios de afectación que pueden esperarse. En general es una modelación muy simple e inexacta para muchos tipos de liberaciones (como es el caso de la formación de nubes tóxicas o explosivas) ya que la cantidad de datos proporcionados y el manejo numérico de éstos es bastante limitada, además de que este mismo tipo de modelos asume que en el sitio donde ocurre el accidente los terrenos son planos y libres de obstáculos, lo cuál no sucede en la mayoría de los casos. Cuando se requiere una mayor precisión, el modelo usado debe ser más complejo, lo cuál en general involucra contar con una mayor cantidad de información además de usar ecuaciones numéricas que implican el cálculo de la dispersión del material en dos o tres dimensiones, así como reacciones químicas secuenciales que pueden llegar a ocurrir.

Uno de los puntos más importantes en la seguridad se refiere a la verificación que es necesario llevar en las instalaciones que se dedican a la producción, almacenamiento, distribución y uso continuo de gas LP. Estas verificaciones deben realizarse en forma continua y regulada, ya que ésto permitirá un mantenimiento de tipo preventivo más que correctivo, necesario para evitar la ocurrencia de accidentes de distinta índole y magnitud.

Los accidentes ocurridos en México, donde ha estado involucrado el gas LP, indican que la mayor cantidad de ellos involucra la fuga de material, la cual puede derivar en eventos como incendio o explosión si es que el material liberado entra en contacto con fuentes de ignición cercanas. La fuga del material, tanto en instalaciones industriales como en casas habitación, ocurre por la falta de mantenimiento de los tanques de

almacenamiento, llaves y tuberías, por esta razón se hace indispensable realizar un mantenimiento preventivo de dichos elementos antes que ocurran incidentes que al encadenarse pueden provocar efectos de mayor magnitud. Dentro de las precauciones que se deben tener en las instalaciones, sobresale el contar con un adecuado programa de mantenimiento preventivo y correctivo, que permita minimizar la ocurrencia de incidentes especialmente las fugas.

De acuerdo a modelaciones numéricas realizadas, el incremento del uso del grosor de cédula 40 a cédula 80 reduce la probabilidad de fugas. Otras de las medidas recomendadas son la adición de una válvula de paso para reducir la cantidad de material contenido dentro de la tubería, disminuyendo así los efectos de la fuga. Asimismo, el uso de alarmas por escape de gas durante el período de escape jet, permite llevar a cabo la evacuación antes de que la nube de gas LP crezca lo suficiente para dañara al personal del sitio donde se lleva a cabo el almacenamiento (Taylor, *et. al.*, 1999)

Los estados con mayor incidencia de accidentes (ver capítulo 3), tanto en fuentes fijas como en fuentes móviles, son los Estados de México, Michoacán, Distrito Federal, Puebla y Veracruz. Nótese que también tienen el mayor número de parques y sitios industriales, lo cuál ocasiona un elevado consumo de éste hidrocarburo para todas las actividades que en ellos se llevan a cabo.

Es vital la capacitación periódica de los operarios y transportistas de tanques, autotanques y cilindros que contienen gas LP y circulan por las vías de comunicación terrestres nacionales, ya que la afectación que sufre la población, el ambiente y la propiedad en caso de un incidente, se ve multiplicada cuando estos vehículos circulan por zonas densamente pobladas. La capacitación de los operarios y transportistas debe ser cubierta por las empresas dedicadas a la distribución del material.

Es importante llevar a cabo un estudio de análisis de riesgos en aquellas instalaciones donde la cantidad de gas LP supere lo indicado por la norma NOM-052-ECOL-1993, por lo cuál la empresa entra a formar parte de las empresas denominadas como de “alto riesgo”. Dicho análisis de riesgo debe elaborarse con la finalidad de localizar aquellos puntos de la instalación donde sea necesario modificar, mejorar, cambiar o implantar nuevas medidas de seguridad.

DEFINICIONES

Accidente: es un evento indeseado e inesperado, que se produce por una secuencia específica de eventos que ocurren rápidamente causando daños a la propiedad, a las personas y / o al medio ambiente.

Accidente de Alto Riesgo Ambiental: Una explosión, incendio, fuga o derrame súbito que resulte de un proceso en el curso de las actividades de cualquier establecimiento, así como en tuberías, en los que intervengan uno o varios materiales o sustancias peligrosos y que supongan un peligro grave (de manifestación inmediata o retardada, reversible o irreversible) para la población, los bienes, el ambiente y los ecosistemas.

Análisis de riesgos: es la identificación y evaluación sistemática de objetos de riesgo y peligros.

Área de afectación: representa el área geográfica estimada que puede ser potencialmente afectada por la liberación de una sustancia peligrosa en niveles que pueden causar daños agudos a la salud o la muerte de las poblaciones humanas por efectos de una liberación accidental.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion): explosión por líquido en ebullición dentro de un tanque cerrado.

Daño Máximo Posible (DMP): aquel que ocurre considerando una eficiencia de combustión relativamente baja.

Daño Catastrófico Posible (DCP): aquel en que la eficiencia de combustión es relativamente alta.

Derrame: es el escape de cualquier sustancia líquida o sólida en partículas o mezcla de ambas, de cualquier recipiente que la contenga como tuberías, equipos, tanques, camiones, cisterna, carro tanque, furgones, etc.

Desastre: es desde un punto de vista local, un evento donde ocurrieron varios decesos, decenas de lesiones graves, daños a la propiedad por varios millones de pesos y/o daños al ambiente por mucho tiempo.

Efecto encadenado: es la consecuencia inevitable, pero indirecta de otro accidente o circunstancia.

Estimativo de la Dimensión de Daños (Dimensioned Damage Estimate): es una estimación del nivel del daño que se puede esperar de un peligro de cierta clase de accidentes.

Explosión: es la liberación de una cantidad considerable de energía en un lapso de tiempo muy corto (pocos segundos), debido a un impacto fuerte o por la reacción química de ciertas sustancias.

Flash point: temperatura mínima de un líquido a la cual su presión de vapor es lo suficientemente alta para producir una mezcla inflamable con aire.

Flujo térmico

- a) **Zona 0:** Es una zona en la que una instalación se encuentra expuesta al fuego resultante de la ignición de una mezcla de aire – combustible, que esta presente de manera continua o por períodos largos de tiempo.
- b) **Zona 1:** Es una zona en la que las instalaciones están expuestas al fuego producido por la combustión de una mezcla de aire – combustible, que puede ocurrir por períodos cortos durante la operación normal de la planta.
- c) **Zona 3** Representa una zona en la cual las instalaciones están expuestas al fuego que se produce por la combustión de una mezcla aire – combustible con una muy baja probabilidad. En caso de presentarse, sería de baja intensidad y por un corto período.

Fuga: es la pérdida de material que se presenta al existir un cambio de presión debido a rupturas en el recipiente que lo contiene o lo conduce.

IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health.

Incidente: es la pérdida incontrolada o no deseada de material o energía.

Objeto de riesgo (Risk Object): son las industrias, almacenes, vías de comunicación, etc., que contienen peligros.

PEL: Permissible Exposure Limit o límite de exposición permisible.

Peligro: es una condición química o física que tiene el potencial para causar daños a la gente, la propiedad o el medio ambiente.

Peor caso: es el evento o accidente que puede presentar las peores consecuencias. Hay tres tipos:

1. Las consecuencias son tan limitadas que el nivel de riesgo es irrelevante, cualquiera que sea la probabilidad de que ocurra.
2. Las consecuencias son tan serias que la probabilidad con que ocurra debe ser pequeña si se desea un nivel de riesgo tolerable. En casos extremos, la carencia de medidas efectivas de seguridad hacen que el riesgo sea intolerable.
3. Las consecuencias posibles son las peores. La probabilidad de ocurrencia es tan baja que el riesgo es prácticamente descartado.

Pool Fire (Alberca de fuego): incendio de los vapores que salen de un derrame de combustible líquido.

Probabilidad: predicción calculada de la ocurrencia de un accidente en un cierto período de tiempo.

Riesgo: es una medida de la pérdida económica o daño a humanos en términos de los incidentes probables y a la magnitud.

Riesgo ambiental: probabilidad cuantitativa de que ocurran efectos a la salud después de una “cantidad” específica de peligros relacionados con sustancias químicas a las que a sido expuesto un individuo (Silano, 1988).

Toxicidad: capacidad de una sustancia para causar daño a los tejidos vivos, deterioro del sistema nervioso central, enfermedades severas, o muerte por ingestión, inhalación o absorción por la piel. Se identifican 3 zonas de acuerdo a la concentración del material.

- a) **Zona 0:** es una zona en la que una mezcla de aire tiene concentraciones de gas (o vapor) tóxico por encima del valor de LTEL en forma constante o por períodos de tiempo prolongados.
- b) **Zona 1:** es una zona en la cual una mezcla de aire y gas (o vapor) tóxico en concentraciones por encima del IDLH, por períodos cortos durante la operación normal de la planta
- c) **Zona 3:** Se trata de una zona en la cual una mezcla de aire y gas (o vapor) tóxico con una concentración por encima del IDLH es poco probable durante la operación normal de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

a) Referencias Bibliográficas

ACARMEX (2000). Base de datos de Accidentes Químicos en el transporte carretero. Área de Riesgos Químicos, CENAPRED-SEGOB. México.

ACQUIM (2000). Base de datos de Accidentes Químicos en fuentes fijas y móviles. Área de Riesgos Químicos, CENAPRED-SEGOB. México.

AGUILAR, M. (1999). Riesgo ambiental (por accidentes tecnológicos graves). División de Educación Continua. Palacio de Minería, Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.

AIChE (1994). Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. New York, USA.

BELTRAN, L. (1996). Evaluación de la peligrosidad en un parque industrial (Caso de estudio: Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Mor.). Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

BRIGGS, G. A. (1973). Diffusion estimation for small emissions. ATDL Contribution File No. 79. Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory.

BUTRÓN S., J.A. (1996). Análisis de nubes explosivas. Curso de Análisis de Riesgos. PUMA – UNAM. México.

BUTRÓN S., J.A. (1995). Explosiones debidas a nubes de vapor no confinadas (UVCE). V Congreso Nacional de Ecología Industrial. Hotel María Isabel Sheraton, 26 de Julio de 1995. México, DF.

CASSIDY, K. (1999). Consequence Assessment: How far is far enough?. International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, San Francisco, Cal. USA.

DAISH, N. C., BRITTER, R.E., LINDEN, P. F., JAGGER, S. F., CARISSIMO, B. (1999). SMEDIS: Scientific model evaluation techniques applied to dense gas dispersion models in complex situations. International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, San Francisco, Cal. USA.

DE LA CRUZ, L., ALCÁNTARA, M., (2000). Estadísticas de accidentes carreteros donde se involucran sustancias químicas. Recomendaciones como medidas de prevención y acciones de emergencia. Informe técnico. CENAPRED, México.

Dow^a. Dow's Process Safety Guide (1981). Cuarta Edición. Ed. Dow Chemical Co. Midland, EUA.

Dow^b. Dow's Fire and Explosion Index, Hazard Classification Guide (1981). Quinta Edición. Ed. American Institute of Chemical Engineers.

DUISER, J. A. (1989). Radiation of heat. Method for the calculation of the physical effects of the escape of dangerous materials (liquids and gases). Report of the Committee for the Prevention of Disasters, Ministry of Social Affairs. The Netherlands, 2nd. Edition.

FEMA. Federal Emergency Management Agency (1990). Risk Analysis. Emergency Management Institute. National Emergency Training Center. EUA.

ITSEMAP (1995). Curso sobre Análisis de Riesgos. Edit. MAPFRE, 1ª sección, Madrid, marzo, pp.12.

JOHNSON, D.M., PRITCHARD, M. J., WICKENS, M. J. (1990). Large scale catastrophic releases of flammable liquids. Commission of the European Communities Report Contract No. EV4T.0014.UK (H)

LEES, F. P. (1991). Loss prevention in the process industries. Vol. 1. Butterworth – Heinemann Ltd. Great Britain.

LGEEPA (1996). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. 13 de Diciembre de 1996.

LEWIS, D. J. (1979). The Mond Fire and Explosion Index Applied to Plant Layout and Spacing. Thirteenth Loss Prevention Symposium, New York, AIChE.

LI MULLER, A., MARSH, M. (1994). Guidance for the use of risk assessments in site clean ups in Ontario. - Proposed draft-. Ontario Ministry of the Environment and Energy (OMEE). May.

MARTIN, D. O (1976). The change of concentration standard deviation with distance. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26 (2).

MARSHALL, V.C. (1977). How lethal are explosions and toxic escapes. *Chemical Engineering Lond.*, 323, (573).

MASTERS, G. M. (1990) Introduction to environmental engineering and science. Prentice Hall, Englewood, New Jersey.

MONTAGUE, D. F. (1990) Process risk evaluation- What method to use?. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 29. Park Center, Knoxville, Tennessee, USA. pp. 27-53.

MORANDI, R., DATTILO, F., ROTONDARO, G., ANTONELLO, F., ZENIER, F. (1999). Investigation of an LPG Accident with Application of Different Mathematical Models. International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, San Francisco, Cal. USA.

MORTON, B. R., TAYLOR, G. I., TURNER, J. S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Process Royal Society*, A234 (1).

MUÑOZ, A. *et. al.* (1992). La Industria petrolera ante la regulación jurídico-ecológica de México. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM. México.

NOM-052-ECOL-1993 (1993) Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993. México.

NOM-001-SEDG-1996 (1997). Plantas de almacenamiento para gas LP. Diseño y construcción. Diario Oficial de la Federación, 13 de agosto de 1997. México.

NOM-011/1-SEDG-1999 (2000). Condiciones de seguridad de los recipientes portátiles para contener gas LP en uso. Diario Oficial de la Federación, 3 de marzo de 2000. México.

NOM-010-SEDG-1999 (1999). Valoración de las condiciones de seguridad de los vehículos que transportan, suministran y distribuyen Gas L.P., y medidas mínimas de seguridad que se deben observar durante su operación. Diario Oficial de la Federación, 23 de agosto de 1999. México.

NOM-025-SCFI-1993 (1993). Estaciones de gas LP con almacenamiento fijo.- Diseño y construcción. Diario Oficial de la Federación, 15 de octubre de 1993. México.

NOM-031-SCFI-1994 (1994). Gas natural comprimido para uso automotor. Requisitos de seguridad para estaciones de servicio e instalaciones vehiculares. Diario Oficial de la Federación, 11 de julio de 1994. México.

NOM-005-SECRE-1997 (1997). Gas licuado natural. Estaciones de servicio. Diario Oficial de la Federación, 16 de diciembre de 1997. México.

MOEE. Ontario Ministry of Environment and Energy (1995). Guideline for use at contaminated sites in Ontario. ISBN 0-7778-4052-9. Ontario.

MONTAGUE, D. F. (1990). Process risk evaluation. What method to use?. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 29. Park Center, Knoxville. Tennessee. USA.

PEMEX^a. Petróleos Mexicanos (1998). Comité Interorganismos de Ductos. Tercer Congreso y Expo International de Ductos. Memorias técnicas. Vol. I. México.

PEMEX^b. Petróleos Mexicanos (1998). Memoria de labores 1998. México.

PETERSON, W. B. (1978) User's Guide for PAL – A Gaussian Plume Algorithm for Point, Area, and Line Sources. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. USA.

PICCININI, H. (1998). Memorias del Curso de Análisis de Riesgos en Instalaciones Industriales. CENAPRED-SEGOB, México.

PUMA. Programa Universitario del Medio Ambiente (1995). Apuntes del Curso “Administración y análisis de riesgo”. UNAM, México.

REGLAMENTO DE GAS NATURAL (1995). Diario Oficial de la Federación. 8 de noviembre de 1995. México.

REGLAMENTO DE DISTRIBUCIÓN DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO (1993). Diario Oficial de la Federación. 25 de noviembre de 1993. México.

SEGUNDO LISTADO DE ACTIVIDADES ALTAMENTE RIESGOSAS (1992). Diario Oficial de la Federación. 4 de mayo de 1992. México.

SE^c. Secretaría de Energía (2000). Plantas de distribución de gas LP en México. México.

SHCP. Secretaría de Hacienda y Crédito Público (1995). Programa Nacional de Desarrollo Urbano 1995 – 2000. México.

SILANO, V (1988). Evaluación de riesgos para la salud pública asociados con accidentes causados por agentes químicos. OPS, OMS. Ginebra, Suiza.

TAYLOR, J. R., RIEZEL, Y., WEBER, Y (1999). Dispersion modeling in terrain for liquefied gas releases from plant and pipelines. International Conference and workshop on modeling the consequences of accidental releases of hazardous materials. San Francisco, Cal. USA.

UNEP^a (1990). APELL: Concientización y preparación para emergencias a nivel local. Un proceso para responder a los accidentes tecnológicos. PNUMA.

UNEP^b (1992). APELL: Hazard Identification and Evaluation in a Local Community. United Nations Environment Programme. Programa APELL. Francia, 1992.

U.S.EPA^a (Environmental Protection Agency) (1995). Hazard Assessment Course Schedule, Notas del curso. USA.

U.S.EPA^b (Environmental Protection Agency) (1997). Handbook of Chemical Hazards Analysis Procedures. USA.

ZAGAL, J. (1996). Método de evaluación de riesgos en accidentes químicos. Memorias del Simposio regional sobre preparativos para emergencias y desastres químicos: Un resto para el siglo XXI. OPS / OMS. División de Salud y Ambiente. Programa de preparativos para situaciones de emergencia y coordinación de socorro en casos de desastre. México, D.F., Diciembre.

b) Direcciones Electrónicas Referidas

ANGELSEN, S., DRAKE, L. (1999). Risk based inspection (RBI) benefits for the offshore and onshore. Oil & Gas industry. *Revista Ductos*, (11), Enero - Febrero, pp. 24-32. PEMEX, México. (http://www.pemex.gob.mx/r11_24.html).

BIRK, A. M. (2000). Two step BLEVE. Queen's University at Kingston. USA. (<http://conn.me.queensu.ca/kielec/twostep.html>).

IBARRA, M. A. (1997). LPG ducto de 12" dn Jáltipan – Salina Cruz. *Revista Ductos*, (2), Julio - Agosto, pp. 27 - 30. PEMEX, México. (http://www.pemex.gob.mx/r2_27html).

INE. Instituto Nacional de Ecología (2001a). Efectos en la salud y el ambiente por explosiones, incendios y fuga o derrame de materiales peligrosos. (<http://www.ine.gob.mx/dgmrar/ra/efectos/efectos.html>, 01 de Marzo de 2001, 13.21 hr).

INE. Instituto Nacional de Ecología (2001b). Definición de los accidentes de alto riesgo ambiental. (<http://www.ine.gob.mx/dgmrar/ra/definicion/defaara.html>, 01 de Marzo de 2001, 12.16 hr).

INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000). Resultados preliminares del Censo General de Población 2000. México. (<http://www.inegi.gob.mx>).

LEY REGLAMENTARIA DEL ARTÍCULO 27 CONSTITUCIONAL EN EL RAMO DEL PETRÓLEO¹ (1995). Diario Oficial de la Federación. Mayo de 1995. México. (<http://www.energía.gob.mx/secc2historia.html>).

LEY REGLAMENTARIA DEL ARTÍCULO 27 CONSTITUCIONAL EN EL RAMO DEL PETRÓLEO² (1996). Diario Oficial de la Federación. 13 de noviembre de 1996. México. (<http://www.cre.gob.mx/publica/series/folleto%203/art27.html>).

NFPA (2001). BLEVE kills two.

http://www.nfpa.org/Research/Fire_Investigation/Articles/BLEVE_Kills_Two/bleve_kills_two.html

ONCETV (2000). Clausuran tres distribuidoras de gas para microbuses. (www.onctev.ipn.mx/Noticias/...ido.asp?liNota=3886&tbColor=FB9A66).

PAZ, J. M. (1998). Implementación del sistema SCADA y automatización del sistema nacional de gasoductos y LPG ductos. *Revista Ductos*, (6), Marzo - Abril, pp. 4-8. PEMEX, México. (http://www.pemex.gob.mx/r6_4.html).

PEMEX^c. Petróleos Mexicanos (2001). Infraestructura. México.

(http://www.gas.pemex.com/seccion_frame.asp?seccion_id=298).

PEMEX^d. Petróleos Mexicanos (2001). Ingeniería de plantas industriales. México.

(http://www.gas.pemex.com/seccion_frame.asp?noticia_id=698&seccion_id=302).

PEMEX^e. Petróleos Mexicanos (2001). Galería de Imágenes. México.

(http://www.pemex.gob.mx/foto_pgpb.html)

SE^a. Secretaría de Energía (1999). Gas LP. México. (<http://www.energia.gob.mx/secc10/frame10.html>).

SE^b. Secretaría de Energía (1999). Producción nacional de combustibles seleccionados. México.

(<http://www.energia.gob.mx/secc3/sem16.html>).

SIEM (2000). Sistema de Información Empresarial Mexicano. México. (<http://www.siem.gob.mx>).

SEDESOL. Secretaría de Desarrollo Social (2001). Programa de Ordenamiento Territorial y Promoción del Desarrollo Urbano. México. (<http://www.sedesol.gob.mx/desuryvi/desurb/reorder.htm>).

TUDELf (2001). Accident database: Examples of some disasters in the chemical process industries. Explosion Group TuDelf (Delf University of Technology) (<http://www.dct.tudelft.nl/part/explosion/acdata.html>).

TUDELf (b) (2001). Explosions. An introduction. TuDelf (Delf University of Technology) (http://www.dct.tudelft.nl/part/explosion/index_p.html).

TVAZTECA (2001). Detendrá industria de gas LP, programas de expansión y renovación. Gas LP en México. 11 de mayo, 2001. <http://www.hechostvazteca.com.mx/indexhechos.html>.

UNEP^c (2000).(<http://www.unepie.org/apell/accident.html>)

UNO MÁS UNO (1999). Distribuidores de gas LP denuncian prácticas desleales; inconformes con el gobierno capitalino, cuestionan abierto apoyo al gas natural, aún carente de infraestructura. 13 de Agosto. pp. 22. (<http://www.asociagas.com.mx/noticias.htm>).

ANEXO A

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD PARA GAS LICUADO DE PETRÓLEO

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD PARA SUSTANCIAS QUÍMICAS			
Fecha de elaboración: 22 de Septiembre de 1999		Fecha de revisión: 15 de Enero de 2001	
Nombre de la Empresa: NA			
SECCIÓN I DATOS GENERALES DEL RESPONSABLE DE LA SUSTANCIA QUÍMICA			
1.- Razón social y dirección de la compañía (fabricante, importador, usuario, distribuidor, generador):		NA	
2.- En caso de emergencia comunicarse a:		CECOM: 01-800-00-413-00 en la República Mexicana, para llamadas originadas en la Ciudad de México y el área metropolitana 5550-1496, 5550-1485 o 5550-4885, fax 5616-5560 o 5616-5561 SETIQ: 01-800-00-214-00 en la República Mexicana, para llamadas originadas en la Ciudad de México y el área metropolitana 5559-1588.	
3.-Domicilio completo:			
Calle: NA	No. Exterior: NA	Colonia: NA	C.P.: NA
Delegación o Municipio: NA		Localidad o Población: NA	Entidad Federativa: NA
SECCIÓN II DATOS GENERALES DE LA SUSTANCIA QUÍMICA			
1. Nombre comercial:	Gas licuado de petróleo	4. Familia química:	Hidrocarburos alifáticos
2. Nombre químico:	Propano - Butano	5. Sinónimos:	Gas doméstico
3. Peso molecular:	42.58	6. Otros datos:	
SECCIÓN III COMPONENTES RIESGOSOS			
1. % y nombre de los componentes		2. Número CAS	3. Núm. ONU:
Mezcla de propano – butano con trazas de isobutano, isobutileno y otros hidrocarburos.		68476-85-7	1075
4. Límite máximo permisible de concentración		5. IPVS ppm	6. Grado de riesgo
CPT 1000 ppm 1800 mg/m ³ CCT 1250 ppm 2250 mg/m ³ PEL 1000 ppm para un día de trabajo de 8 hrs (permissible exposure limit)			Salud: 1 Inflamabilidad: 4 Reactividad: 0 Riesgos especiales N.D.
SECCIÓN IV PROPIEDADES FÍSICAS			
1. Temperatura de fusión (°C)	-163.6	9. Velocidad de evaporación (butil acetato = 1)	ND
2. Temperatura de ebullición(°C)	-27.9	10. Punto de inflamación	-60 °C
3. Presión de vapor(mmHg a 20° C)	103	11. Temperatura de autoignición (°C)	482 - 538
4. Densidad relativa	2.01	12. % de Volatilidad	100
5. Densidad de vapor (aire=1)	1.5 lb/pie ³	13. Límites de inflamabilidad	
6. Solubilidad en agua (g/ml)	Ligeramente soluble	Inferior:	1.55
7. Reactividad en agua	Ninguna	Superior:	8.60
8. Estado físico, color y olor	Líquido incoloro e inoloro (se le agregan mercaptanos para oler)	14. Sensibilidad a la luz::	No se descompone con la luz
		15. Otros datos:	

SECCIÓN V RIESGOS DE FUEGO O EXPLOSIÓN					
1. Medios de extinción:					
Niebla de Agua	Espuma	Halon	CO2	Polvo químico seco	Otros
✓	✓		✓	✓	
2. Equipo especial de protección (general) para combate de incendio:					
Equipo completo de bombero con protección térmica, mangueras, extintores, aspersores de enfriamiento. Puede requerirse equipo de respiración autónomo.					
3. Procedimiento especial de combate de incendio:					
Mueva los contenedores del área de fuego si lo puede hacer sin ningún riesgo. Nunca agregue agua directamente a la fuga o válvulas de seguridad. Enfríe los contenedores con chorros de agua hasta mucho después de que el fuego se haya extinguido. Manténgase SIEMPRE alejado de los extremos de los tanques, y retírese inmediatamente en caso de existir ruido en los mecanismos de seguridad o si el tanque comienza a decolorarse. En incendios masivos, combata el incendio desde una distancia máxima o utilice soportes fijos para mangueras o chiflones reguladores; si no es posible, retírese del área, dejelo arder y solicite apoyo externo.					
4. Condiciones que conducen a un peligro de fuego o explosión no usuales:					
Se debe tener especial cuidado con atmósferas cerradas sin ventilación, calentamiento excesivo. Se enciende fácilmente por calor, chispas o flamas. Forma mezclas explosivas en el aire. Los vapores pueden viajar a una fuente de ignición y regresar con flamas. Los vapores inicialmente son más pesados que el aire. Los cilindros con rupturas pueden proyectarse.					
5. Productos de la combustión:			CO ₂ y H ₂ O. Al iniciarse puede producirse gases irritantes.		
SECCIÓN VI DATOS DE REACTIVIDAD					
1. Sustancia		Estable ✓		Inestable	
2. Condiciones a evitar:		La combinación con el aire, ya que forma una mezcla explosiva. Fuentes de ignición, altas temperaturas, carga estática.			
3. Incompatibilidad (sustancias a evitar)		Agentes oxidantes.			
4. Descomposición de componentes peligrosos:		Dióxido y monóxido de azufre.			
5. Polimerización peligrosa:		Puede ocurrir:		No puede ocurrir: ✓	
6. Condiciones a evitar:		No se ha reportado polimerización peligrosa en condiciones normales de presión y temperatura.			
SECCIÓN VII RIESGOS PARA LA SALUD					
1.- POR EXPOSICIÓN AGUDA					
SÍNTOMAS					
1. Ingestión accidental:		No es posible			
2. Contacto con los ojos:		Irritaciones ligeras. En casos extremos puede llegar a producir ceguera.			
3. Contacto con la piel:		En estado líquido causa quemaduras por congelamiento.			
4. Absorción:		No es posible.			
5- Inhalación:		El gas provoca mareos, somnolencia, inconciencia, hipoxia y muerte por asfixia, en ocasiones sin advertencia.			
PRIMEROS AUXILIOS					
2. Contacto con los ojos:		Lavar con abundante agua por lo menos durante 15 minutos. Obtener atención médica inmediata.			
3. Contacto con la piel:		Descongelar con agua tibia la ropa antes de quitarla. Quitar la ropa y el calzado contaminados. Lavar con abundante agua y jabón por lo menos durante 15 minutos. Obtener atención médica inmediata.			
4. Inhalación:		Retirar al paciente de la fuente de exposición y buscar atención médica inmediata. Si es necesario, porque la respiración se ha detenido, aplicar respiración artificial (RCP).			
2. POR EXPOSICIÓN CRÓNICA :					
No hay datos disponibles.					
Sustancia química considerada como:					
Carcinogénica:		Teratogénica:		Mutagénica:	
Si: _____	No: ✓	Si: _____	No: ✓	Si: _____	No: ✓
NOM-010-STP (Apéndice a):		Si: _____	No: ✓	Información complementaria:	
Otra fuente aprobada:		Si: _____	No: ✓	Especificar fuente:	

SECCIÓN VIII INDICACIONES EN CASO DE FUGA O DERRAME
Los vapores de gas LP no controlados que alcancen una fuente de ignición, provocan una explosión por lo que es fundamental que este producto no tenga contacto con ningún tipo de calentamiento o fuente de ignición. Aísle el área de la fuga inmediatamente a por lo menos 50 a 100 m (160 a 330 ft) a la redonda. La evacuación inicial debe ser, al menos, de 800 m a favor del viento. Use agua en forma de rocío para reducir los vapores o dispersar la nube de vapor a la deriva. No ponga agua directamente sobre el derrame o fuente de la fuga. Todo el equipo que se use durante el manejo del producto, deberá estar conectado eléctricamente a tierra, y contar con medidas de seguridad como válvulas de relevo, instalaciones eléctricas a prueba de explosión, etc. Prevenga la expansión de vapores a través de alcantarillas, sistemas de ventilación y áreas confinadas. No tocar los contenedores dañados o el material derramado, a menos de que esté usando la ropa adecuada. Detenga la fuga en caso de poder hacerlo sin riesgo. Retírese inmediatamente si la concentración del gas alcanza los límites de explosividad; corte todo suministro eléctrico y espere que la concentración disminuya. Si es posible, voltee los contenedores que presenten fugas para que se escapen los gases en lugar del líquido.
SECCIÓN IX EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL
1. Especificar tipo:
Se requiere ropa de algodón, guantes de carnaza, mandiles, botas de hule y máscara con suministro de aire comprimido.
2. Practicas de higiene:
Ninguna específica.
SECCIÓN X INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTACIÓN (DE ACUERDO CON LA REGLAMENTACIÓN DE TRANSPORTE)
NOM-002-SCT-1994: Clase 2.1, Riesgo: Gas inflamable
SECCIÓN XI INFORMACIÓN ECOLÓGICA
Listado de actividades altamente riesgosas relativo a sustancias tóxicas (DOF 28/Mar/90): No aparece Listado de actividades altamente riesgosas relativo a sustancias explosivas e inflamables (DOF 4/May/92): Cantidad de reporte en estado gaseoso a partir de 50,000 kg Clasificación CRETIB: No especificada.
SECCIÓN XII PRECAUCIONES ESPECIALES
1. De manejo y almacenamiento:
Los tanques se deben ubicar en lugares frescos, secos y bien ventilados, alejados de fuentes de ignición y cargas estáticas. No ubicarlo cerca de materiales oxidantes. Los equipos deben estar debidamente aterrizados y contar con medidas de seguridad como válvulas de relevo, instalaciones eléctricas a prueba de explosión, etc.
2. Otras:
Evitar los trabajos con flama abierta cerca de donde se recibe, almacena y distribuye el producto. Mantenga inspecciones frecuentes a las instalaciones y dispositivos de seguridad para prevenir fallas o posibles fugas.

HOJA DE TRANSPORTE PARA GAS LICUADO DE PETRÓLEO

1. RAZÓN SOCIAL Y DIRECCIÓN DE LA COMPAÑÍA		3. NOMBRE DEL PRODUCTO O RESIDUO COMERCIAL: Gas Licuado de Petróleo QUÍMICO: Propano - Butano		6. COMPAÑÍA TRANSPORTADORA	
2. TELEFONOS DE EMERGENCIA Y FAX DEL EXPEDIDOR		4. CLASIFICACIÓN Gas inflamable 5. No. UN 1075		7. TELEFONOS DE EMERGENCIA Y FAX	
8. ESTADO FÍSICO Líquido	9. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS Peso Molecular 42.58 Densidad relativa 2.01 Presión de vapor (mmHg a 20°C) 103 Punto de inflamación -60 °C Temp. Autoignición 482 – 538 °C Lím. Inf. Inflamabilidad 1.55 Lím. Sup. Inflamabilidad 8.60		10. AVISAR AL SISTEMA NACIONAL DE EMERGENCIA Y A LAS AUTORIDADES ESPECÍFICAS DE MATERIALES PELIGROSOS: POLICIA FEDERAL DE CAMINOS, BOMBEROS, CRUZ ROJA, ETC. SETIQ: 01-800-00-214-00 en la República Mexicana, para llamadas originadas en la Ciudad de México y el área metropolitana 5559-1588. CECOM: 01-800-00-413-00 en la República Mexicana, para llamadas originadas en la Ciudad de México y el área metropolitana 5550-1496, 5550-1485 o 5550-4885, Fax 5616-5560 o 5616-5561		
11. EQUIPO Y MEDIOS DE PROTECCIÓN PERSONAL Se requiere ropa de algodón, guantes de carnaza, mandiles, botas de hule y máscara con suministro de aire comprimido.					
EN CASO DE ACCIDENTE: * PARE EL MOTOR * PONGA SEÑALES EN ZONA DE PELIGRO * ALEJE A TODA PERSONA INNECESARIA DE LA ZONA DE PELIGRO					
12. RIESGOS ■ SI OCURRE ESTO		13. ACCIONES ■ HAGA ESTO			
14.  INTOXICACIÓN / EXPOSICIÓN		15. Contacto con los ojos: Lavar con abundante agua por lo menos durante 15 minutos. Obtener atención médica inmediata. Contacto con la piel: Descongelar con agua tibia la ropa antes de quitarla. Quitar la ropa y el calzado contaminados. Lavar con abundante agua y jabón por lo menos durante 15 minutos. Obtener atención médica inmediata. Inhalación: Retirar al paciente de la fuente de exposición y buscar atención médica inmediata. Si es necesario, aplicar respiración artificial (RCP). El fuego puede producir gases irritantes o venenosos.			
16. CONTAMINACIÓN		17. Detenga la fuga en caso de poder hacerlo sin riesgo. Use rocío de agua para reducir los vapores; o desviar dispersar la nube de vapor a la deriva.			
18. INFORMACIÓN MEDICA		19.			
20.  DERRAMES / FUGAS		21. Elimine todas las fuentes de ignición. Detenga la fuga si no se expone al riesgo. No ponga agua directamente sobre el derrame o fuente de la fuga. Prevenga la expansión de vapores a través de alcantarillas, sistemas de ventilación y áreas confinadas. No tocar los contenedores dañados o el material derramado, a menos de que este usando la ropa adecuada. Si es posible, voltear los contenedores que presenten fugas para que se escapen los gases en lugar del líquido. Aísle el área de la fuga inmediatamente a por lo menos 50 a 100 m (160 a 330 ft) a la redonda hasta que el gas se haya dispersado. La evacuación inicial debe ser, al menos, de 800 m a favor del viento.			
22.  FUEGO / EXPLOSIÓN		23. Los vapores de gas LP no controlados que alcancen una fuente de ignición, provocan una explosión por lo que es fundamental que este producto no tenga contacto con ningún tipo de calentamiento o fuente de ignición. Retírese inmediatamente si la concentración del gas alcanza los límites de explosividad; corte todo suministro eléctrico y espere que la concentración disminuya. Todo el equipo que se use durante el manejo del producto, deberá estar conectado eléctricamente a tierra, y contar con medidas de seguridad como válvulas de relevo, instalaciones eléctricas a prueba de explosión, etc.			
24. NOMBRE		FIRMA		PUESTO	
25. ESTA HOJA DEBERA ESTAR EN UN LUGAR ACCESIBLE PARA SER USADA EN CASO DE EMERGENCIA Y DEBERA SER REQUISITADA EN SU TOTALIDAD.		TELÉFONO			

Formato: NOM-005-SCT2/1999



SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo,
Del. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360

www.cenapred.gob.mx
www.proteccioncivil.gob.mx